

**ANALYSE DES CONDITIONS
D'ÉCOULEMENT HIVERNAL
DANS LE LAC DU DÉLAISSÉ
(RIVIÈRE MONTMORENCY)**

Rapport de recherche No R-799

Mars 2005

**ANALYSE DES CONDITIONS D'ÉCOULEMENT HIVERNAL
DANS LE LAC DU DÉLAISSÉ (RIVIÈRE MONTMORENCY)**

Pour le compte

**des Municipalités de Boischatel
et de Sainte-Brigitte-de-Laval,
de l'Arrondissement de Beauport (Ville de Québec)
et de la compagnie Boralex Énergie Inc.**

avec la collaboration du

Conseil de Bassin de la Rivière Montmorency

Rapport INRS-ETE #799

Mars 2005



SOMMAIRE



Référence pour fins de citation : M. Leclerc, F. Bérubé, J. Landry, N. Bergeron et Marc-André Pouliot (2005). Analyse des conditions d'écoulement hivernal dans le lac du Délaissé (rivière Montmorency). Pour le compte des Municipalités de Boischatel et Sainte-Brigitte-de-Laval, de l'Arrondissement Beauport, de Boralex Énergie Inc. en collaboration avec le Conseil de Bassin de la rivière Montmorency. Rapport #R- 799. Mars. 30 p.

Résumé : le 23 décembre 2004, des inondations ont provoqué la submersion de sous-sols de certaines résidences et bâtiments municipaux de la rue des Émeraudes à Boischatel et l'isolement de propriétés en rive droite du côté de l'Arrondissement de Beauport (rue Saint-Pierre et secteur résidentiel des Îlets). Le 11 janvier 2005, divers intervenants ont assisté à une rencontre à l'Hôtel de ville de Boischatel, dont le but était de rechercher des solutions possibles au phénomène des inondations hivernales. Suite à cette rencontre, un mandat a été donné à l'INRS-ETE, afin de conduire une étude portant sur la caractérisation des conditions d'écoulement hivernal dans le lac du Délaissé et rechercher des pistes de solution. Le Conseil de Bassin de la rivière Montmorency (CBRM) s'est vu confier un mandat de coordination des intervenants pour l'étape de réalisation de l'étude sur le terrain. Les Municipalités de Boischatel et de Sainte-Brigitte-de-Laval, l'Arrondissement de Beauport (Ville de Québec) ainsi que la compagnie Boralex Énergie Inc. financent l'étude.

Les objectifs de l'étude sont de :

- Documenter la séquence hydro-météorologique qui a déclenché la débâcle et, par la suite, durant l'embâcle du lac du Délaissé;
- Caractériser la distribution longitudinale du niveau d'eau dans la zone d'intérêt du lac du Délaissé et interpréter les résultats obtenus;
- Identifier les obstructions possibles à l'écoulement et leur nature si possible;
- Examiner la possibilité de remédiation aux inondations *via* l'opération du barrage des Marches-naturelles;
- Tester un géo-radar (prêt de la Commission géologique du Canada CGC-CGQ) pour la caractérisation de la glace dans le bief d'écoulement;**L'analyse des résultats préliminaires** a permis de constater les faits suivants :
- Le bief étudié s'étend du lac du Délaissé au barrage des marches naturelles sur une distance totale de 2,2 km. Certaines séquences préalables ont eu lieu dans le secteur des Îlets/Trois-Saults en amont situé immédiatement à l'amont

- La débâcle produite par le temps doux (redoux) du 22-23 décembre 2004 a vraisemblablement pris son origine dans le secteur des Grands-rapides (du km 35 au km 17 de la rivière mesurés depuis l'embouchure), un tronçon de forte pente propice au décrochement du couvert de glace lors des redoux hivernaux.
- Le total des précipitations liquides tombées à la tête du bassin versant a atteint 60 mm en 13 heures avec des pointes horaires de 9 mm/h.
- Le débit étant assez élevé, la débâcle a d'abord emporté le couvert de glace jusqu'à la hauteur du secteur des Îlets (prise d'eau de Beauport).
- Un embâcle temporaire s'est produit à la hauteur de la prise d'eau des Îlets dans la nuit du 23 au 24 décembre. Sa portée s'étendait entre la limite est de la ville de Québec (frontière avec Boischatel) et un point situé à environ 500 m en amont du pont multi-fonctionnel (ligne d'Hydro-Québec). Cet embâcle a persisté pendant quelques heures puis il s'est produit une nouvelle débâcle qui a emporté la glace jusqu'au lac du Délaiqué où s'est formé un nouvel embâcle.
- La rivière est demeurée libre de glace sur l'ensemble du parcours de la débâcle et ce, durant près de trois semaines. Le temps froid extrême et persistant qui a suivi la débâcle a été propice à la production intensive de frasil et à son transport sur l'ensemble du parcours. C'est plus particulièrement le cas dans le rapide des Trois-Saults qui se caractérise par une dénivelée approximative de 30 m sur moins de 500 m (60 m/km), ce qui est considérable comparé aux pentes habituellement rencontrées en amont (1-2 m/km). C'est sans doute à cet endroit que la production de frasil semble avoir été la plus intense et la plus préjudiciable pour le niveau d'eau du lac du Délaiqué.
- Deux lignes de relevés du niveau d'eau ont été documentées dans le réservoir du barrage des Marches-naturelles ainsi que dans son prolongement dans le lac du Délaiqué. La ligne d'eau observée dans le réservoir présente un dénivelé de 3,5 m/km sur les 200 premiers mètres de l'entrée du réservoir des Marches-naturelles (écoulement difficile) et par la suite de 0,3 m/km jusqu'au barrage (écoulement retardé mais sans obstruction majeure). Dans l'axe du Délaiqué (embranchement vers le sud-ouest dans le lac), la pente de la ligne d'eau est également de 0,3 m/km ce qui suggère que l'écoulement s'y effectue de manière préférentielle par rapport au cours principal.
- Le profil longitudinal du fond à l'entrée du réservoir des Marches-naturelles démontre la présence d'un seuil de 6,5 m de haut qui, combiné à la présence massive de glace consolidée et de frasil, obstruent en bonne partie le libre passage du débit. L'origine et la nature de ce seuil sont inconnus. Cependant une ancienne carte montre la présence d'un barrage désaffecté dans le même secteur (*Vachon dam*). Ce seuil représente un facteur significatif potentiellement aggravant pour le refoulement du niveau d'eau dans le lac du Délaiqué.
- *A priori*, écrêter le seuil semble une solution envisageable. Cependant cette éventualité requiert une analyse plus approfondie des conséquences de cette action, notamment, sur la nouvelle dynamique de la glace qui pourrait en résulter vers le réservoir, l'effet sur le niveau d'eau estival dans le lac du Délaiqué et ses conséquences sur les activités récréo-touristiques au Camping municipal, la dynamique sédimentaire au voisinage de l'ouvrage suite à son

arasement et le possible relargage de grandes quantités de sédiments meubles dans le bief d'aval, sans compter les impacts écologiques sur les espèces piscicoles présentes.

- La présence de frasil en grande quantité dans le lac du Délaissé a pour conséquence d'obstruer le cours principal et d'induire un cours d'évitement *via* le tronçon dit Délaissé qui contourne par le sud les îles occupant le centre du lac.
- Il y a peu de chance que l'opération au barrage des Marches-naturelles produise un abaissement significatif du niveau d'eau dans le lac du Délaissé étant donné qu'un dénivelé de 50 cm (par rapport au radier de l'évacuateur) se produit maintenant entre le barrage et l'exutoire du lac comparé à 1 m 50 lors des crues normales du printemps.
- Grâce à des algorithmes de traitement de signal appropriés (ondelettes), l'utilisation du géo-radar, couplée à des données de calibration appropriées, semble efficace pour identifier et mesurer l'épaisseur des différentes couches d'eau, de frasil et de glace présentes sous le couvert en place. Des analyses plus approfondies du signal radar seront requises pour exploiter à leur juste valeur les données collectées, notamment pour le frasil.
- La fluctuation parfois observée du niveau d'eau, typiquement de période diurne, semble liée à l'alternance de production plus intensive de frasil dans le rapide des Trois-Saults, lors de nuits froides et les périodes de répit, voire même de fusion du frasil le jour après un réchauffement des températures extérieures. Il n'a pas été possible de démontrer ce point faute de mesures réalisées sur un cycle diurne propice.

Recommandations : le seuil, apparemment artificiel, découvert à l'entrée du réservoir des Marches-naturelles doit être caractérisé dans le but de mieux comprendre l'influence qu'il peut exercer sur la sévérité des inondations hivernales. Le cas échéant, il faudra prévoir des moyens d'action concrets, incluant son arasement, pour faire en sorte que ce seuil entrave le moins possible l'écoulement des eaux. Cependant, la possibilité non négligeable que l'arasement de ce seuil puisse entraîner des conséquences indésirables pour les autres usages de la ressource, notamment, le récréo-tourisme, l'hydroélectricité et l'écosystème aquatique, très présents dans le lac du Délaissé. Il faudra donc agir avec prudence après que des études appropriées sur les impacts adverses et les propositions d'atténuations aient été réalisées.

COLLABORATEURS

Pour l'Institut national de Recherche scientifique – Centre Eau, Terre et Environnement

Responsables

Normand Bergeron, Ph.D., Professeur

Michel Leclerc, Ph.D., Professeur

Caractérisation sur le terrain et expérimentation du géo-radar

Francis Bérubé, B.Sc., Assistant de recherche

Marc-André Pouliot, B.Sc., Assistant de recherche

Pour le Conseil de bassin de la rivière Montmorency

Coordination des intervenants

Jean Landry, Directeur

Pour les Municipalités

Boischatel

Michel Lefebvre, Secrétaire-trésorier

Arrondissement Beauport

Richard Boily, Directeur

Sainte-Brigitte-de-Laval

N/D

Pour Boralex Énergie Inc.

Yvan Desgagnés

Pour le Centre d'Expertise hydrique du Québec

François Picard, M.Sc.

Pour la Commission géologique du Canada

Équipements géo-radar

Yves Michaud, Ph.D., Chercheur et Professeur associé à l'INRS-ETE

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	ii
1. CONTEXTE ET MANDAT	1
2. MÉTHODOLOGIE DE TERRAIN	3
2.1 Données hydro-météorologiques	3
2.2 Caractérisation terrain et hypothèses sous-jacentes	3
2.3 Localisation des profils de mesure de niveau d'eau	4
2.4 Périodes d'observation	4
2.5 Méthodologie du géo-radar	4
2.6 Impossibilité de manœuvrer les vannes au barrage	5
3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	7
3.1 Relevés météorologiques – Précipitations et températures lors de la débâcle	7
3.2 Relevés hydrologiques	9
3.3 Paramètres connus du déclenchement de débâcles sur la rivière Montmorency	11
3.4 Données sur l'embâcle à la hauteur du secteur des Îlets/Trois-Saults	12
3.5 Relevés météorologiques – Précipitations et températures postérieures à la débâcle	15
3.6 Interprétation des relevés de niveaux d'eau	17
3.7 Méthode d'interprétation des résultats du géo-radar	20
3.8 Interprétation des écoulements dans le lac du Délaiisé	23
3.9 Présence de singularités obstruant l'écoulement	24
4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	27
4.1 Sur la séquence des événements	27
4.2 Interprétation des observations	28
4.3 Découverte d'un seuil important à la sortie du lac du Délaiisé	28
4.4 Distribution des écoulements dans le lac du Délaiisé en cas d'embâcle	28
4.5 Sur l'influence du barrage des Marches-Naturelles	29

4.6	Sur les résultats du géo-radar	29
4.7	Recommandations	29
5.	BIBLIOGRAPHIE	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Zone à l'étude de la rivière Montmorency : lac du Délaissé et réservoir du barrage des Marches-naturelles.....	2
Figure 2 : Localisation des profils de caractérisation des niveaux d'eau	6
Figure 3 : Précipitations horaires à la Forêt Montmorency entre le 22 et le 26 décembre 2004.....	7
Figure 4: Température horaire à la station de la Forêt Montmorency - 22 au 26 décembre 2004 ...	8
Figure 5 : Débit horaire à la station 051001 – 22 au 27 décembre 2004.....	9
Figure 6 : Vue d'ensemble des zones potentielles d'embâcles entre l'Ile-Enchanteresse et le lac du Délaissé- Repères kilométriques (D'après Leclerc <i>et al.</i> 2001)	10
Figure 7 : Murs de cisaillement (dépôts de glace riveraine) dans le secteur des Îlets au maximum du débit – 24-12-2004 11h30.....	14
Figure 8 : Affouillement partiel observable derrière la digue fusible aval du fossé de ceinture....	14
Figure 9 : Chemin d'accès au secteur résidentiel des Îlets inondé le 24 décembre à 10h00.....	15
Figure 10 : Couvert de glace reformé dans le secteur des Îlets/Trois-Saults le 6 janvier 2005.	16
Figure 11: Températures horaires observées à l'aéroport Jean-Lesage dans les semaines postérieures à la débâcle	17
Figure 12 : Résultats de mesure du profil longitudinal (cours principal) – 7 février 2005 – Le référentiel des niveaux n'est pas géoréférencé.....	18
Figure 13: Résultats de mesure du profil longitudinal (cours du bras sud du lac du Délaissé) – 7 février 2005 – Le référentiel des niveaux n'est pas géoréférencé	19
Figure 14 : Exemple de pulsation radar brute captée à la surface du couvert de glace en place...20	
Figure 15 : Géo-radar - Exemple de signal avec traitement	21
Figure 16 : Géo-radar - Résultat de la décomposition du signal	21
Figure 17 : Géo-radar – Exemple de reconstruction de la géométrie verticale et transversale des différentes couches sous le couvert de glace en place.....	22
Figure 18 : Interprétation du passage des écoulements dans le lac du Délaissé suite à la débâcle et l'embâcle du 24 décembre 2004	23
Figure 19 : Profil longitudinal du lit de la rivière à la sortie du lac du Délaissé	24
Figure 20 : Image d'archive du cadastre de Beauport dans le secteur de l'exutoire du lac du Délaissé (Courtoisie d'André Bérubé, CBRM, 2005).....	26

TABLEAU

Tableau 1 : Synthèse des règles décrivant le déclenchement d'une débâcle sur la rivière Montmorency (D'après Doyon <i>et al.</i> 2001; Morse <i>et al.</i> 2002)	13
--	----

1. Contexte et mandat

Suite à la débâcle du 23 décembre 2004 sur la rivière Montmorency, un embâcle temporaire s'est formé à la hauteur du secteur des Îlets suivi immédiatement d'une seconde débâcle qui s'est terminée par un embâcle stable dans le lac du Délaissé (Figure 1) en aval du rapide des Trois-Sauts. La tête de l'embâcle, dont la présence a persisté jusqu'à la publication de ce rapport se prolongeait jusqu'à l'entrée du réservoir des Marches-Naturelles (exutoire du lac du Délaissé). L'obstruction à l'écoulement qui se prolonge dans l'ensemble du lac du Délaissé a causé la submersion de sous-sols de plusieurs résidences (environ huit) et d'un bâtiment municipal (Boischatel) de la rue des Émeraudes en plus d'isoler des propriétés en rive droite du côté de l'Arrondissement de Beauport (bas de la rue Saint-Pierre).

Suite à une rencontre des divers intervenants (Municipalités, Arrondissement de Beauport, Ministère de la Sécurité publique ou MSP, Centre d'Expertise hydrique du Québec ou CEHQ, Boralex Énergie Inc., etc.) tenue le 11 janvier 2005 à l'hôtel-de-ville de Boischatel, et dont le but était de rechercher des solutions possibles à cet aléa, des hypothèses ont été proposées quant aux facteurs physiques susceptibles d'aggraver ou d'atténuer les conséquences de cette situation :

- Rôle et règles d'opération habituelles du barrage des Marches-Naturelles (Boralex Inc.)
- Influence de cette conjoncture sur l'opération de l'ouvrage
- Possibilité d'utiliser le mécanisme d'évacuation de l'ouvrage pour accélérer le passage du débit et abaisser les niveaux d'eau dans le lac du Délaissé
- Influence du seuil dans le lit mineur à l'entrée du bief de la retenue sur le contrôle hydraulique du niveau d'eau dans le lac du Délaissé
- Influence des conditions météorologiques sur la modulation de l'écoulement et du niveau d'eau en relation avec la dynamique du frasil.

Suite à cette rencontre, un mandat a été donné à l'INRS-ETE, afin de conduire une étude portant sur la caractérisation des conditions d'écoulement hivernal dans le lac du Délaissé. Le Conseil de Bassin de la rivière Montmorency (CBRM) s'est vu confier un mandat de coordination des intervenants pour l'étape de réalisation de l'étude sur le terrain. Les Municipalités de Boischatel et de Sainte-Brigitte-de-Laval, l'Arrondissement de Beauport (Ville de Québec) ainsi que la compagnie Boralex Inc. financent l'étude.

Les objectifs de l'étude sont de :

- Documenter la séquence des événements, incluant les conditions hydro-météorologiques génératrices;
- Caractériser la distribution longitudinale du niveau d'eau dans la zone d'intérêt du lac du Délaissé et interpréter les résultats obtenus;

- Identifier les obstructions possibles à l'écoulement et leur nature si possible;
- Examiner la possibilité de remédiation aux inondations *via* l'opération du barrage des Marches-naturelles;
- Tester un géo-radar (prêt de la Commission géologique du Canada CGC-CGQ) pour la caractérisation de la glace dans le bief d'écoulement.



Figure 1 : Zone à l'étude de la rivière Montmorency : lac du Délaissé et réservoir du barrage des Marches-naturelles

2. Méthodologie de terrain

La stratégie de caractérisation a porté sur la plupart des facteurs pouvant influencer la débâcle du couvert de glace de la rivière Montmorency, la formation d'embâcles et l'évolution du niveau d'eau. Parmi ces facteurs, on compte le débit, la météorologie, la distribution de la glace dans les sections d'intérêt (couvert en place, consolidée, frasil), la topographie et la présence de singularités faisant obstacle à l'écoulement ainsi que les ouvrages actuels ou résiduels.

2.1 Données hydro-météorologiques

Les données hydrologiques à la station hydrographique 051001 (Marches-naturelles) ont été fournies par le Centre d'Expertise hydrique du Québec (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs). La requête visait les données horaires pour la période comprise entre le déclenchement la débâcle (depuis le 17 décembre 2004) et la fin de février. Bien que non validées à 100%, ces données peuvent fournir des indications précieuses sur la chronologie des événements déclencheurs et la réponse diurne aux séquences météorologiques favorables à la génération de frasil.

Les données météorologiques (précipitations et températures horaires ont été mises à disposition par Environnement Canada à deux stations : Aéroport de Québec et Forêt Montmorency. La première station est sans doute la plus représentative des conditions météorologiques ayant eu cours dans le sud du bassin (lac du Délaissé) et qui ont influencé les fluctuations dans la production de frasil et l'évolution du niveau d'eau dans ce bief. La station de la Forêt Montmorency indique mieux les conditions ayant prévalu au nord du bassin, soit sa partie montagneuse plus froide, là où se déclenchent normalement les débâcles.

Les données hydrologiques et météorologiques seront présentées et interprétées au chapitre suivant.

2.2 Caractérisation terrain et hypothèses sous-jacentes

L'hypothèse principale de la méthodologie de caractérisation sur le terrain est qu'il est possible en observant le profil longitudinal du niveau d'eau de déterminer les pertes de charge reliées à l'écoulement en fonction de la présence d'éléments qui en retardent le passage comme la présence d'embâcles, l'évolution diurne du frasil, la présence de singularités topographiques importantes et/ou d'ouvrages de retenue. En présence d'obstructions, la pente de la ligne d'eau peut augmenter très significativement, tandis qu'en conditions normales, la pente demeure relativement faible.

Afin de vérifier les hypothèses ainsi identifiées, des caractérisations sommaires du couvert de glace et de la topographie du lit ont été réalisées sur deux lignes de mesures réparties dans le tronçon d'intérêt.

Les instruments mis en œuvre pour cette campagne comprennent :

1. Une station totale Leica TC 307 pour le positionnement sur le terrain
2. Une tarière à glace
3. 2 tiges graduées de 6 m chacune munies d'aboutages pour mesurer l'épaisseur de frasil
4. Un géo-radar et un ordinateur portable

2.3 Localisation des profils de mesure de niveau d'eau

Deux lignes (profils en long) de mesures ont été établies avec comme point d'origine commun le barrage des Marches-naturelles (Boralex), un point de bifurcation à l'amont à l'exutoire du lac du Délaiqué, et deux tracés dans le lac, un vers la sud vers le délaissé, l'autre vers l'ouest vers les Trois-Saults. Les deux profils mesurés sont localisés sur la Figure 2. À l'aval de l'exutoire du lac du Délaiqué, le profil longitudinal se compose de 17 sondages distants en moyenne d'un peu moins de 100 m pour une distance totale de 1500 m, le premier se situant près du barrage des Marches-naturelles. Vers l'amont, soit dans le lac du Délaiqué, deux profils ont fait l'objet de caractérisation, le premier dirigé vers le nord dans l'axe principal d'écoulement de la rivière Montmorency, et le second dirigé vers l'ouest dans l'axe du bras sud du lac du Délaiqué (en direction du Camping municipal de Beauport). Dans les deux cas, 4 sondages ont été réalisés.

2.4 Périodes d'observation

En plus des périodes d'observation relatives à l'hydro-météorologiques comprises entre le 20 décembre et le milieu de février, les observations sur le terrain se sont déroulées en deux temps : une première phase exploratoire les 3-4 février 2005, et une seconde phase qui a permis de détailler les premiers profils obtenus. Seuls les résultats obtenus au cours de cette deuxième phase sont rapportés dans ce document.

2.5 Méthodologie du géo-radar

L'objectif de cette partie de l'étude était d'évaluer l'utilité du géoradar pour l'identification et la caractérisation des accumulations de glace et de frasil sous le couvert de glace en place (non-consolidé).

Le géoradar utilisé est un appareil PulseEKKO 100 de la compagnie Sensors & Software. Cet appareil a été mis gracieusement à la disposition du projet par le chercheur Yves Michaud de la Commission Géologique du Canada – Québec.

Le principe de fonctionnement d'un géoradar repose sur les propriétés différentielles de propagation des ondes électromagnétiques dans les matériaux et fluides. L'appareil émet une onde électromagnétique qui se propage de la surface de la glace vers le lit de la rivière. L'onde traverse alors les différentes couches de matériaux présents (neige, glace, frasil, eau, lit de la

rivière) et, lors de chaque changement de matériaux (interface), une certaine partie de l'onde est réfléchi vers la surface. Le géoradar est muni d'un récepteur qui, placé à la surface de la glace capte et mesure les réflexions de l'onde sur les différents matériaux. L'analyse de ces réflexions permet l'identification ainsi que la distribution verticale (géométrie) des différentes couches de matériaux présents sous le couvert de glace.

Les relevés effectués sur la rivière Montmorency ont été effectués à l'aide de deux fréquences d'émission : l'une de 100 MHz et l'autre de 50 MHz. Lorsque la fréquence d'émission est grande, la résolution spatiale est élevée, mais cela a pour effet de diminuer la pénétration de l'onde dans le substrat mesuré. Une puissance d'émission de 1000 volts a été utilisée afin de générer les ondes.

Le géoradar a été utilisé afin d'effectuer des relevés le long de quelques sections transversales de la rivière. Un relevé mécanique de l'épaisseur des matériaux (neige, glace, frasil, eau) a été effectué parallèlement aux relevés du radar afin de calibrer et de valider l'analyse des relevés.

2.6 Impossibilité de manœuvrer les vannes au barrage

Le protocole de mesure prévoyait de manœuvrer certaines composantes du barrage des Marches-naturelles (vanne de fond, turbines), afin d'en augmenter le débit d'évacuation. L'hypothèse était de vérifier si une telle augmentation de la débitance pourrait favoriser l'abaissement du niveau d'eau dans le bief d'amont et consécutivement dans le lac du Délaiisé. Malheureusement, l'arrêt du fonctionnement des turbines en raison de la présence de glace et de frasil dans la prise d'eau n'ont pas permis d'exécuter les manœuvres prévues au protocole d'analyse. Quant à la vanne de fond, le décret visant le permis d'exploitation de l'ouvrage ne permettait pas son ouverture à des fins d'évacuation en dehors des périodes prévues à cette fin (crues exceptionnelles, printemps), et ce pour cause de conservation des habitats en aval. De plus, on soupçonnait la présence massive de frasil, de glace et possiblement de débris ligneux au fond du réservoir, de telle sorte que l'idée d'ouvrir cette vanne a été abandonnée.

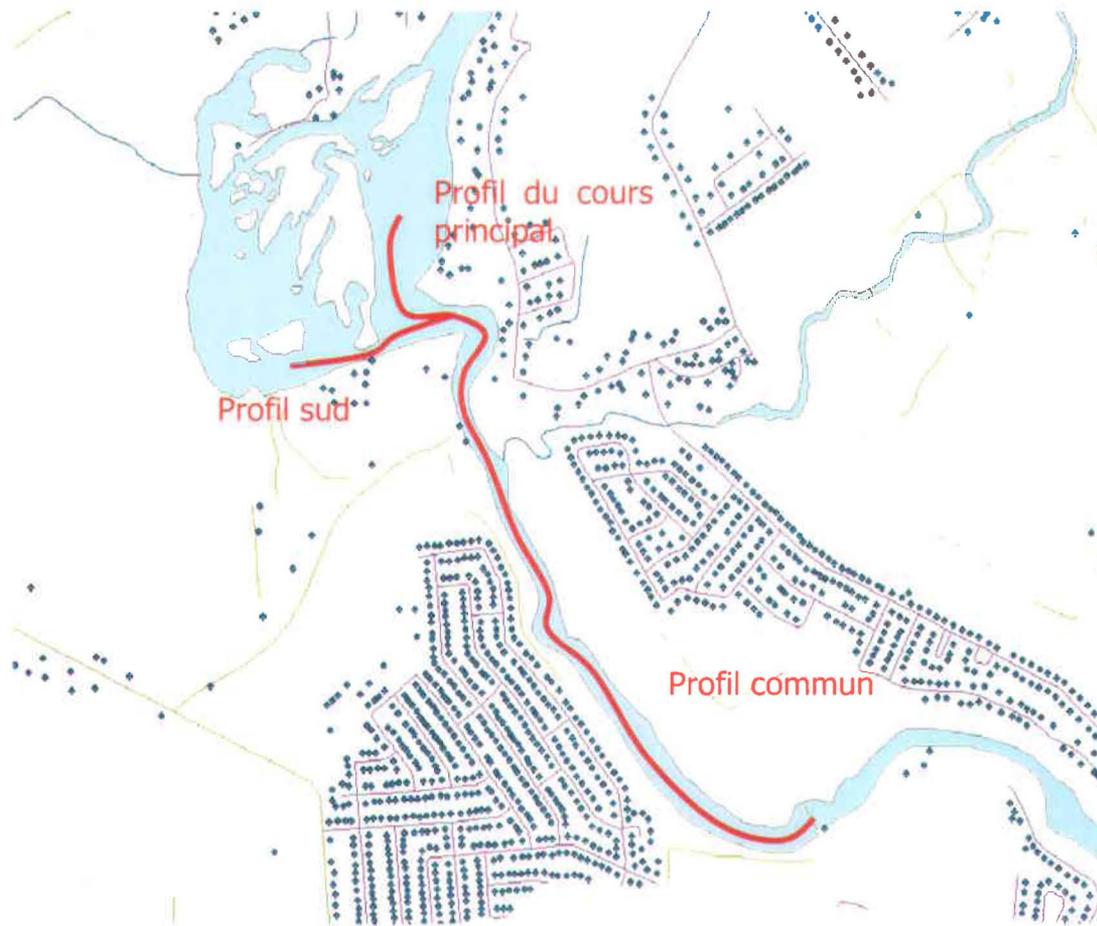


Figure 2 : Localisation des profils de caractérisation des niveaux d'eau

3. Résultats et interprétation

3.1 Relevés météorologiques – Précipitations et températures lors de la débâcle

Les relevés météorologiques à la station de la Forêt Montmorency permettent d'identifier le facteur majeur de déclenchement de la débâcle du 24 décembre. Par sa localisation très loin en amont du bassin, cette station est en effet représentative des conditions prévalant dans la majeure partie du bassin supérieur de la rivière. Les conditions météorologiques qui ont eu cours dans la semaine précédant la débâcle sont représentées à la Figure 3.

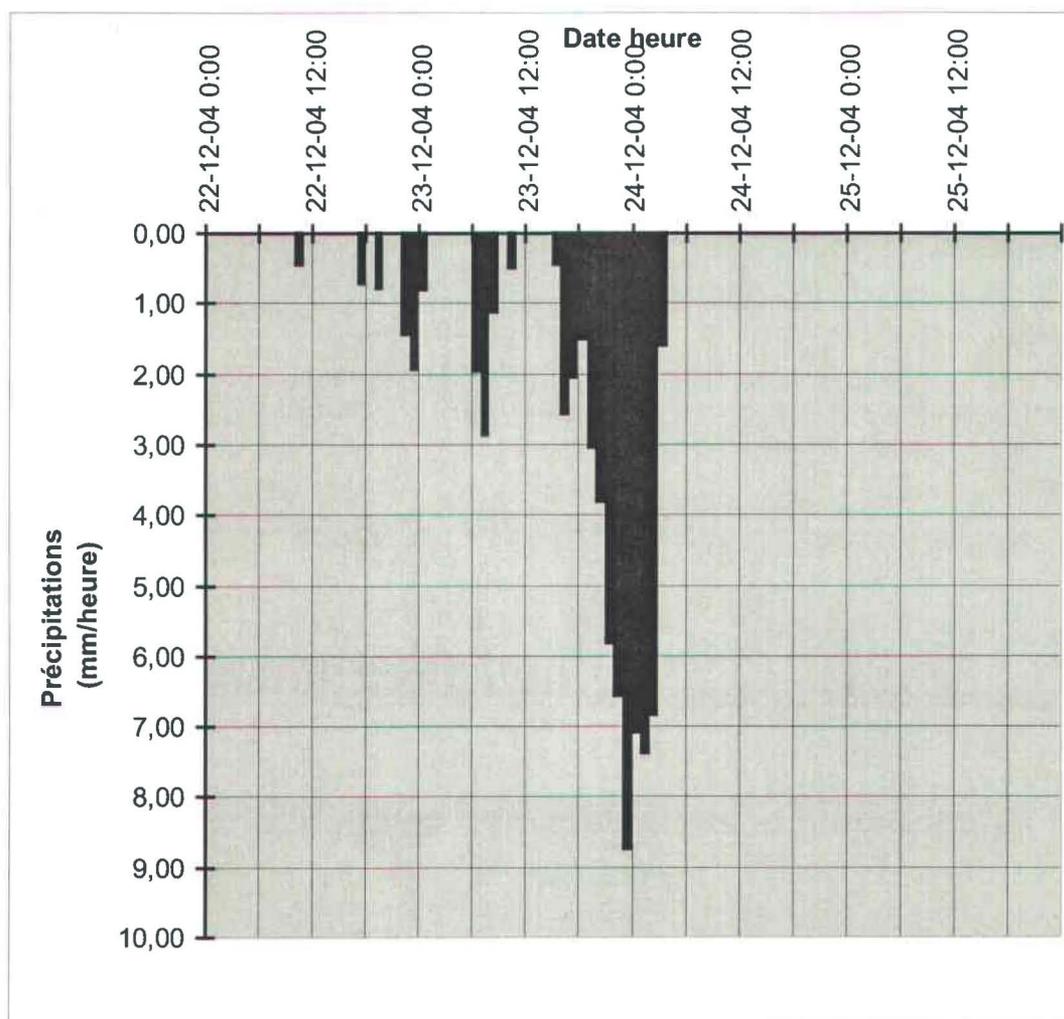


Figure 3 : Précipitations horaires à la Forêt Montmorency entre le 22 et le 26 décembre 2004

Par ailleurs, les conditions de température sont une très bonne indication de la forme qu'ont pu prendre ces précipitations : neige ou pluie. De plus, une température relativement chaude sur une période prolongée est de nature à « mûrir » le stock de neige et produire du ruissellement qui s'ajoute alors à la précipitation qui ne s'infiltré pas. La Figure 4 montre les températures horaires ayant prévalu durant la même période à la tête du bassin versant.

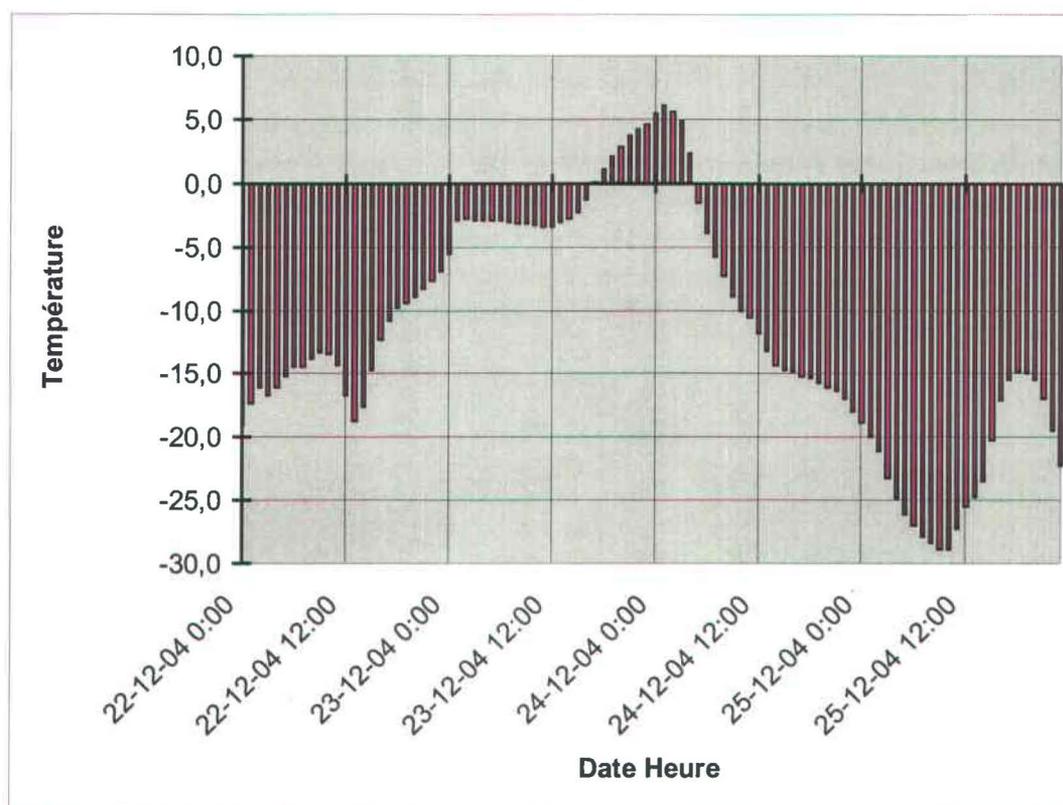


Figure 4: Température horaire à la station de la Forêt Montmorency - 22 au 26 décembre 2004

Il est remarquable de constater que les températures supérieures à 0°C (max. à 6°C) n'ont prévalu que durant une courte période de 11 heures comprise entre le 23 décembre à 18H00 et le 24 décembre à 5H00. C'est au sein de cette fenêtre de température que l'apport de chaleur a pu contribuer à la fonte de neige, du moins au mûrissement du stock présent dans le haut du bassin, ce qui est suffisant pour produire un ruissellement de fonte assez significatif, mais certainement insuffisant à lui seul (durée trop courte) pour occasionner le déclenchement de la débâcle. Par contre, 10 mm de précipitations (environ 10 mm) sont tombées entre le 22 au soir et le 23 au matin sans doute sous forme de neige mouillée, près du stade de mûrissement.

C'est à partir de la soirée du 23 décembre que, si l'on se fie aux températures, la précipitation a commencé à tomber sous forme de pluie au rythme moyen de près de 5 mm/h avec des points à 9 mm/h pour un total de 60 mm après 13 heures. Une telle quantité d'eau ajoutée sans doute à plusieurs millimètres de ruissellement de fonte qui s'écoule sur un sol gelé limitant l'infiltration créent des conditions favorables à l'occurrence d'une crue subite, phénomène très typique de la rivière Montmorency.

3.2 Relevés hydrologiques

Les relevés hydrologiques à la station hydrographique 051001 (Marches-naturelles) permettent de caractériser le facteur débit d'abord lors du déclenchement de la débâcle le 24 décembre 2004. La Figure 5 montre l'hydrogramme horaire à la station hydrométrique située à l'embouchure de la rivière. On constate que le maximum a été atteint vers 11h00 le 24, soit près de 12 heures après le pic de précipitation (9 mm) enregistré à 23h00 le 23 au soir. Ce décalage de 12 heures est vraiment typique du temps de concentration des écoulements superficiels sur la Montmorency.

Du point de vue de la débâcle, il est intéressant de déterminer la période précise où a pu être déclenchée la débâcle car cette donnée indique le débit qui a été nécessaire pour ce faire. Dans le même ordre d'idée, on peut aussi déterminer la débit qui a permis d'évacuer la glace sur l'ensemble du parcours du décrochement jusqu'au lac du Délaissé.

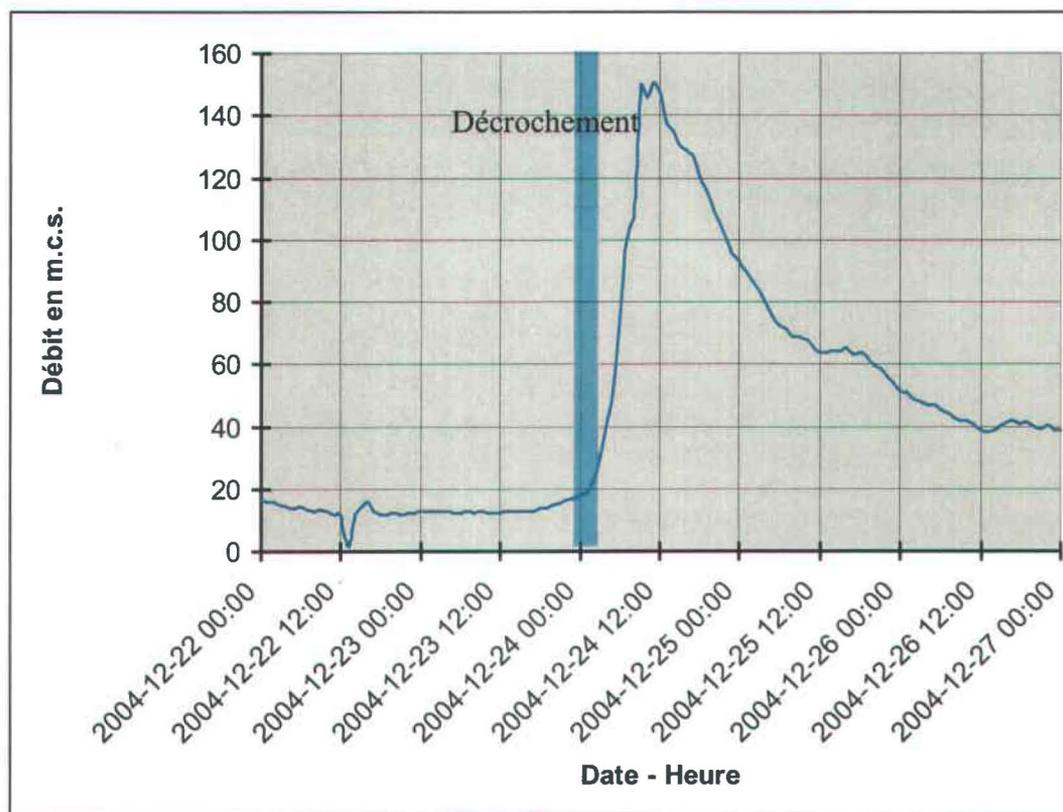


Figure 5 : Débit horaire à la station 051001 – 22 au 27 décembre 2004

D'après les témoignages de résidents, un embâcle temporaire s'était formé vers 1h00 le 24 au matin à la hauteur du secteur des Îlets/Trois-Saults, à 5 km de la station 051001. L'accumulation de glace est restée sur place pendant 2-3 heures avant de décrocher à nouveau vers le lac du Délaissé. Normalement, la débâcle hivernale sur la rivière Montmorency provient d'un décrochement du couvert de glace à la hauteur du km 35, distance mesurée depuis l'embouchure, soit un tiers de la longueur totale du cours d'eau. En transposant en durée de transfert de la glace laquelle accompagne normalement l'onde de crue (environ 110 km en 12 heures), on peut

compter 4 heures environ entre le moment du décrochement au point le plus éloigné (km35) et l'arrivée de la glace à la hauteur du secteur des Îlets (km 5). Le premier décrochement se serait donc produit pour l'ensemble du tronçon entre le km 35 et le km 5 entre 23h00 le soir du 23 décembre et 3h00 le 24, soit en moyenne à 21h00 le 23 (voir la Figure 6).

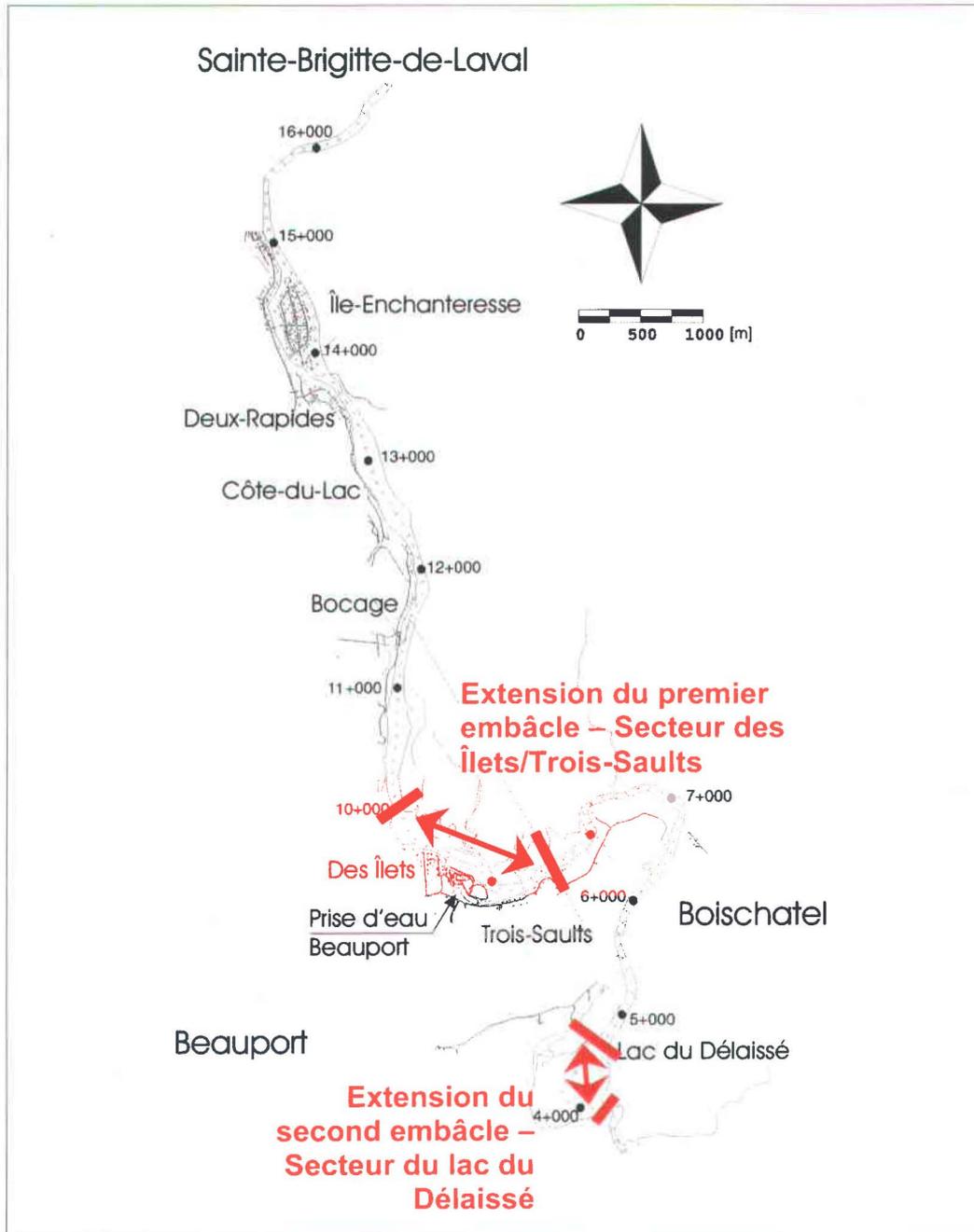


Figure 6 : Vue d'ensemble des zones d'embâcles entre l'Île-Enchanteresse et le lac du Délaiissé en décembre 2004 - Repères kilométriques (D'après Leclerc et al. 2001)

Pour déduire le *débit déclencheur de la débâcle*, lequel est observé avec un délai à la station, il faut appliquer le décalage de 4 heures à la série observée. De plus, plus on remonte en amont du bassin, plus la superficie contribuant au ruissellement diminue. À la hauteur du km 35, assumons que le bassin versant est réduit d'un tiers. Pour déterminer le débit, il faut d'abord se décaler sur la série hydrologique d'une durée équivalente au temps de transfert de l'onde, soit 4 heures approximativement. Si le décrochement s'est produit entre 23h00 le soir du 23 décembre et 3h00 le 24, alors le débit à la station variait entre 30 et 80 m³/s. Transposé au km 35, on a une fourchette de débit déclencheur comprise entre 20 et 57 m³/s au km 35.

Quant au *débit évacuateur de la débâcle*¹, il peut être estimé inférieur au 150 m³/s atteint en pointe vers 11h00, la journée du 24 décembre. Il faut immédiatement mentionner que la notion de débit évacuateur est relativement nouvelle, sa première mention ayant été faite dans Morse *et al.* (2002), qui l'avaient estimé voisin de 200 m³/s pour la Montmorency. Par contre, l'épaisseur du couvert de glace, son état de mûrissement et d'autres facteurs morphologiques et/ou hydrométéorologiques peuvent influencer cette valeur en hausse ou à la baisse. Dans le cas présent, le premier débit estimé (entre 20 et 57 m³/s) permet de déterminer le débit déclencheur mais on sait que la glace n'a pas dévalé jusqu'au lac du Délaié et qu'elle s'est arrêtée à la hauteur du secteur des Îlets. C'est trois heures plus tard que l'évacuation complète s'est faite. À cette hauteur, la taille du bassin est réduite de 6% par rapport à la station de mesure. Donc, à 10h00 du matin à la station (compte tenu du décalage de la série), le débit était rendu à 140 m³/s (94% de 150 m³/s à la station), soit tout prêt du maximum observé. Par contre, ce débit est sans doute surévalué étant donné que cette nouvelle débâcle a sans doute été accompagnée du relâchement d'une bonne quantité d'eau accumulée en amont de l'embâcle.

En résumé, le débit déclencheur de la débâcle à partir du km 35 est estimé entre 20 et 57 m³/s à cette hauteur du réseau hydrographique. Le débit évacuateur à la hauteur du secteur des Îlets est estimé au maximum à 140 m³/s pour cet événement.

Une autre donnée intéressante est constituée par la lame d'eau équivalente ayant ruisselé pendant la débâcle. En assumant que le débit moyen pendant les 24 heures suivant la montée de la crue s'établit autour de 90 m³/s, le volume d'eau correspondant est de 90 m³/s x 86400 s, soit 77760 m³. La superficie du bassin étant de 1100 km², la lame d'eau moyenne ruisselée s'établit à 7,1 mm, ce qui est peu en comparaison du 60 mm tombé (12%). On en déduit que le reste de la précipitation liquide a congelé dans le stock de neige en place et qu'une partie seulement a pu faire son chemin vers le réseau hydrographique.

3.3 Paramètres connus du déclenchement de débâcles sur la rivière Montmorency

Dans le cadre d'un mandat réalisé par Morse *et al.* (2002), B. Doyon (2001) (maintenant à l'emploi d'Environnement Canada, Service météorologique du Canada) a analysé les conditions

¹ Le débit évacuateur est celui qui permet d'acheminer toute la glace en débâcle sur la rivière vers son embouchure, laquelle à cause de la présence d'un ouvrage de retenue peut difficilement franchir le lac du Délaié. C'est donc le débit évacuateur jusqu'au lac du Délaié qui est déterminé ici.

hydrométéorologiques prévalant lors des débâcles de la rivière Montmorency. Il a été considéré utile d'en rappeler les principales conclusions. L'une des questions auxquelles il devait 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, 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 peu de données permettent de corroborer ce qui est avancé ci-après, Morse *et al.* (2002) sont 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 évacuateur 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 de déclenchement de la débâcle, donc menant au soulèvement puis au morcellement du couvert. L'analyse conduite par Doyon (2001) a conduit (Tableau 1) à 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.

Quand on confronte les données hydro-météorologiques observées en décembre 2004 à cette grille de décision, on constate que les conditions d'alertes étaient déjà réunies dès la soirée du 23 décembre 2004 avec des précipitations liquides cumulatives de 27 mm à 11h00 qui se sont poursuivies dans les heures suivantes jusqu'à atteindre 60 mm. Il est remarquable ici de constater qu'à cause du délai de réponse de 12 heures du débit, la réponse hydrologique n'a montré aucun signe précurseur de débâcle et on ne peut se fier à cette information pour déclencher l'alerte. De même, l'accumulation de degrés-jours et l'indicateur de température maximale horaire qui serait indicatives d'une fonte hâtive n'auraient pas été suffisants pour déclencher l'alerte précoce.

3.4 Données sur l'embâcle à la hauteur du secteur des Îlets/Trois-Saults

Selon les témoignages de riverains, l'embâcle transitoire dans le secteur des Îlets/Trois-Saults a duré 2-3 heures environ entre 1h00 et 3-4h00 du matin le 24. La tête de l'embâcle était localisée



Figure 7 : Murs de cisaillement (dépôts de glace riveraine) dans le secteur des Îlets au maximum du débit – 24-12-2004 11h30



Figure 8 : Affouillement partiel observable derrière la digue fusible aval du fossé de ceinture

Il est également à noter que la présence de digues fusibles au pourtour du fossé de ceinture et leur résistance à l'érosion due au gel de leur matériaux constitutifs ont pu prolonger l'effet de

submersion observé dans les points bas du secteur résidentiel des Îlets lors des jours qui ont suivi la débâcle dans le secteur des Îlets/Trois-Saults. Cependant, la submersion de ce secteur se serait quant même produite étant donné les niveaux d'eau atteints dans la rivière. Dans ce cas de figure bien connu, le cours de la rivière s'épanche dans ses bras secondaires, dont le Rigolet, qui contourne par l'arrière les secteur résidentiel, fait partie. Si les digues fusibles avaient subi une érosion complète, naturelle ou provoquée par les opérateurs de la station, le Rigolet et le fossé de ceinture se seraient drainés beaucoup plus rapidement (en quelques heures), redonnant aussitôt accès aux résidents. La Figure 9 montre un des chemins d'accès au secteur résidentiel des Îlets encore submergé le matin du 24 décembre à 10h00. La cote de submersion correspond à celle du périmètre des bassins de captation de la station des Îlets et des digues fusibles du fossé de ceinture.

3.5 Relevés météorologiques – Précipitations et températures postérieures à la débâcle

Les conditions météorologiques enregistrées dans les semaines qui ont suivi la débâcle sont caractéristiques de temps froid propice à la production de frasil, mais aussi à la formation d'un nouveau couvert de glace. La Figure 10 montre le couvert de glace nouvellement formé le 6 janvier 2005 dans le secteur de la prise d'eau. On y observe, d'après la texture du couvert, la présence massive de frasil apporté de l'amont par le courant.



Figure 9 : Chemin d'accès au secteur résidentiel des Îlets inondé le 24 décembre à 10h00



Figure 10 : Couvert de glace reformé dans le secteur des Îlets/Trois-Saults le 6 janvier 2005.

La Figure 11 montre la séquence des températures horaires observées à l'aéroport Jean-Lesage. Ce site a été retenu à cause de ses similarités de position par rapport aux phénomènes météorologiques observés à la hauteur de Boischatel/Beauport. On constate rapidement que le mercure s'est maintenu quasi systématiquement sous les -10°C avec des minimums la nuit de -20°C dans la première semaine suivant la débâcle. Après une période d'accalmie de deux semaines au début de janvier, le froid intense s'est installé avec des minimums la nuit frôlant les -30°C , période extrêmement propice à la production massive de frasil dans les rapides des Trois-Saults.

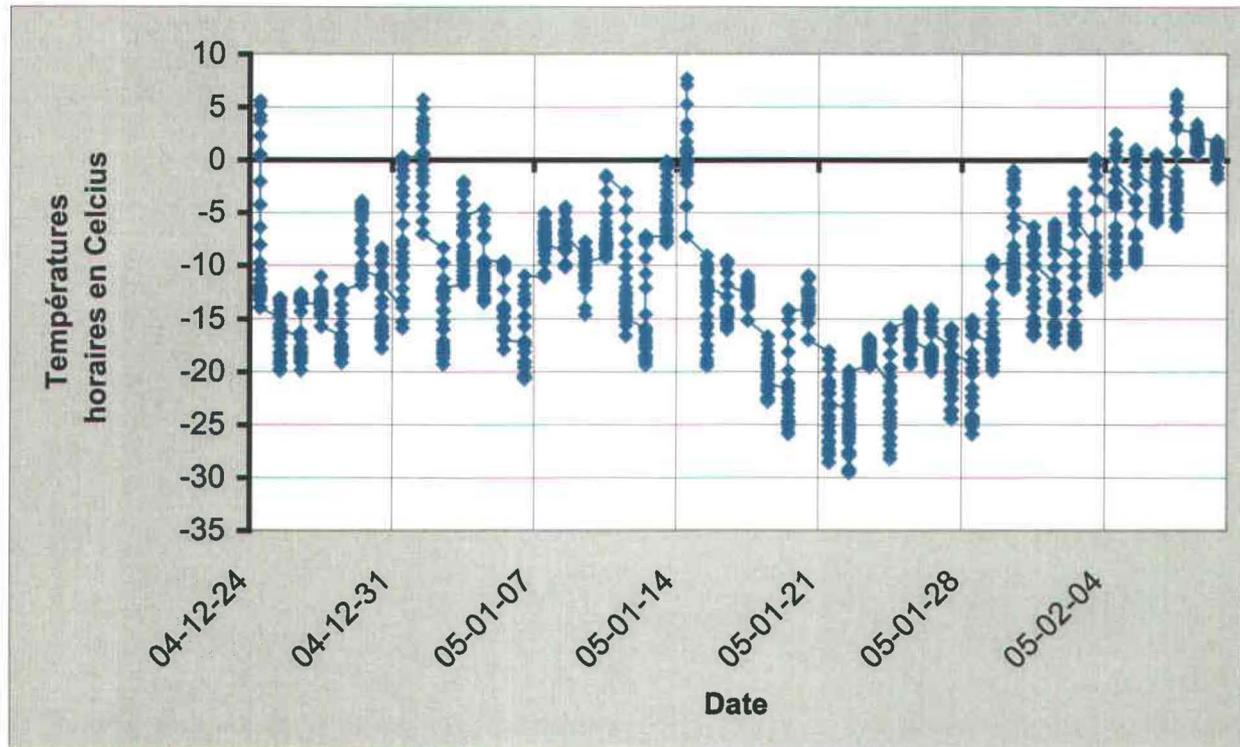


Figure 11: Températures horaires observées à l'aéroport Jean-Lesage dans les semaines postérieures à la débâcle

Si le couvert de glace a pu se reformer assez rapidement dans les zones de courant relativement lentes de la rivière (secteur des Îlets), il est en effet peu probable qu'il en fut autant dans le rapide des Trois-Sauts dont le dénivelée est si important qu'il a dû se maintenir à l'eau libre pour une période beaucoup plus longue. La difficulté d'accès au site en hiver ne nous a pas permis de documenter ce postulat. La conséquence est une production massive et prolongée de frazil qui a vite envahi les volumes encore disponibles dans le lac du Délaissé, déjà rempli des blocs de glace apportés par la débâcle du 24 décembre 2004. Ce constat est primordial pour expliquer les niveaux d'eau élevés observés par la suite dans le lac.

3.6 Interprétation des relevés de niveaux d'eau

La Figure 12 et la Figure 13 montrent respectivement les niveaux d'eau (repère vertical relatif) observés sur les profils tracés à la Figure 2, page 6, le 7 février 2005. L'intérêt de ces profils n'est pas tant le niveau absolu atteint, important pour expliquer la submersion des quartiers résidentiels voisins, mais la pente de ces profils qui révèle les endroits où l'écoulement s'effectue plus difficilement (pertes de charge singulières)

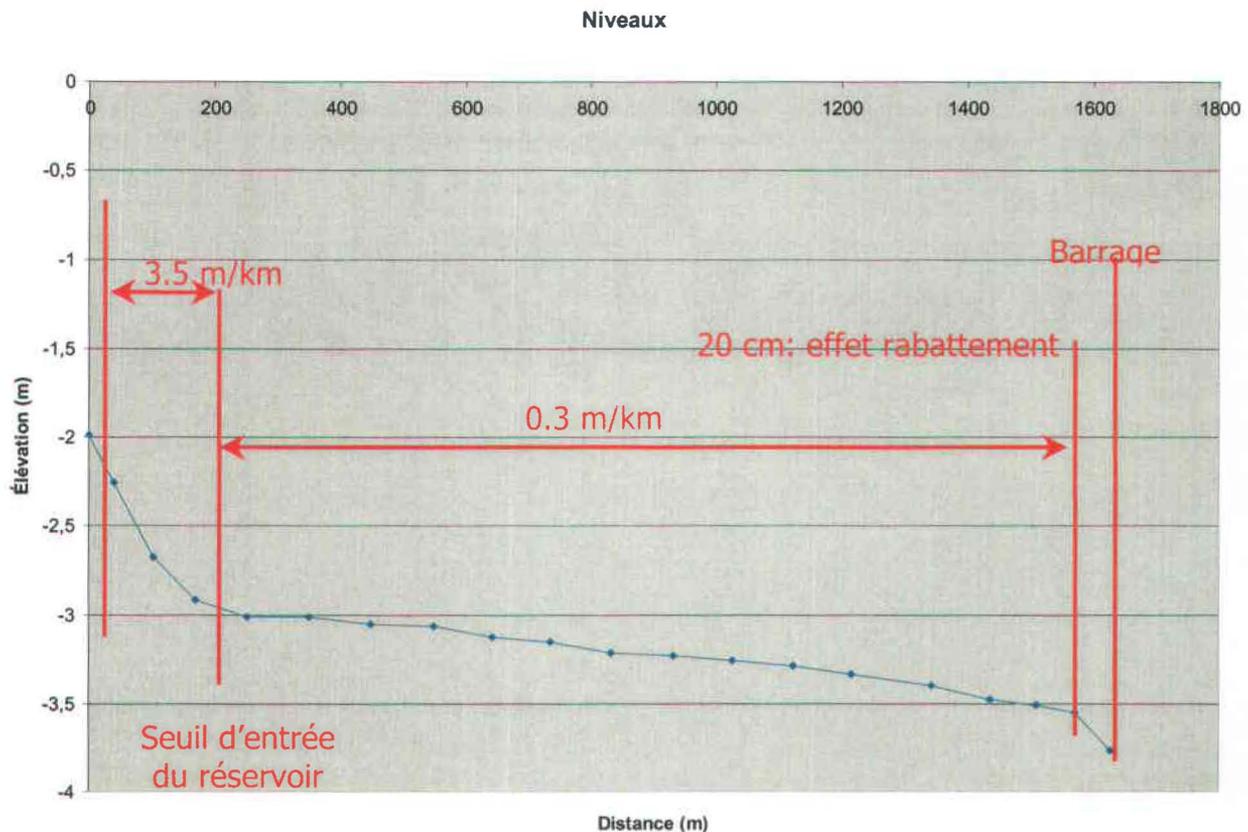


Figure 12 : Résultats de mesure du profil longitudinal (cours principal) – 7 février 2005 – Le référentiel des niveaux n'est pas géoréférencé

Ainsi sur la première figure, trois segments distincts apparaissent : le premier près du barrage, le second caractérisant le bief de la retenue du barrage, et le troisième prenant son origine près de l'exutoire du lac du Délaissé. Ces résultats seront présentés et discutés successivement ci-après.

Dans le segment près du barrage, on peut s'interroger sur la cause du rabattement observé de 20 cm typiquement. Notre interprétation est la suivante : selon les personnes responsables de l'opération de l'ouvrage (Boralex Énergie Inc.), aucun turbinage n'était en cours à ce moment mais un certain débit transitait par la prise d'eau menant aux turbines, les vannes de fermeture étant demeuré partiellement ouvertes. En supposant que l'ensemble du réservoir était rempli soit de glace ou de frasil (ou les deux), on tiendrait l'explication du rabattement observé qui ressemble à celui qui se produit autour de puits de pompage en milieu poreux. Cette explication n'a cependant que valeur d'hypothèse.

Concernant le segment amont couvrant l'ensemble de la retenue du barrage, on y observe une pente générale d'environ 30 cm/km ce qui n'est sans doute pas beaucoup plus élevée qu'en condition à l'eau libre étant donné les faibles vitesses d'écoulement et la grande profondeur qu'on y observe alors. De plus, près du barrage, le niveau d'eau absolu atteint est relativement à niveau avec la cote du déversoir latéral du barrage et n'a rien de comparable avec les niveaux maximums atteints en période de crues de printemps. Cette interprétation permet de disculper le barrage des Marches-Naturelles pour les hauts niveaux d'eau atteints dans le lac du Délaissé suite à la débâcle. Enfin, on note un redressement assez significatif de la pente sur 300 m à

l'amont de la retenue ce qui suggère que l'écoulement s'y produit assez librement et que l'accumulation de glace/frasil devient plus dense à l'aval de ce point.

Concernant le dernier segment de profil près et à l'amont de l'exutoire du lac, on y observe sur une distance minimale de 200 m (et sans doute plus) une pente d'environ 350 cm/km ce qui est près de 12 fois plus que dans la retenue. Cette observation suggère la présence massive de glace à partir de ce point (le pied de l'embâcle), et possiblement la présence aussi de singularités morphologiques naturelles et/ou artificielles qui feraient obstruction majeure au passage de l'eau. Nous reviendrons sur ce point plus loin car cette hypothèse s'est trouvée confirmée par les observations sommaires relatives à la topographie du secteur (voir la section 3.9, page 24).

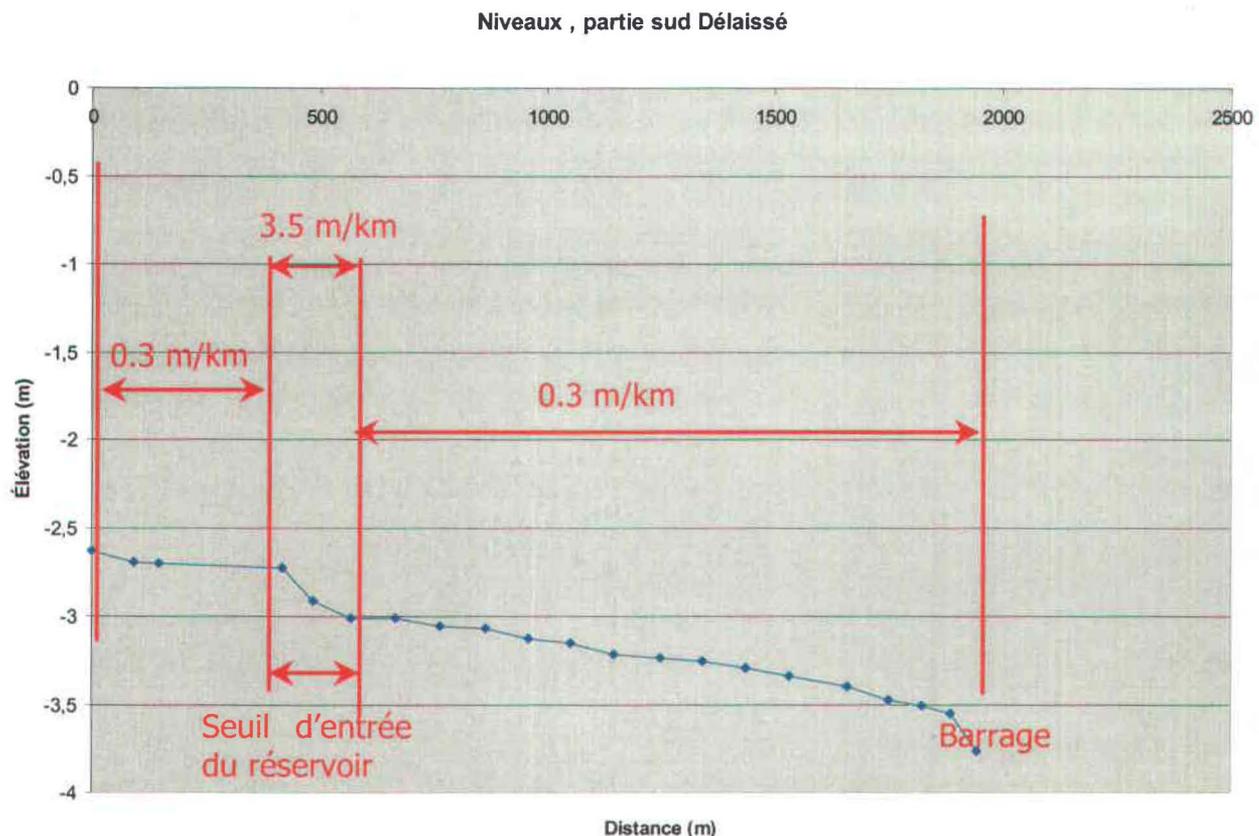


Figure 13: Résultats de mesure du profil longitudinal (cours du bras sud du lac du Délaissé) – 7 février 2005 – Le référentiel des niveaux n'est pas géoréférencé

La Figure 13 montre les profils de niveau d'eau équivalent observé dans l'axe du Délaissé (direction sud à partir de l'exutoire). On y observe les mêmes tendances générales sauf dans la partie amont du profil qui montre un redressement très significatif de la pente, semblable à celui observé dans la retenue des Marches-Naturelles (30 cm/km). De telles valeurs suggèrent que l'obstruction à l'écoulement n'y est pas suffisante pour créer des pertes de charge importantes et donc que l'écoulement s'y produit assez facilement

3.7 Méthode d'interprétation des résultats du géo-radar

La section suivante présente la méthode d'interprétation qui a été mise au point pour interpréter le signal brut capté par les récepteurs du géo-radar afin de faire ressortir la nature et l'épaisseur des diverses couches présentes sous le couvert de glace en place.

La Figure 14 montre la forme brute d'une onde de 50 mégahertz captée à la surface de la rivière.

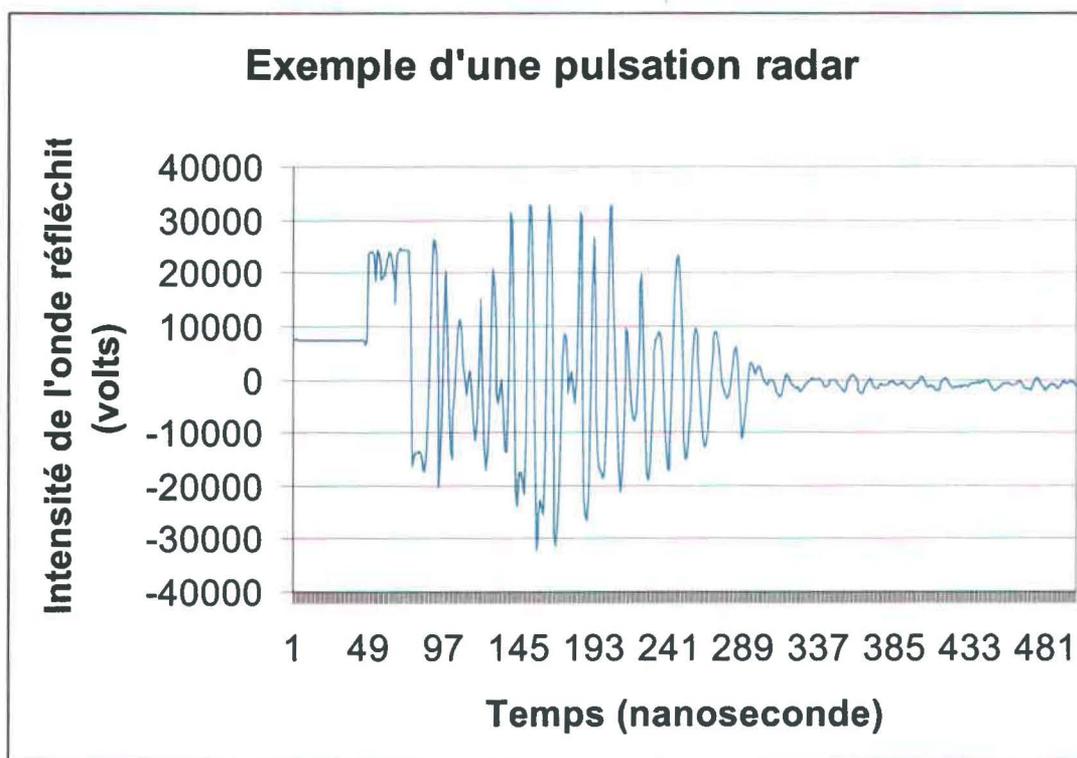


Figure 14 : Exemple de pulsation radar brute captée à la surface du couvert de glace en place

En se propageant dans les différents milieux, l'onde électromagnétique subit une atténuation. Une amplification exponentielle (AEG) du signal a été effectuée afin de corriger cette atténuation.

Afin d'identifier les différents interfaces, les signaux du radar ont été traités à l'aide d'*ondelettes* (*wavelets*). Les données ont été décomposées à l'aide d'une ondelette Daubechies 1 de niveau 1. Les détails de la décomposition ont été amplifiés et ensuite filtrés. Ce filtrage a pour objectif l'identification des perturbations associées aux changements de milieux. La Figure 15 et la Figure 16 présentent une onde avant et après la décomposition du signal.

Signal avant décomposition

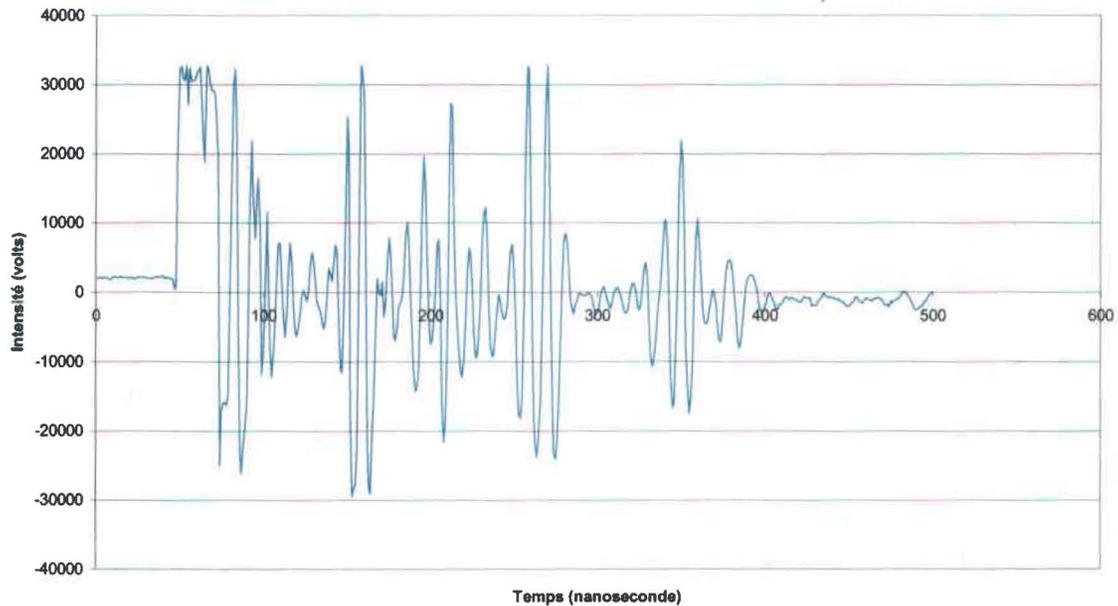


Figure 15 : Géo-radar - Exemple de signal avec traitement

Détails de la décomposition par ondelettes

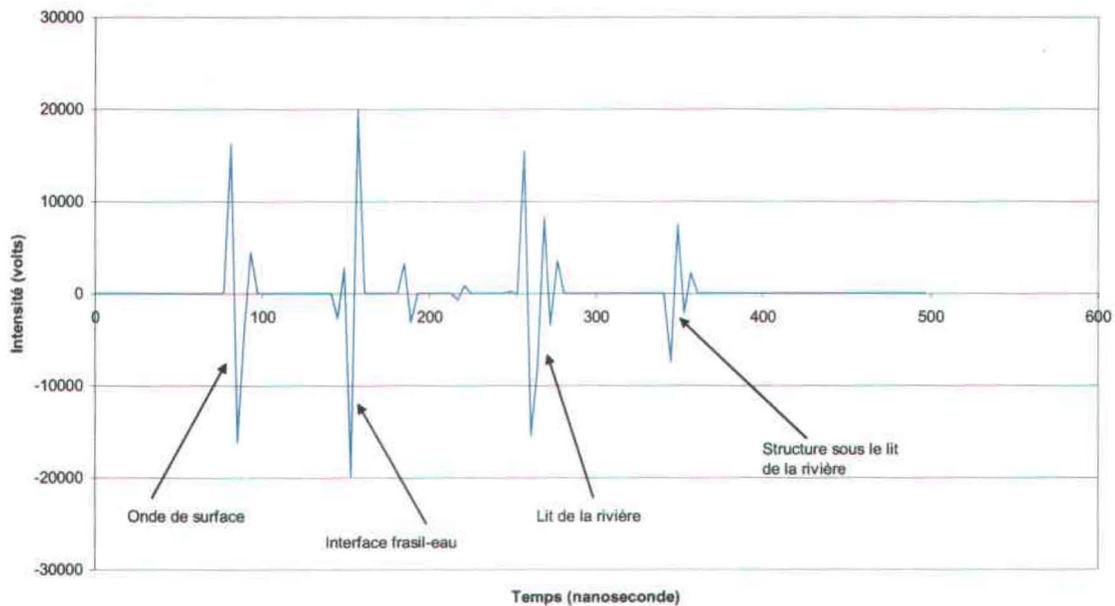


Figure 16 : Géo-radar - Résultat de la décomposition du signal

La décomposition du signal par ondelettes et l'isolation des détails ne permettent pas l'identification de l'interface entre la glace et le frazil; par contre, cet interface possède une signature claire dans le signal avant traitement.

Il est à noter que l'appareil retourne une lecture temporelle qui reflète les temps de propagation du signal et non l'épaisseur des couches de matériaux. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer des vitesses de propagation selon les divers matériaux présents, lesquelles peuvent être obtenues par calibration sur des mesures. À l'aide des points de calibration mesurés sur le terrain ainsi que des relevés CMT effectués avec le radar, la *permittivité* des différents matériaux a été évaluée. La connaissance de cette variable a permis de calculer la vitesse de l'onde radar dans la glace et le frasil. La connaissance des vitesses de propagation a ainsi permis de convertir l'échelle temporelle en dimensions spatiales réelles.

La Figure 17 montre une reconstruction spatiale des différents matériaux présents sur un transect. Les relevés ont été effectués avec une fréquence de 50 Mhz, une séparation des antennes de 2 m et un pas de 50 cm. À titre de comparaison, les points de contrôle mesurés mécaniquement sont représentés sur le schéma. Les épaisseurs de frasil estimées à l'aide du radar ont une précision moyenne de 34 cm par rapport aux épaisseurs mesurées mécaniquement.

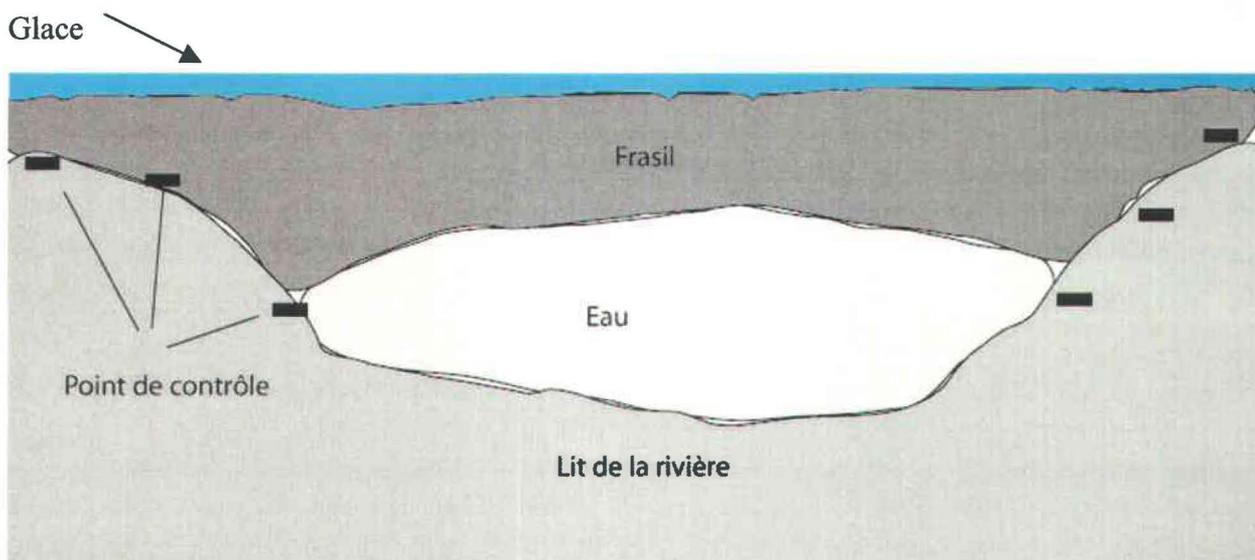


Figure 17 : Géoradar – Exemple de reconstruction de la géométrie verticale et transversale des différentes couches sous le couvert de glace en place

L'utilisation des antennes de 100 Mhz n'a pas permis l'identification de la géométrie des différents matériaux. La plus faible pénétration de ces ondes électromagnétiques dans le frasil peut expliquer ce résultat.

Les essais effectués sont encourageants car ceux-ci ont démontré qu'il est possible d'utiliser le géoradar afin d'identifier et de caractériser les accumulations de frasil sous le couvert de glace. Afin d'augmenter la précision des mesures d'épaisseur de frasil, des tests devront cependant être effectués afin de mieux caractériser la propagation des ondes électromagnétiques dans ce substrat. En effet, bien que le comportement des ondes électromagnétiques dans la glace et dans l'eau soit bien connu, il existe un manque de connaissances concernant les propriétés électromagnétiques du frasil.

3.8 Interprétation des écoulements dans le lac du Délaiqué

Compte tenu des divers processus ayant cours dans le lac du Délaiqué en situation d'embâcle majeur accompagné de production de frasil. Il est possible d'interpréter le passage des écoulements de la manière suivante représentée à la Figure 18.

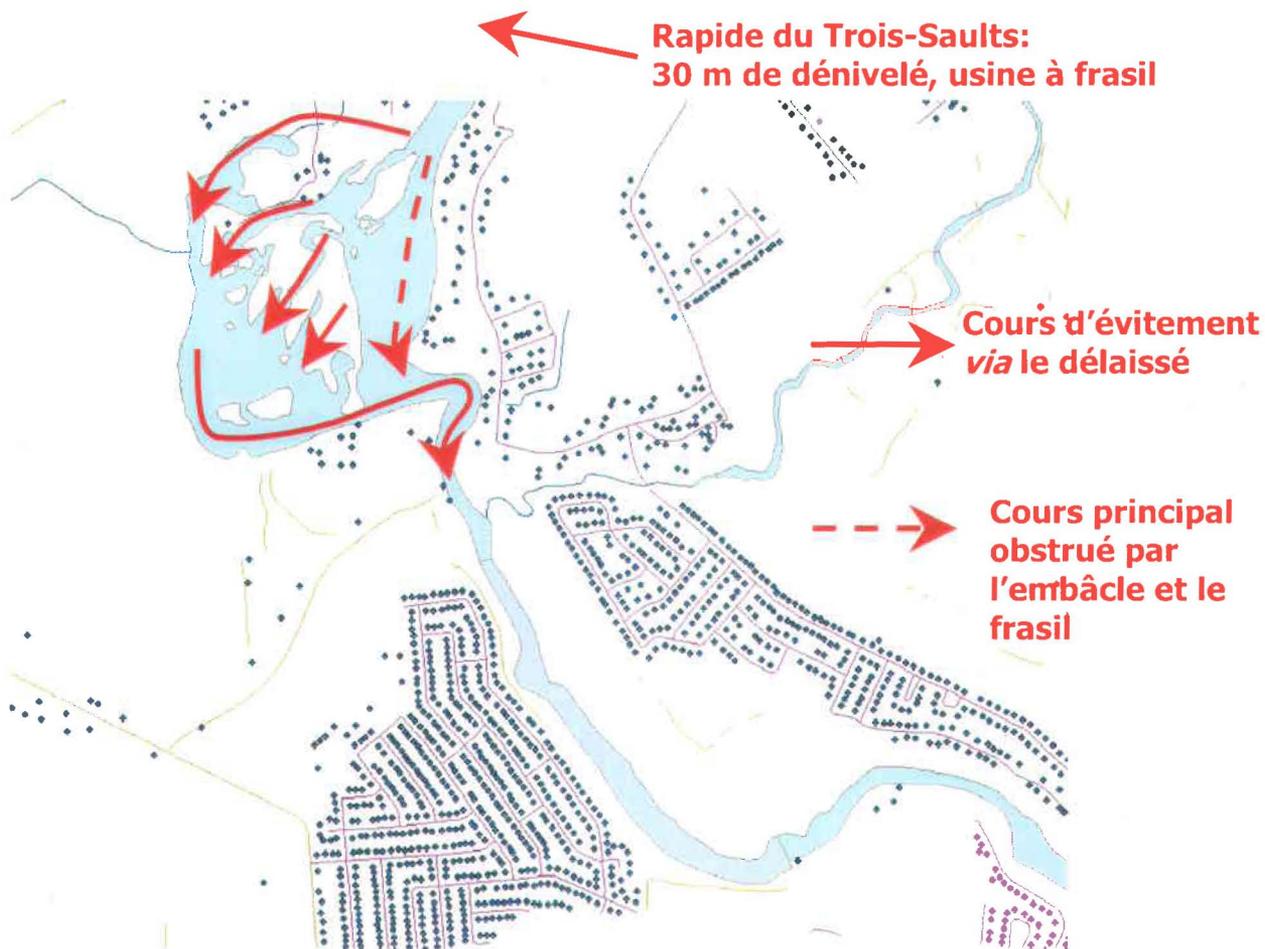


Figure 18 : Interprétation du passage des écoulements dans le lac du Délaiqué suite à la débâcle et l'embâcle du 24 décembre 2004

Le niveau d'eau se trouvant soulevé massivement dans le cours principal situé du côté est de la rivière, il se produit un redirection générale de la pente d'écoulement vers le sud-est où se trouve le délaissé, c'est-à-dire, un bras secondaire de la rivière dont la fonction est de servir de trop-plein en de telles situations. D'ailleurs, la morphologie particulière du relief des Îles indique clairement l'existence de plusieurs passages généralement orientés dans la direction sud-est. Étant donné l'étroitesse de ces passages et l'existence d'un couvert végétal assez dense sur ces îles, il est fort probable qu'elles ont servi à retenir les glaces en dévalaison, elles-mêmes retenant le frasil produit massivement par les Trois Sauts.

3.9 Présence de singularités obstruant l'écoulement

Revenons sur le point concernant le profil de la ligne d'eau très abrupt à la sortie du lac du Délaissé. Les relevés sommaires² de la bathymétrie effectués avec des perches graduées à la sortie du lac du Délaissé ont permis de mettre en évidence un relèvement très important du lit de la rivière à cet endroit. La Figure 19 montre les résultats des relevés effectués. L'analyse de ce profil montre qu'une dénivellation de 6 m est présente à l'amont de ce relèvement tandis qu'à l'aval, la différence de topographie atteint 7,5 m.

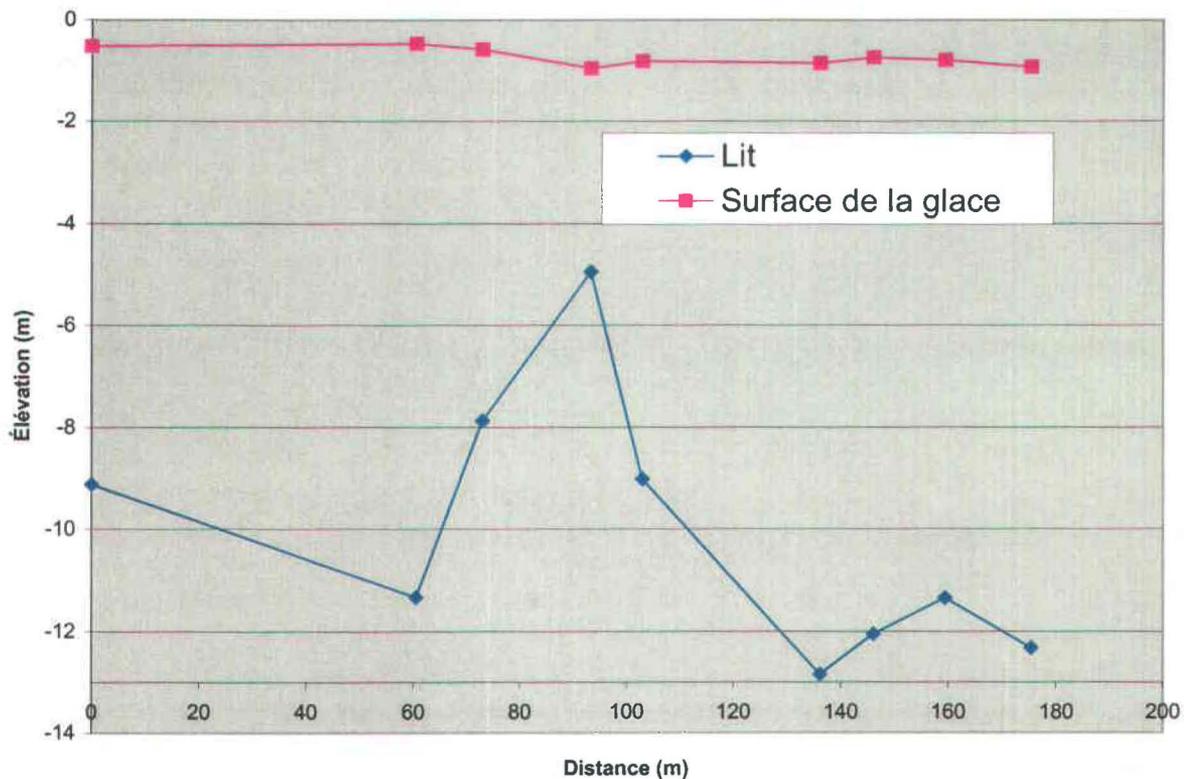


Figure 19 : Profil longitudinal du lit de la rivière à la sortie du lac du Délaissé

Cette morphologie est-elle présente uniformément dans l'ensemble de la section transversale? Les relevés ne permettent pas de l'affirmer. Toutefois, il semble selon certaines indications que non car, lors des relevés de niveau d'eau effectués sur des points secondaires (non rapportés) en rive gauche, de forts courants ont été identifiés sur une grande profondeur dans les trous de forage effectués, comme si l'écoulement forçait son passage à côté du relèvement de profil observé.

² Des relevés précis, à l'échosondeur par exemple, étaient impossibles à réaliser dans les conditions de glace du moment.

S'agit-il d'un seuil naturel ou d'une structure artificielle désaffectée et abandonnée? Difficile à répondre avec les données disponibles. La largeur de cette forme dans le sens longitudinal atteint près de 50 m, ce qui semble beaucoup pour une structure aménagée. Par contre, il pourrait s'agir d'une structure artificielle qui, par sa présence massive, a pu agir sur la dynamique sédimentologique (alluvionnaire) en favorisant la déposition des matériaux de toutes tailles dévalant la rivière en crue ou transportés par la glace (action du glacial). Dans ce cas, la forme apparaîtrait beaucoup plus irrégulière, un peu comme le profil observé.

Des recherches ont donc été réalisées dans les archives anciennes du cadastre dans le secteur (André Bérubé, CBRM; communication personnelle) afin d'identifier des activités anthropiques ayant pu nécessiter autrefois la construction d'une structure en rivière (barrage, estacade, piliers, par exemple). On peut observer sur la Figure 20 la présence d'un ouvrage ancien appelé *Vachon Dam* dont la position cependant ne serait pas exactement représentée sur la carte. Dans l'état actuel de nos connaissances et des données disponibles, on ne peut que spéculer sur l'état de cet ouvrage, ou de ce qu'il en reste s'il fut démantelé. Son usage semble avoir été en rapport étroit avec les opérations forestières très intenses sur le bassin de la Montmorency, notamment à l'époque de la drave qui a perduré jusque dans les années 50', voire 60'. Cet ouvrage correspond-il à la présence du seuil identifiée? C'est aussi une question qui demeure sans réponse pour l'instant.

A priori, écrêter ce seuil peut sembler une solution envisageable. En effet, si la structure identifiée, naturelle ou artificielle, occasionne des impacts significatifs sur les niveaux d'eau en amont et la formation d'embâcles, son écrêtement est donc à envisager. Cependant, cette éventualité requiert une caractérisation plus poussée et une analyse plus approfondie des conséquences de cette action, notamment, sur la nouvelle dynamique de la glace qui pourrait en résulter vers le réservoir, l'effet sur le niveau d'eau estival dans le lac du Délaissé et ses conséquences sur les activités récréo-touristiques au Camping municipal, la dynamique sédimentaire au voisinage de l'ouvrage suite à son arasement et le possible relargage de grandes quantités de sédiments meubles dans le bief d'aval, sans compter les impacts écologiques sur les espèces piscicoles présentes dans le lac.

Il est donc trop tôt pour formuler des recommandations d'intervention précises à l'égard de ce seuil, sauf pour développer plus loin la connaissance des processus en cause et estimer les impacts possibles d'intervenir dans le sens indiqué.



Figure 20 : Image d'archive du cadastre de Beauport dans le secteur de l'exutoire du lac du Délaié (Courtoisie d'André Bérubé, CBRM, 2005)

4. Conclusions et recommandations

4.1 Sur la séquence des événements

La débâcle produite par le temps doux (redoux) du 22-23 décembre 2004 a vraisemblablement pris son origine dans le secteur des Grands-rapides (du km 35 au km 17 de la rivière mesurés depuis l'embouchure), un tronçon de forte pente propice au décrochement du couvert de glace lors des redoux hivernaux.

Le total des précipitations liquides tombées à la tête du bassin versant a atteint 60 mm en 13 heures avec des pointes horaires de 9 mm/h. La séquence de précipitations ayant été précédée de temps assez froid (inférieur à 0°C), le ruissellement ayant occasionné la débâcle est typiquement en provenance de la pluie et très peu de la fonte de la neige. La débâcle est donc de type mécanique (ruissellement de pluie) plutôt que thermique (ruissellement de fonte de neige).

Le débit étant assez élevé pour causer le décrochement du couvert de glace, la débâcle qui s'en est suivie a d'abord emporté la glace en dévalaison jusqu'à la hauteur du secteur des Îlets (prise d'eau de Beauport). Une analyse du régime hydrologique durant la débâcle permet d'estimer le débit déclencheur de la débâcle entre 20 et 57 m³/s au point kilométrique 35 (km35), tandis que le débit évacuateur permettant de pousser les glaces jusqu'au lac du Délaiqué est évalué à 140 m³/s à la hauteur des Trois-Saults. Le débit maximum atteint pendant l'épisode de la débâcle fut de 150 m³/s à la hauteur de la station hydrométrique 051001 (Marches-naturelles).

Un embâcle temporaire s'est donc produit à la hauteur de la prise d'eau des Îlets dans la nuit du 23 au 24 décembre. Le pied de l'embâcle (aval) se situait à la limite est de la ville de Québec (frontière avec Boischatel) tandis que la tête (amont) était situé à environ 500 m en amont du pont multi-fonctionnel (ligne d'Hydro-Québec). Cet embâcle a persisté pendant quelques heures, puis il s'est produit une nouvelle débâcle qui a emporté une bonne partie de la glace jusqu'au lac du Délaiqué où s'est formé un nouvel embâcle. Suite à la débâcle, un volume de glace estimé à 75 000 m³ est demeuré sur place, principalement en rive, sous la forme de murs dits « de cisaillement ». Cette rétention de glace, si elle a pu causer quelques difficultés opérationnelles à la prise d'eau des Îlets, a aussi contribué à minimiser les conséquences négatives de l'embâcle dans le lac du Délaiqué.

La rivière est demeurée à l'eau libre sur l'ensemble du parcours de la débâcle et ce, durant près de trois semaines. L'exposition du plan d'eau aux conditions atmosphériques et le temps froid extrême et persistant qui a suivi la débâcle ont été propices à la production intensive de frasil et à son transport sur l'ensemble du parcours. C'est plus particulièrement le cas dans le rapide des Trois-Saults qui se caractérise par une très forte dénivelée d'approximativement 30 m sur moins de 500 m (60 m/km), ce qui est considérable comparé aux pentes habituellement rencontrées en amont (1-2 m/km). C'est logiquement à cet endroit que la production de frasil semble avoir été la plus intense et la plus préjudiciable pour le niveau d'eau du lac du Délaiqué.

4.2 Interprétation des observations du niveau d'eau

Deux lignes de relevés du niveau d'eau ont été documentées dans le réservoir du barrage des Marches-naturelles ainsi que dans son prolongement dans le lac du Délaissé. La ligne d'eau observée dans le réservoir présente une dénivelée de 3,5 m/km sur les 200 premiers mètres de l'entrée du réservoir des Marches-naturelles (écoulement difficile) et par la suite de 0,3 m/km jusqu'au barrage (écoulement retardé mais sans obstruction majeure). Dans l'axe du Délaissé (embranchement vers le sud-ouest dans le lac), la pente de la ligne d'eau est également de 0,3 m/km ce qui suggère que l'écoulement s'y effectue de manière préférentielle par rapport au cours principal.

La fluctuation parfois observée du niveau d'eau, apparemment de période diurne, semble liée à l'alternance de production plus intensive de frasil dans le rapide des Trois-Saults, lors de nuits froides et les périodes de répit, voire même de fusion du frasil le jour après un réchauffement des températures extérieures. Toutefois, les observations du niveau d'eau ne sont pas suffisantes pour confirmer cette hypothèse, qui demeure à vérifier.

4.3 Découverte d'un seuil important à la sortie du lac du Délaissé

Le profil longitudinal du fond à l'entrée du réservoir des Marches-naturelles démontre la présence d'un seuil de 6,5 m de haut qui, combiné à la présence massive de glace consolidée et de frasil, obstruent en bonne partie le libre passage du débit. L'origine et la nature de ce seuil sont inconnus. Cependant une ancienne carte montre la présence d'un barrage désaffecté dans le même secteur (*Vachon dam*) dont l'usage demeure inconnu pour l'instant. Ce seuil représente un facteur significatif potentiellement aggravant pour le refoulement du niveau d'eau dans le lac du Délaissé.

A priori, écrêter le seuil semble une solution envisageable. Cependant cette éventualité requiert une analyse plus approfondie des conséquences de cette action, notamment, sur la nouvelle dynamique de la glace qui pourrait en résulter vers le réservoir, l'effet sur le niveau d'eau estival dans le lac du Délaissé et ses conséquences sur les activités récréo-touristiques au Camping municipal, la dynamique sédimentaire au voisinage de l'ouvrage suite à son arasement et le possible relargage de grandes quantités de sédiments meubles dans le bief d'aval, sans compter les impacts écologiques sur les espèces piscicoles présentes.

4.4 Distribution des écoulements dans le lac du Délaissé en cas d'embâcle

La présence de frasil en grande quantité dans le lac du Délaissé a pour conséquence d'obstruer le cours principal et d'induire un cours d'évitement *via* le tronçon dit Délaissé qui contourne par le sud les îles occupant le centre du lac.

À la sortie du lac, l'obstruction à l'écoulement, naturelle ou artificielle, a pour conséquence de concentrer les écoulements dans la section libre, en y occasionnant des vitesses de courants élevées.

L'utilisation exploratoire du géo-radar semble efficace pour localiser les veines d'eau et les amoncellements de glace et en déterminer rapidement l'épaisseur sans qu'il soit nécessaire de forer la glace. Des recherches plus approfondies sur le signal transmis par le géo-radar (traitement de signal) seront requises pour exploiter à leur juste valeur les données collectées.

4.5 Sur l'influence du barrage des Marches-Naturelles

Il y a peu de chance que l'opération du barrage des Marches-naturelles produise un abaissement significatif du niveau d'eau dans le lac du Délaissé étant donné qu'un dénivelé de 50 cm (par rapport au radier de l'évacuateur) se produit maintenant entre le barrage et l'exutoire du lac comparé à 1 m 50 lors des crues normales du printemps. La hausse importante du niveau d'eau observé dans le lac du Délaissé serait alors une conséquence locale des processus qui y ont cours.

4.6 Sur les résultats du géo-radar

Les essais effectués avec le géo-radar sont encourageants car ceux-ci ont démontré qu'il est possible d'utiliser cet appareil afin d'identifier et de caractériser les accumulations de frasil sous le couvert de glace et de mesurer les différentes couches présentes. Afin d'augmenter la précision des mesures d'épaisseur de frasil, des tests devront cependant être effectués afin de mieux caractériser la propagation des ondes électromagnétiques dans ce substrat. En effet, bien que le comportement des ondes électromagnétiques dans la glace et dans l'eau soit bien connu, il existe un manque de connaissances concernant les propriétés électromagnétiques du frasil.

4.7 Recommandations

Le seuil découvert à l'entrée du réservoir des Marches-naturelles doit être caractérisé dans le but de mieux comprendre l'influence qu'il peut exercer sur la sévérité des inondations hivernales. Le cas échéant, il faudra prévoir des moyens d'action concrets, incluant son arasement, pour faire en sorte que ce seuil entrave le moins possible l'écoulement des eaux sans entraîner de conséquences indésirables pour les autres usages de la ressource, notamment, le récréo-tourisme, l'hydroélectricité et l'écosystème aquatique, très présents dans le lac du Délaissé.

5. Bibliographie

- Doyon, B. (2001).** Débâcles et embâcles de la rivière Montmorency : examen rétrospectif. Rapport d'étude préparé par *Recherches++* dans le cadre du présent projet.
- Leclerc, M., B. Morse, J. Francoeur, M. Heniche, P. Boudreau et Y. Secretan (2001).** Analyse de risques d'inondations par embâcles de la rivière Montmorency et identification de solutions techniques innovatrices – Rapport de la Phase I – Pré-faisabilité- Document de travail présenté au Comité de suivi. Rapport conjoint enregistré à l'INRS-Eau #R577a, et à l'Université Laval - Département de Génie civil, #n/d, Janvier, 118 pages.
- Morse B., M. Leclerc, H. Delcourt, J. Francoeur et 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 R577b. Janvier. 178 pages.