



L'embâcle-débâcle d'avril 2014 de la rivière Montmorency Analyse des données LiDAR

Rapport d'événement - Document INRS #1582

RESUME COURT

Embâcle-débâcle – 15-16 avril 2014. Ce document présente une synthèse des informations disponibles concernant cet événement (aléa) dont la récurrence est équivalente à une crue à l'eau libre localement centenaire, voire plus. Les résultats découlent de l'analyse des données Lidar obtenues le 17 avril. Les murs de cisaillement formés lors de la débâcle témoignent de la magnitude de l'événement. Certains dommages liés à l'aléa (risque) sont évoqués.

*Par Michel Leclerc, ing., D.ing.
Professeur honoraire INRS-ETE
Président OBV Charlevoix-
Montmorency*

Rapport d'événement - Embâcle-débâcle des 15-16 avril 2014 – Rivière Montmorency

*Par : Michel Leclerc, ing. Ph.D.,
Professeur honoraire INRS Centre Eau, Terre et Environnement
Président de l'Organisme de Bassins versants Charlevoix-Montmorency*

Objet

Dans le cadre du programme Résilience K de la Ville de Québec visant à pérenniser les informations disponibles à l'égard des risques, ce rapport vise à colliger quelques faits saillants illustrant la séquence des événements et observations réalisés par l'auteur autour des 15-16 avril 2014 sur la rivière Montmorency dans le secteur des prises d'eau des Arrondissements Beauport (des Îlets) et Charlesbourg (Ouvrage A).

Merci aux différents relecteurs pour les précisions et corrections apportées.

Ce document se veut aussi une contribution à la recherche appliquée et à la connaissance des aléas naturels générant le risque. Les données géoréférencées de LiDAR, perçues comme un moyen privilégié pour obtenir une image synoptique de tels aléas ont été relevées le lendemain de l'événement. Elles font l'objet d'une analyse *a posteriori* à partir des hauteurs des délaissés de glace et des données de réflectance formant le signal Lidar. Les conditions prédisposant à cet aléa sont aussi présentées ainsi qu'une couverture photographique.

Mise en garde et dégageement de responsabilité

Ce rapport d'événement est le résultat de l'action bénévole préconisée par l'Organisme de Bassins versants Charlevoix-Montmorency à l'égard des risques naturels et de la sécurité des populations riveraines. Il procède de la propre initiative de l'auteur lequel n'a pas été officiellement mandaté par les autorités municipales pour ce faire. Cette contribution exprime les opinions scientifiques personnelles de l'auteur et n'engage pas sa responsabilité professionnelle d'ingénieur. Elle vise à court terme à faire la lumière sur la séquence des événements et à en tirer des leçons pour améliorer la gestion future de tels aléas. L'usage des informations présentées dans ce rapport demeure exclusivement la responsabilité du lecteur qui les utilisera.

Contenu

Objet	2
Mise en garde et dégageement de responsabilité	2
Contenu.....	3
Pour fins de citation.....	7
Résumé de l'événement – Faits saillants.....	7
Localisation du secteur d'intérêt	9
L'hiver 2013-2014 - Un contexte hydro-climatique exceptionnel.....	10
Un hiver très rigoureux propice à la formation d'une glace épaisse et abondante	10
Une hydrologie propice aux embâcles-débâcles : des critères hydrologiques mis à jour pour la débâcle.....	10
Relevés effectués : une opportunité exceptionnelle.....	13
Un relevé LiDAR-GPS des délaissés de débâcle	13
Des recherches appliquées prometteuses sur les aléas de débâcle.....	15
Abondante documentation photographique et vidéographique	16
Observations générales	16
La séquence des événements	16
Méthode d'analyse des données LiDAR en bref.....	17
Interprétation des données altimétriques du LiDAR	17
Données de réflectance du LiDAR.....	19
Relevés altimétriques directs.....	20
Traitement des données – Élaborer une surface de niveau	20
La carte de submersion et du passage de la débâcle du 16 avril 2014.....	22
Comment se compare un tel événement avec les crues exceptionnelles à l'eau libre.....	23
Profil en long du niveau maximum d'eau et/ou de glace – Analyse.....	24
Approche.....	24
Résultats.....	25
Importance hydrologique des anabranches en cas de crue – Estimé	28
Les embâcles, l'aléa dominant du secteur pour les risques	30
7 sections propices aux embâcles et/ou ralentissement.....	30
L'approche statistique traditionnelle pour les crues à revoir.....	31
Quelques observations relatives aux conséquences et aux dommages	32

L'embâcle principal dans le secteur du pont multifonctionnel – Dommages rue de Canteloup	32
Le secteur des anabranches comme trop-plein - Dommages importants au sentier de motoneige – Potentiel important de débris	32
Conséquences dans le secteur résidentiel amont et à la prise d'eau des Îlets	33
Portée spatiale de la débâcle vers le lac du Délaissé.....	33
Problématique du drainage de la sablière CSL-LOMA	34
L'enjeu d'une crue géomorphique toujours possible au niveau de la rue du Torrent	35
Aspect humain et psycho-social.	35
Une gestion intégrée et concertée du risque à l'échelle du bassin versant.....	36
Recommandations	37
Bibliographie	38
Annexe 1 : métadonnées du Lidar	39
Annexe 2 – Couverture photographique	40
Liste des photographies prises par l'auteur.....	42

Liste des figures

Figure 1 : Rivière Montmorency – Secteur Trois-Saults – Ouvrage A – Barrage des Marches-Naturelles - Carte de localisation et toponymie	9
Figure 2 : Rivière Montmorency – Débit observé à la station CEHQ #051001 lors de la débâcle	11
Figure 3: Hydrogramme observé à la station CEHQ #051001 (Marches-Naturelles) - 14-20 avril 2014	12
Figure 4: Détail de l’hydrogramme observé à la station CEHQ #051001 (Marches-Naturelles) - 14-20 avril 2014	12
Figure 5 : Ondes de crue de débâcle obtenues en explicitant les écarts de débit par rapport à la courbe de tendance – Note : Plusieurs ondes de crue (7-8) sont observables avant la débâcle principale dont une plus importante (30 m ³ /s) vers minuit dans la nuit du 15 au 16 avril	13
Figure 6 : Plan de vol d’Aérophoto pour le relevé Lidar	14
Figure 7 : Nomenclature des fichiers de tuiles issues du Lidar	15
Figure 8 : Séquence estimée des différentes phases de la débâcle des 15-16 avril 2014 sur la rivière Montmorency	17
Figure 9 : Murs de cisaillement (<i>shear walls</i>) de glace laissés par la débâcle du 16 avril 2014 dans le secteur Trois-Saults- des Îlets. – Rivière Montmorency	18
Figure 10 : Carte de submersion de base (Modèle de terrain antérieur selon Leclerc et Secretan, 2012) et de l’écart observable aux murs de cisaillement – Les flèches indiquent ces sites face à la rue du Gouffre en aval du poste des Îlets (Ville de Québec)	19
Figure 11 : Données de réflectance mises en rapport avec la submersion estimée (version préliminaire) ..	20
Figure 12 : Modèle du niveau d’eau établi d’après les différents jeux de données disponibles pour la débâcle du 16 avril 2014 – Rivière Montmorency	21
Figure 13 : Submersion maximale lors de la débâcle 2014 – Trois-Saults – Ouvrage A (VdQ)	22
Figure 14 : Carte de submersion pour la crue centenaire à l’eau libre de 850 m ³ /s (+6% à la station #051001) d’après les travaux de Leclerc et Secretan (2012)	23
Figure 15 : Carte de submersion pour la crue historique à l’eau libre de 1050 m ³ /s (+6% à la station #051001) d’après les travaux de Leclerc et Secretan (2012) – Récurrence à l’eau libre multiséculaire	24
Figure 16 : Trajet du profil en long pour l’analyse du niveau d’eau – Note : Les points numérotés sont fournis pour se référer sur les graphiques suivants	25
Figure 17: Profils en long du niveau d’eau pour différents états : Note Niveau d’eau au moment de la saisie aéroportée (environ 100 m ³ /s) en bleu; Niveau d’eau normalement observé pour une crue non perturbée de 450 m ³ /s (au pic de la débâcle) en tirets noirs; Niveau maximum de l’eau et/ou de la glace selon l’interprétation des données disponibles	26
Figure 18 : Profil en long du niveau d’eau lors de la débâcle comparé aux crues à l’eau libre de récurrence faible : Note : on peut noter que les niveaux d’eau max surpassent la plupart du temps ceux produits par les crues à l’eau libre de faible, voire très faible récurrence	27
Figure 19 : Sections de contrôle du débit dans le modèle INRS selon Leclerc et Secretan (2012)	28
Figure 20 : Débits dérivés vers les anabranches du secteur Canteloup (Pont multifonctionnel) estimés indirectement selon le modèle H2D2 (Leclerc et Secretan, 2012) – Note : Les segments extrapolés des courbes visent à estimer le résultat de la surélévation du niveau d’eau (à 162,25 m) dans le cours principal en lien avec l’embâcle du 16 avril 2014	29

Figure 21 : Sections sensibles pour la génération d’embâcle et/ou de ralentissements du courant en cas de débâcle d’après l’interprétation de l’embâcle-débâcle 2014.....	30
Figure 22 : Analyse statistique des crues à l’eau libre (moyennes horaires) d’après l’INRS (Ouarda dans : Heniche et al., 1999) – Note : Les débâcles glacielles rehaussent les niveaux d’eau normalement observés pour le débit enregistré	31
Figure 23: Bassin d'accumulation vulnérable au surpassement ou au ravinement dans la sablière sud CSL-LOMA jouxtant la rue de la Sablonnière (Photo ML, 2014)	34
Figure 24 : Carte de repérage des photographies dans le secteur des îlets.....	40
Figure 25 : Carte de repérage des photographies dans le secteur de la rue des Trois-Saults.....	41
Figure 26 : Carte de localisation des photographies dans le secteur de la rue des anabranches et du pont multifonctionnel	41

Pour fins de citation

Leclerc, M. (2015) L'embâcle-débâcle 2014 de la rivière Montmorency – Analyse des données LiDAR et rapport d'événement. Contribution non sollicitée pour la Ville de Québec. Rapport scientifique conjoint INRS #R1582 et Organisme de bassins versants Charlevoix-Montmorency. 56 pages

Note : ce document est évolutif et comportera des mises à jour lorsque toutes les données auront été analysées

Résumé de l'événement – Faits saillants

Ce rapport détaillé vient compléter le sommaire présenté en 2014 concernant l'embâcle-débâcle survenu les 15-16 avril 2014 dans le secteur des prises d'eau (Beauport, Charlesbourg) de la Ville de Québec. Des analyses détaillées basées sur les données LiDAR (aéroportées) ont permis d'extraire des informations précieuses sur le déroulement de l'événement, dans le temps et l'espace. D'autres rapports d'intervention émis par la Ville permettent sans doute de compléter le tableau, notamment au niveau de la concertation déployée à l'interne, à l'échelle du bassin versant (gestion intégrée avec les partenaires) et des actions entreprises au cours de la débâcle et pour la phase de rétablissement.

Les phases de la débâcle

Une *première débâcle* suivi d'un *embâcle majeur* à la hauteur du pont fonctionnel (pour motoneiges, quads) se sont produits dans la journée du 15 avril 2014. Cet embâcle a perduré jusqu'au lendemain matin (16 avril à 2h00-4h30 a.m.)

La montée rapide du niveau d'eau au pont multifonctionnel a provoqué le *déversement latéral* du débit dans la plaine alluviale adjacente via les différents seuils présents en rive gauche

La poussée d'un débit de 480 m³/s (moins celui déversé latéralement) a alors provoqué la dislocation et la dévalaison de la glace accumulée jusqu'au lac du Délaissé à la hauteur de Boischatel (*seconde débâcle*).

Questionnement du débit d'évacuation de 200 m³/s

La portion du débit total de 480 m³/s (450 m³/s à la hauteur du secteur étudié) dérivée dans la plaine alluviale a réduit d'autant celui dans le cours principal où était situé l'embâcle. Il est possible que le seuil de débit dit « d'évacuation » de la glace du secteur (*flushing flow*) antérieurement accepté (200 m³/s) tienne la route à condition de considérer la répartition des débits entre le cours principal et les anabranches.

Une plaine alluviale active qui sert de trop-plein : un « *parc à glace naturel* »

L'hypothèse selon laquelle la plaine alluviale adjacente au secteur (anabranches) a servi de trop-plein important à la crue au moment de l'embâcle est confirmée, du moins pour ce type d'événement. La submersion a recouvert la majeure partie de cette zone. En se basant sur le comportement de la rivière tel que révélé par le modèle H2D2 de l'INRS (Leclerc et Secretan, 2012), le débit dérivé vers les

anabranches en amont de l'île Canteloup a vraisemblablement atteint entre 50% et 80% du débit total transitant selon que l'on prend en compte une dérivation accompagnée d'une densité de glace faible ou importante. Les dommages à la forêt (hauteur des cicatrices) laissent supposer que ce type d'aléa ne se produit que très rarement avec une telle ampleur.

Embâcle-débâcle 2014 Un aléa extrême comparé aux crues à l'eau libre -

Bien que le débit de crue observé les-15-16 soit dans les normales pour le printemps, la submersion qui a résulté du débit excédentaire, et de l'ajout massif de glace, embâclée ou en dévalaison, a produit une submersion équivalent à une crue à l'eau libre de récurrence beaucoup plus faible (rare). Ainsi, selon le secteur, le niveau de submersion a correspondu à une crue de récurrence cinquantenaire (1/50 ans à des îlets) à millénaire (1/1000 ans, amont du pont multifonctionnel).

Les processus glaciels : l'aléa dominant du secteur

Il paraît évident que les submersions les plus problématiques à cet endroit soient surtout dues aux aléas glaciels comme celui de 2014.

Des dommages importants en berges

La *seconde débâcle* (la principale pour le secteur considéré, soit celle qui a suivi le démantèlement de l'embâcle au pont) a provoqué beaucoup d'érosion de berges et plusieurs reculs typiquement de 1 mètre en plus d'endommager la végétation riveraine en de nombreux endroits. Ainsi, quelques résidences se sont retrouvées en situation précaire avec des marges de recul insuffisantes par rapport au talus de berge pour être considérées sécuritaires. Des travaux de protection de berge en enrochements ont d'ailleurs été entrepris en plusieurs points des secteurs Trois-Saults, des îlets et Canteloup. Le Sentier de motoneige (Club Le Sapin d'Or) a perdu 3 ponts forestiers en tout ou en partie.

Un jeu de données exceptionnel pour analyser l'aléa : le LiDAR

Un relevé Lidar (Light Detection & Ranking) et une campagne GPS terrain ont été réalisés avec succès le 17 avril 2014 dans l'intention d'établir une image synoptique de l'aléa basée sur les délaissés de glace (murs de cisaillement de glace en berge) et la réponse du signal en réflectance. Un relevé terrain sommaire des délaissés par GPS centimétrique a permis de valider les données LiDAR disponibles. La technique préconisée a été validée par rapport au résultat attendu

Améliorer les mesures préventives

Voir les recommandations dans le document

Le rapport ci-après reprend ces divers aspects et tente dans la mesure du possible de les quantifier lorsque les données sont disponibles et d'en tirer des leçons pour la prévention future. Quelques recommandations relatives à l'amélioration des mesures préventives et à la recherche scientifique appliquée sont formulées à la fin du document. Une annexe photographique fournit également des renseignements précieux sur les impacts locaux de la débâcle.

Localisation du secteur d'intérêt

La Figure 1 montre le secteur d'intérêt compris entre le barrage des Marches-Naturelles (Boralex Énergie inc.) et l'ouvrage A, soit la prise d'eau de l'Arrondissement Charlesbourg. Les secteurs situés en amont à Sainte-Brigitte-de-Laval ne semblent pas avoir subi de problématiques particulières lors de la débâcle de sorte qu'il ne sera pas fait mention de ce secteur dans le présent rapport. Des éléments de repérage sont inclus.



Figure 1 : Rivière Montmorency – Secteur Trois-Sauts – Ouvrage A – Barrage des Marches-Naturelles - Carte de localisation et toponymie

L'hiver 2013-2014 - Un contexte hydro-climatique exceptionnel

L'équipe du Professeur Morse de l'Université Laval a produit deux rapports complémentaires portant respectivement sur dynamique de la débâcle de l'hiver 2013-2014 (Turcotte et al., 2015a) et sur une proposition d'une charte de critères permettant de mieux anticiper la débâcle en contexte opérationnel (Turcotte et al., 2015b). Le lecteur est renvoyé à ces documents pour des informations additionnelles non fournies ici.

Un hiver très rigoureux propice à la formation d'une glace épaisse et abondante

L'hiver particulièrement rigoureux de 2013-2014 a été caractérisé par une présence importante de glace sur l'ensemble du parcours de la rivière Montmorency; son épaisseur pouvait atteindre 80 cm (Claude Côté, Sécurité publique, Sainte-Brigitte-de-Laval, *dixit*), voire plus en raison aussi du fait qu'on n'a pas observé de débâcle hâtive en décembre-janvier et que le couvert de glace a pu progresser tout au long de l'hiver. Lorsqu'une telle débâcle hâtive se produit, le couvert de glace ne peut se reformer qu'après 2-3 semaines de sorte qu'au printemps, la quantité de glace est réduite d'autant.

Une hydrologie propice aux embâcles-débâcles : des critères hydrologiques mis à jour pour la débâcle

Les conditions hydro-climatiques propices au déclenchement d'une débâcle, et éventuellement à l'évacuation de la glace en mouvement vers l'embouchure de la rivière ont été examinées minutieusement par un comité de gestion de risque réuni d'urgence autour des autorités de la Sécurité civile de la Ville de Québec. Une charte d'analyse axée sur la prédisposition du cours d'eau au déclenchement de la débâcle a été mise au point par les divers intervenants, notamment Turcotte et al tel que mentionné. Cette grille d'analyse relève de la Ville et ne sera pas présentée ici, ni commentée. Retenons toutefois que le débit considéré jusqu'alors comme le seuil déclencheur de la débâcle du haut du bassin s'est révélé judicieux entre 50 et 100 m³/s.

Par contre, ce qui était considéré comme un débit d'évacuation devant entraîner la dévalaison de la glace jusqu'au lac du Délaiqué, soit entre 150 et 200 m³/s s'est révélé inexact puisque la seconde débâcle consécutive au démantèlement de l'embâcle au pont multifonctionnel s'est produite aux alentours de 480 m³/s. Nous verrons plus loin que les valeurs antérieurement retenues comme seuils d'évacuation de la glace ne tenaient pas compte du fait que le débit de la rivière puisse à l'occasion se diviser entre plusieurs bras de la plaine alluviale (anabranches), réduisant d'autant la « puissance » du cours principal (capacité de dévaler la glace).

L'onde de crue principale relâchée par cette seconde débâcle a ajouté jusqu'à plus de 100 m³/s à l'onde de crue de base observée jusque-là pour atteindre près de 570 m³/s (5 figures suivantes). En termes de niveau d'eau, l'événement se traduit en équivalent à l'eau libre par un débit très supérieur à cette valeur en raison de la présence massive de glace dans la colonne d'eau au moment de la débâcle et du rehaussement du niveau qu'elle provoque. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

Il est aussi remarquable que l'hydrogramme précédant la débâcle est caractérisé par l'arrivée de plusieurs vagues consécutives marquant l'amorce de la mise en mouvement des glaces dans le bassin versant. La contribution de Turcotte est éloquent à ce propos. Le témoignage de C.Côté de Saint-Brigitte-de-Laval confirme qu'à la hauteur de ce lieu, 4 vagues successives précèdent généralement l'arrivée de la vague de glace en aval.

La Figure 5 indique d'ailleurs qu'à la hauteur de la station, jusqu'à 7-8 ondes successives ont pu être observées dont une 6 heures avant la débâcle finale qui a ajouté plus de 30 m³/s en amplitude au débit de base de la crue.

Ces observations sont d'ailleurs corroborées par les données des sondes de pression distribuées sur le parcours du cours d'eau et fournies par Turcotte et al (2015a).

Il est aussi à noter qu'à l'instar d'une vague de tsunami, les ondes de crues accompagnant la débâcle sont souvent précédées d'une diminution transitoire de débit (stase) qui peut faire paraître l'importance de l'onde plus grande (tel le marnage p/r à l'amplitude). Les ondes observées ont une période courte de l'ordre de moins d'une heure et le processus de débâcle s'étale sur une période de 6-8 heures environ.

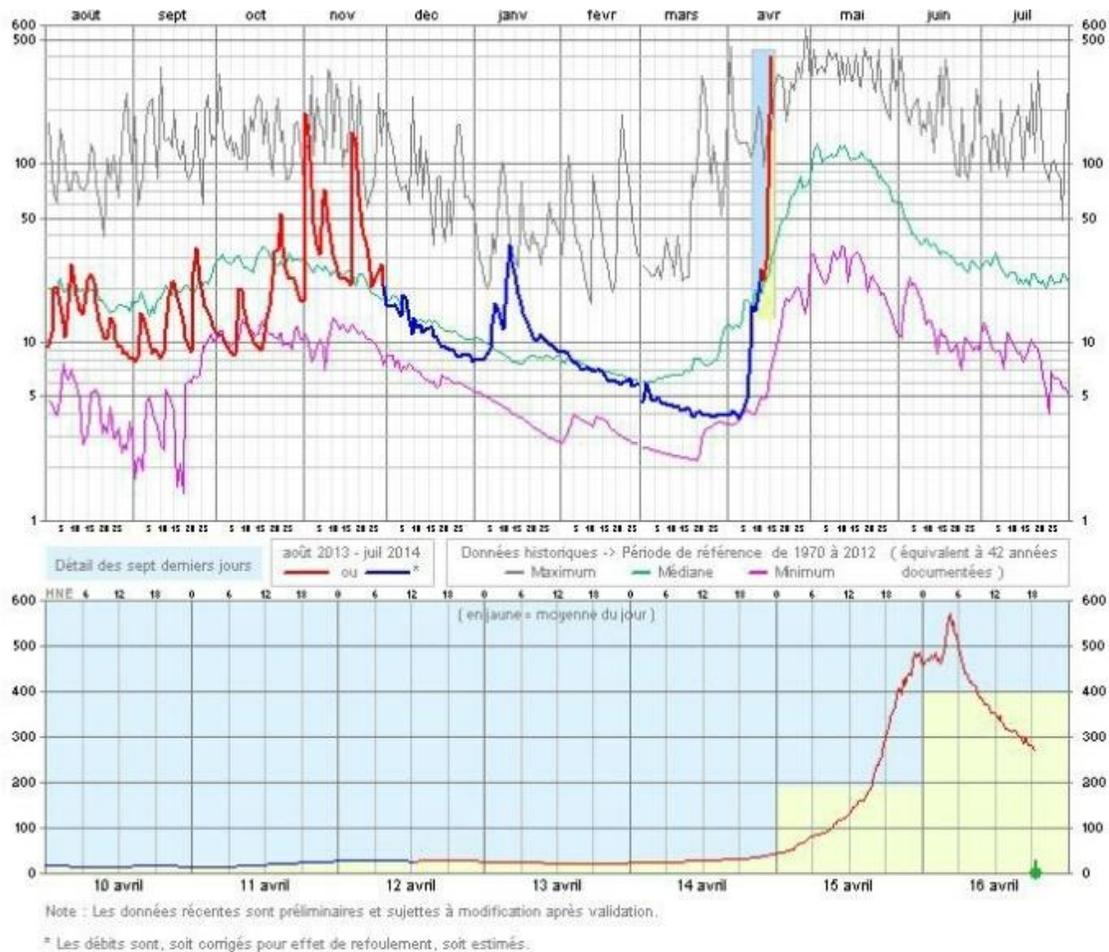


Figure 2 : Rivière Montmorency – Débit observé à la station CEHQ #051001 lors de la débâcle

Note : La pointe à 570 m³/s est le résultat du relâchement de l'embâcle au pont multifonctionnel et non du passage de la glace qui est restée embâclée dans le lac du Délaissé. Il s'agit d'une onde de crue secondaire superposée à l'onde principale. Une estimation du volume relâché est ainsi possible

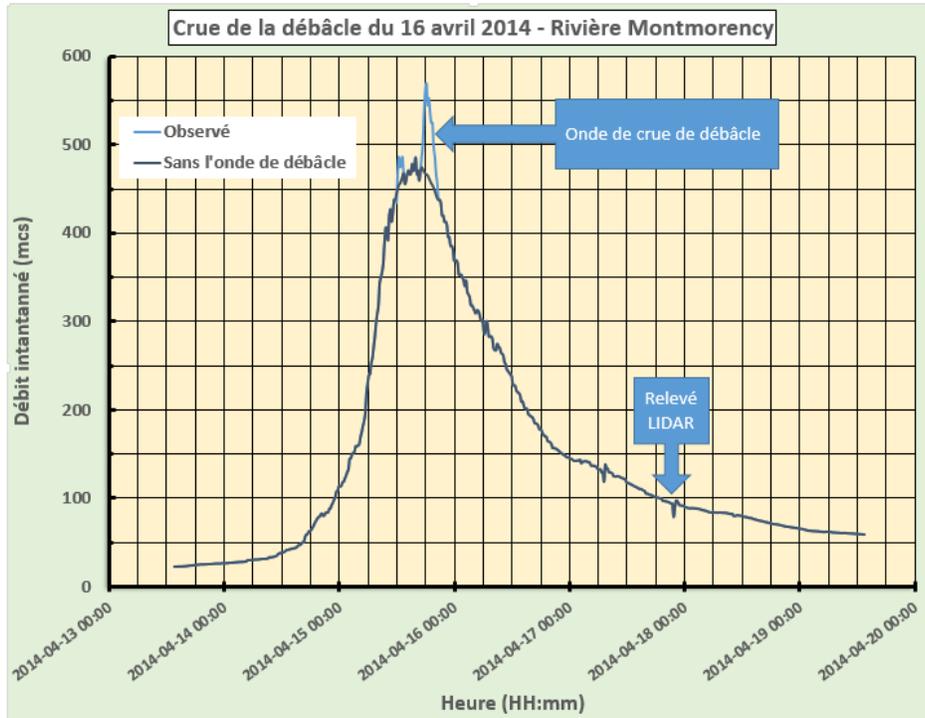


Figure 3: Hydrogramme observé à la station CEHQ #051001 (Marches-Naturelles) - 14-20 avril 2014

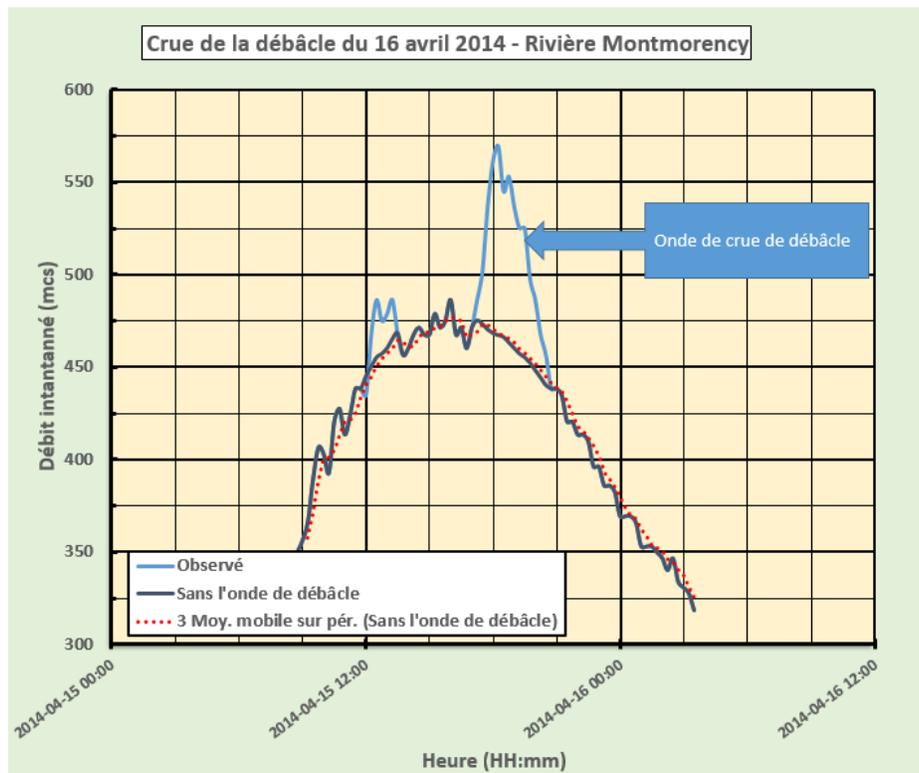


Figure 4: Détail de l'hydrogramme observé à la station CEHQ #051001 (Marches-Naturelles) - 14-20 avril 2014

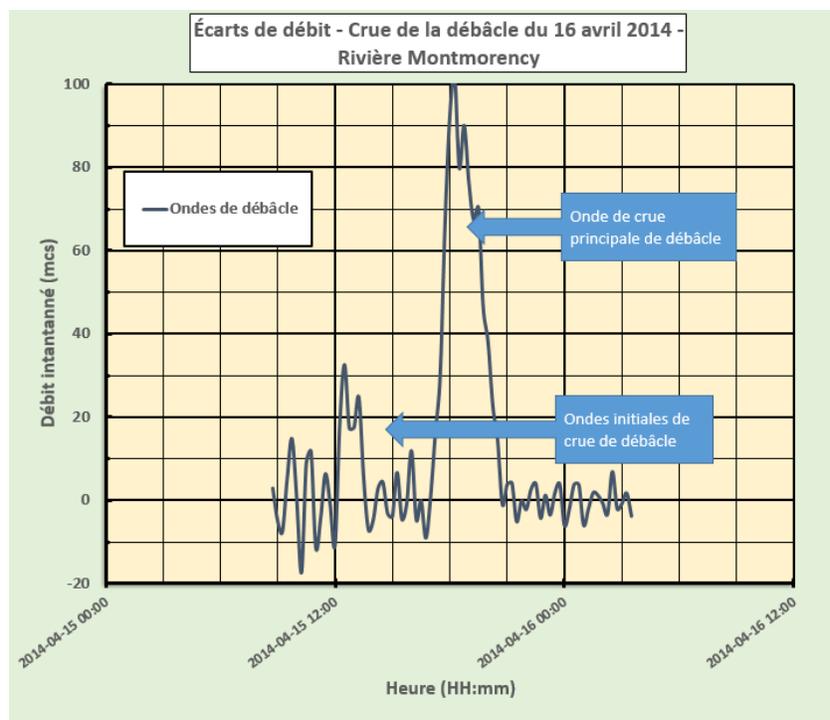


Figure 5 : Ondes de crue de débâcle obtenues en explicitant les écarts de débit par rapport à la courbe de tendance

Note : Plusieurs ondes de crue (7-8) sont observables avant la débâcle principale dont une plus importante (30 m³/s) vers minuit dans la nuit du 15 au 16 avril

Relevés effectués : une opportunité exceptionnelle

Un relevé LiDAR-GPS des délaissés de débâcle

Des arrangements avaient été pris par la Ville avec des fournisseurs de données aéroportées LiDAR (Light Detection & Ranging) afin de caractériser l'événement. Ainsi, avec un relevé précis et géoréférencé des délaissés de glace (murs de cisaillement en berge, champs de glace) a été effectué dans la soirée du 17 avril vers 22-23 heures (Lignes de vol Figure 6). Ces observations témoignent de la phase maximale du passage de la glace le lendemain de l'aléa. Les données recueillies ont une densité maximale de 4 points/m² et elles comprennent l'altitude au sol pour le niveau de la glace et de l'eau et l'intensité du signal (réflectance) qui permet de discriminer les différentes textures au sol (neige, glace, eau, terre). Les données ont été livrées en tuiles de 500 m de côté couvrant toute la surface pertinente au phénomène (plan de vol fourni ci-après). La Figure 7 montre la nomenclature et la distribution des tuiles Lidar sur le territoire d'observation. Les métadonnées relatives au relevé sont fournies en annexe.

D'autres relevés au sol (GPS RTK) ont été effectués avec le Service géomatique de la Ville afin de caractériser directement les délaissés de crue et valider les données aéroportées.

S14-081 Riviere Montmorency Lidar V3

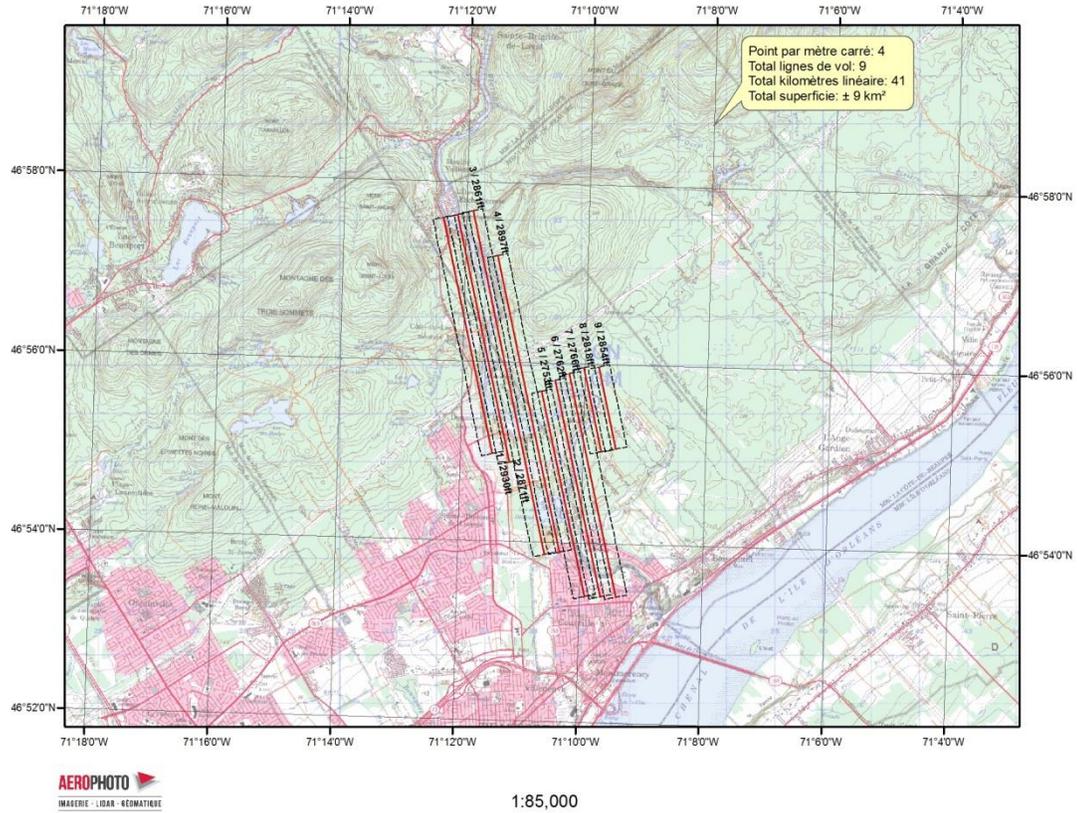


Figure 6 : Plan de vol d'Aérophoto¹ pour le relevé Lidar

Note : le plan de vol effectif s'étend en amont de l'Ouvrage A jusqu'à l'île-Enchanteresse

¹ La compagnie Aérophoto a fait faillite en 2014. Les résultats et la propriété intellectuelle de la compagnie ont été acquis par la firme TIKA Geomatik qui a repris la collaboration.

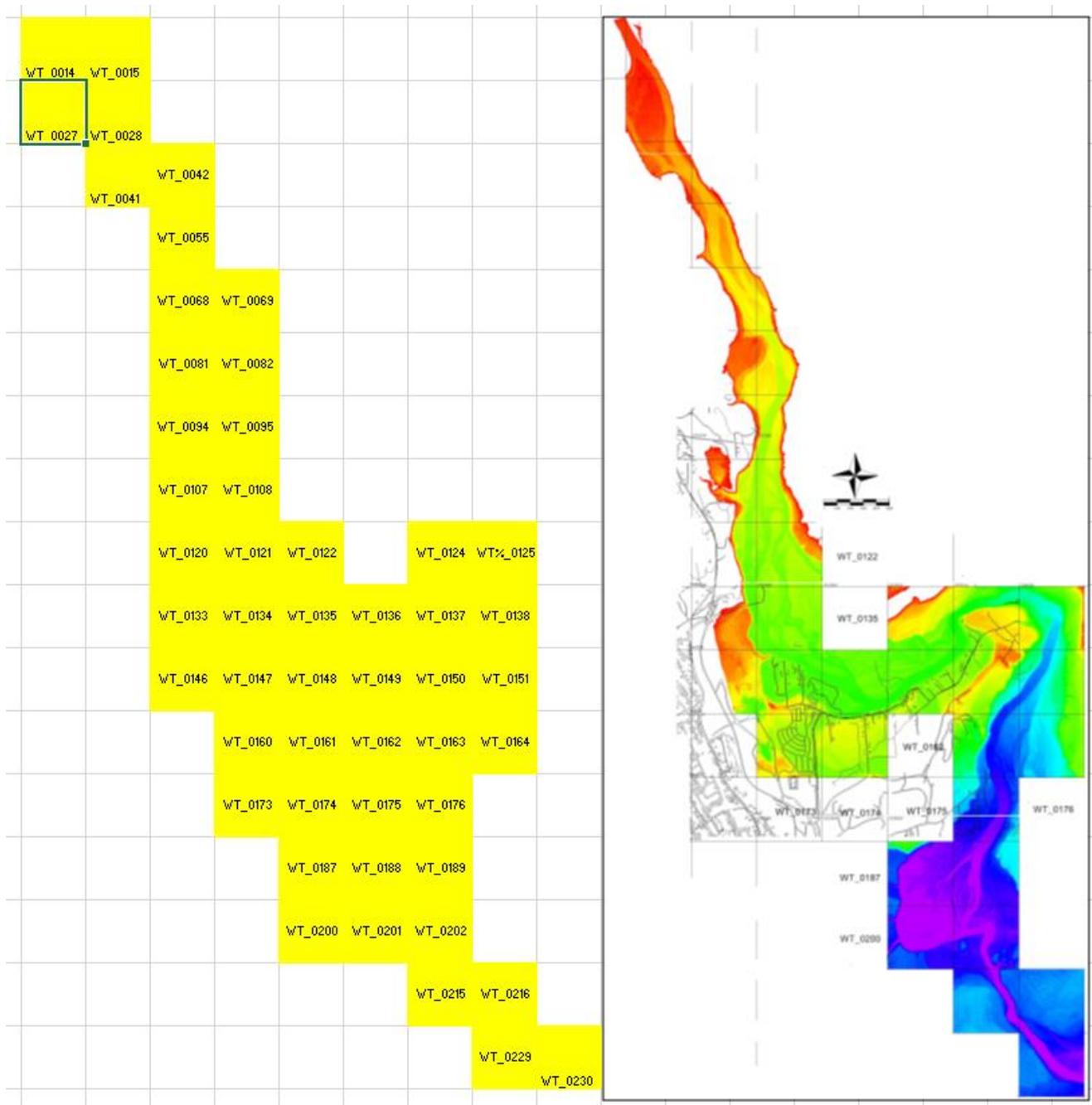


Figure 7 : Nomenclature des fichiers de tuiles issues du Lidar

Des recherches appliquées prometteuses sur les aléas de débâcle

Ces nouvelles données sont très précieuses et constituent possiblement une des premières tentatives canadiennes pour caractériser de la sorte un événement extrême de débâcle. Ces données permettront de faire progresser la recherche appliquée aux aléas de crues glaciologiques, notamment en ce qui a trait à :

-
- a) L'influence d'un écoulement bi-phasique (eau-glace) sur les niveaux d'eau et la théorie des modèles déterministes de tels événements
 - b) Le calcul de la récurrence (équivalente à l'eau libre) de tels aléas dans un climat nordique
 - c) Le volume et le débit de glace transportée
 - d) Le rôle des berges dans l'emménagement de la glace en dévalaison, etc..

Dans ce qui suit, ces données font l'objet d'analyses pratiques visant à améliorer dans un premier temps les processus d'intervention opérationnelle.

Abondante documentation photographique et vidéographique

De nombreuses photographies et quelques séquences vidéos ont été prises par l'auteur en divers sites avant, pendant et après la débâcle, soit jusqu'au 24 avril. Ces documents sont partagés en annexe pour archivage et consultation future. Ils permettent d'observer divers phénomènes tels que de nombreux arbres écorchés en berges et dans la forêt de la plaine alluviale, des mouvements de sol en berges dans les secteurs résidentiels des Trois-Saults et de la rue de Canteloup, les murs de cisaillement délaissés par la débâcle et d'autres dommages matériels, notamment ceux aux ponts du sentier de motoneige. Quelques exemples de ces prises de vue sont fournis avec commentaires en annexe. Ces observations ont surtout servi à corroborer les interprétations de niveau maximum tirées des données Lidar

Observations générales

La séquence des événements

(Voir la Figure 8 ci-après pour une illustration de cette séquence)

- I. 15 avril dans la matinée : **première débâcle** en provenance de Sainte-Brigitte-de-Laval, soit de la rivière De l'Île et/ou le cours principal de la Montmorency, notamment du secteur des Grands-Rapides (18 km) en amont du village de Sainte-Brigitte-de-Laval
- II. Dans la journée : formation d'un **embâcle majeur à la hauteur du pont multifonctionnel** (entre les Îlets et la côte de la rue Canteloup)
- III. **Dérivation partielle de la glace** et d'une partie du débit vers le secteur des anabranes en rive gauche et possible formation d'embâcles dans les secteurs restreints des différents ponts de motoneige
- IV. 15 avril en fin d'après-midi : **débâcle partielle du secteur des anabranes** (ponts du sentier de motoneige et quads arrachés ou endommagés); cette débâcle entraîne l'évacuation de la glace (banquise) encore présente à la hauteur de la rue des Trois-Saults (aval des bassins) et dans le rapide lui-même jusqu'au lac du Délaissé. Secteur dorénavant à l'eau libre
- V. Le débit continue d'augmenter en soirée et dans la nuit jusqu'à 4h30; une part importante du débit est dérivée vers les anabranes, particulièrement celui jouxtant en amont l'île de Canteloup
- VI. Vers 4h30 le matin du 16 avril : l'embâcle principal se rompt et **une débâcle majeure** se produit à la hauteur de la rue des Trois-Saults (niveau plein-bord pratiquement atteint ou dépassé). La glace se retrouve à l'entrée du lac du Délaissé.
- VII. Le lendemain ou le surlendemain, l'embâcle du lac du Délaissé se libère en partie et un chenal à l'eau libre se forme dans le cours principal vers le barrage des Marches-Naturelles. La banquise demeure

intacte dans la majeure partie du plan d'eau (le délaissé peu profond face au camping municipal de Beauport)

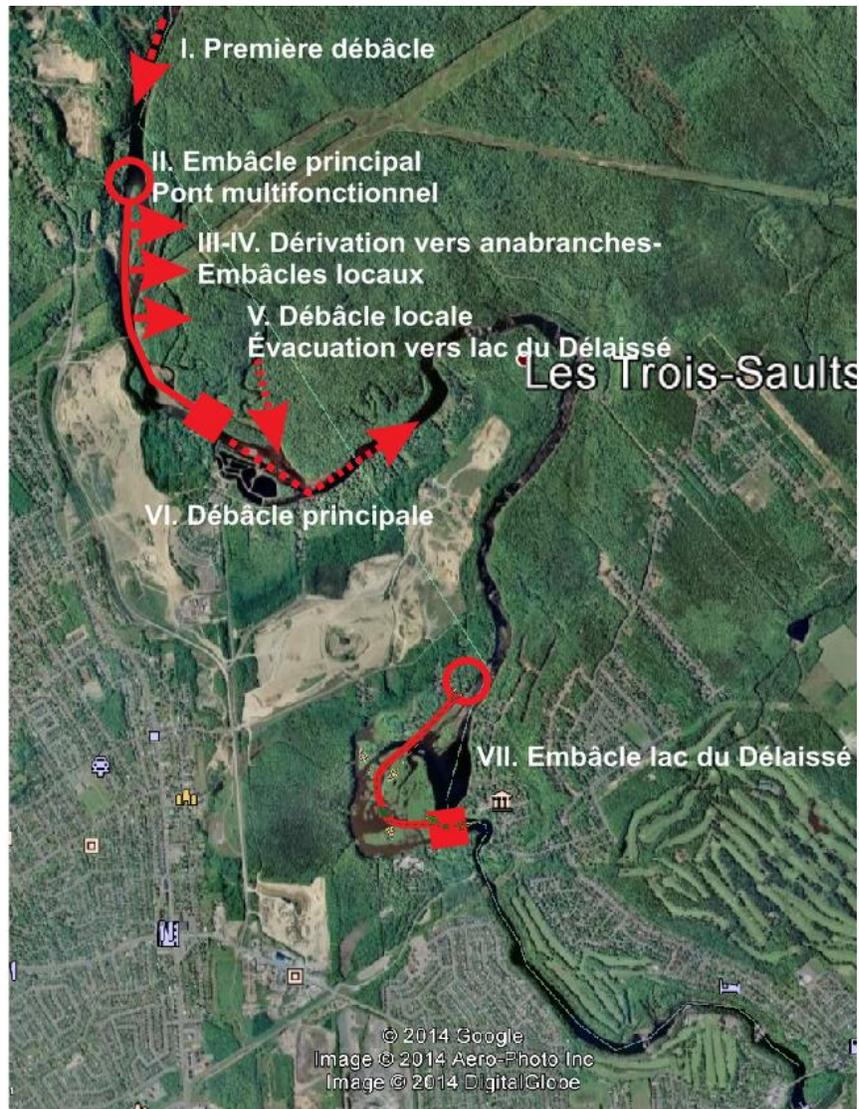


Figure 8 : Séquence estimée des différentes phases de la débâcle des 15-16 avril 2014 sur la rivière Montmorency

Méthode d'analyse des données LiDAR en bref

Les données LiDAR portent en plus de la référence spatiale (x,y) l'altitude du point au sol (sur l'eau ou la glace aussi) ainsi que la réflectance du signal. Toutes les données disponibles classifiées pour éliminer les faux signaux (bâtiments, végétation arborescente) ont été intégrées dans le logiciel MODELEUR (INRS), un outil d'analyse et de modélisation géographique dédié aux écoulements fluviaux, afin d'extraire l'information disponible.

Interprétation des données altimétriques du LiDAR

La première donnée permet de révéler la hauteur des murs de cisaillement lors que l'information est croisée avec le relief existant. Celui-ci peut être soit le Modèle de terrain de la Ville dans le secteur, soit aussi la donnée LiDAR obtenue en 1999-2000 dans le même secteur (Leclerc et Secretan, 2012; Leclerc et Morse, 2000).

Bien que des murs de cisaillement ne soit pas observables partout sur le parcours de la débâcle, il en existe suffisamment pour permettre un échantillonnage des niveaux maximums atteints par l'eau ou les délaissés de glace pour produire un profil en long fiable. La Figure 9 montre un bel exemple de tels délaissés. Ces informations qualitatives ont permis de corroborer la présence de murs de cisaillement observables par les données LiDAR. Plusieurs autres exemples de tels murs étaient disponibles en photos et ils sont fournis en annexe.



Figure 9 : Murs de cisaillement (*shear walls*) de glace laissés par la débâcle du 16 avril 2014 dans le secteur Trois-Sauts- des Îlets. – Rivière Montmorency

La Figure 10 présente un exemple type du genre de traitement effectué au même endroit. Certaines des nombreuses photos fournies en annexe présentent également des informations similaires.

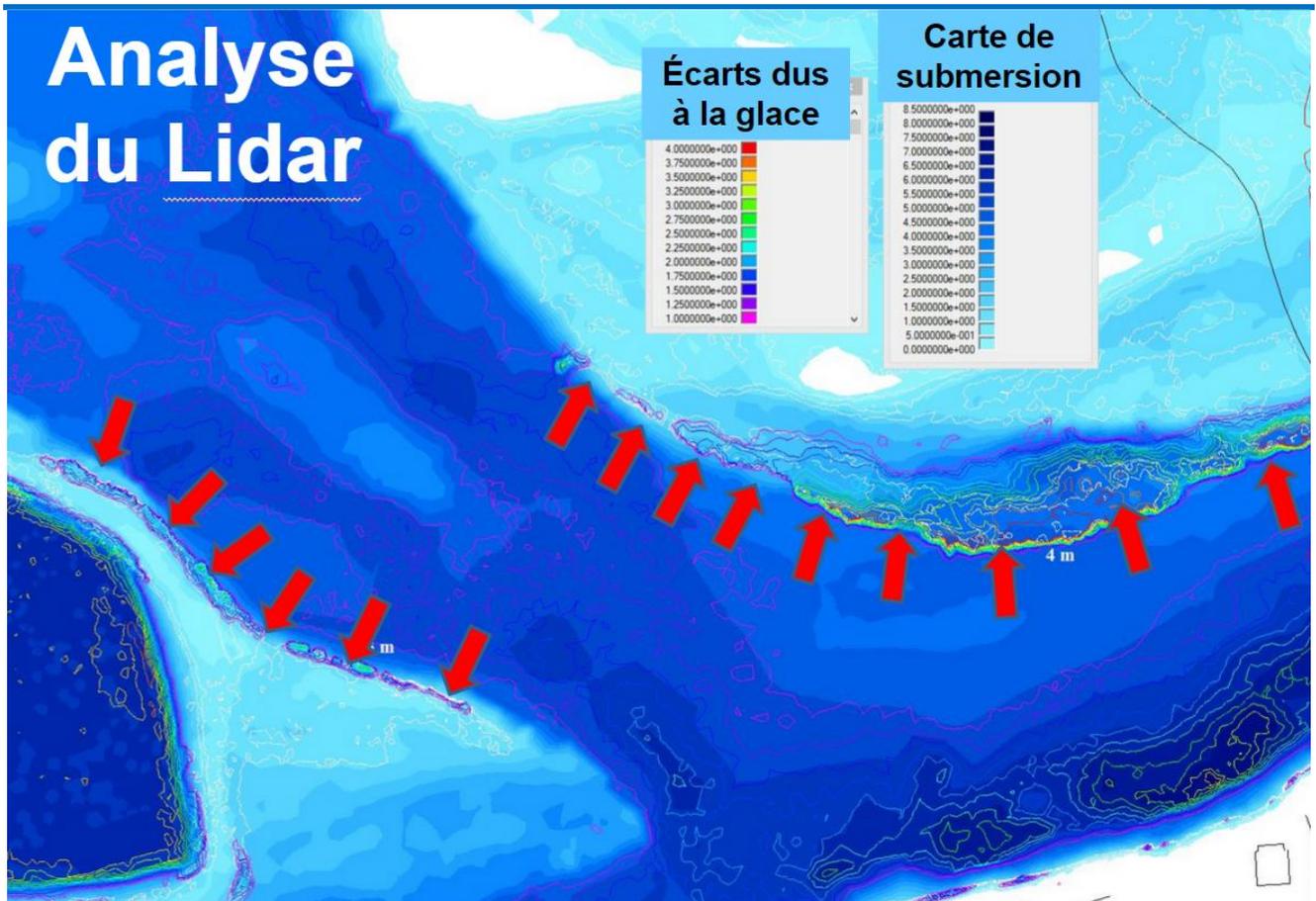


Figure 10 : Carte de submersion de base (Modèle de terrain antérieur selon Leclerc et Secretan, 2012) et de l'écart topographique observable dus aux murs de cisaillement – Les flèches indiquent ces sites face à la rue du Gouffre en aval du poste des Îlets (Ville de Québec)

Données de réflectance du LiDAR

La seconde donnée fournie par le LiDAR, la réflectance, révèle les endroits où la présence d'eau liquide (lit mineur) et/ou de débris et de dépôts de sédiments sur la neige a pu se manifester. Ainsi, généralement, lorsque le signal est inférieur à 35 environ, on peut souvent (pas toujours) en déduire que le niveau d'eau a surpassé le relief existant. Autrement, le secteur n'a pas connu de submersion. Cette seconde interprétation doit toutefois être réalisée avec une certaine prudence. Ainsi la présence d'eau à un endroit n'indique pas directement le niveau maximum atteint.

La Figure 11 montre la répartition de la donnée de réflectance dans le secteur du pont multifonctionnel. S'il est relativement aisé d'identifier la présence directe de l'eau (lits mineurs du cours principal et anabranches), il n'est pas si simple de trouver l'intersection exacte du niveau d'eau avec le relief. La donnée fournit toutefois de bons indices à l'occasion.

Relevés altimétriques directs

La Ville de Québec (Ingénierie) a fourni les services d'arpentage requis pour prélever quelques points d'altitude en berges là où des murs de cisaillement étaient visibles et accessibles. Ces données relevées dans le secteur Cantaloup, des Îlets et Trois-Sauts ont été intégrées dans l'analyse comme moyen de validation des interprétations LiDAR.

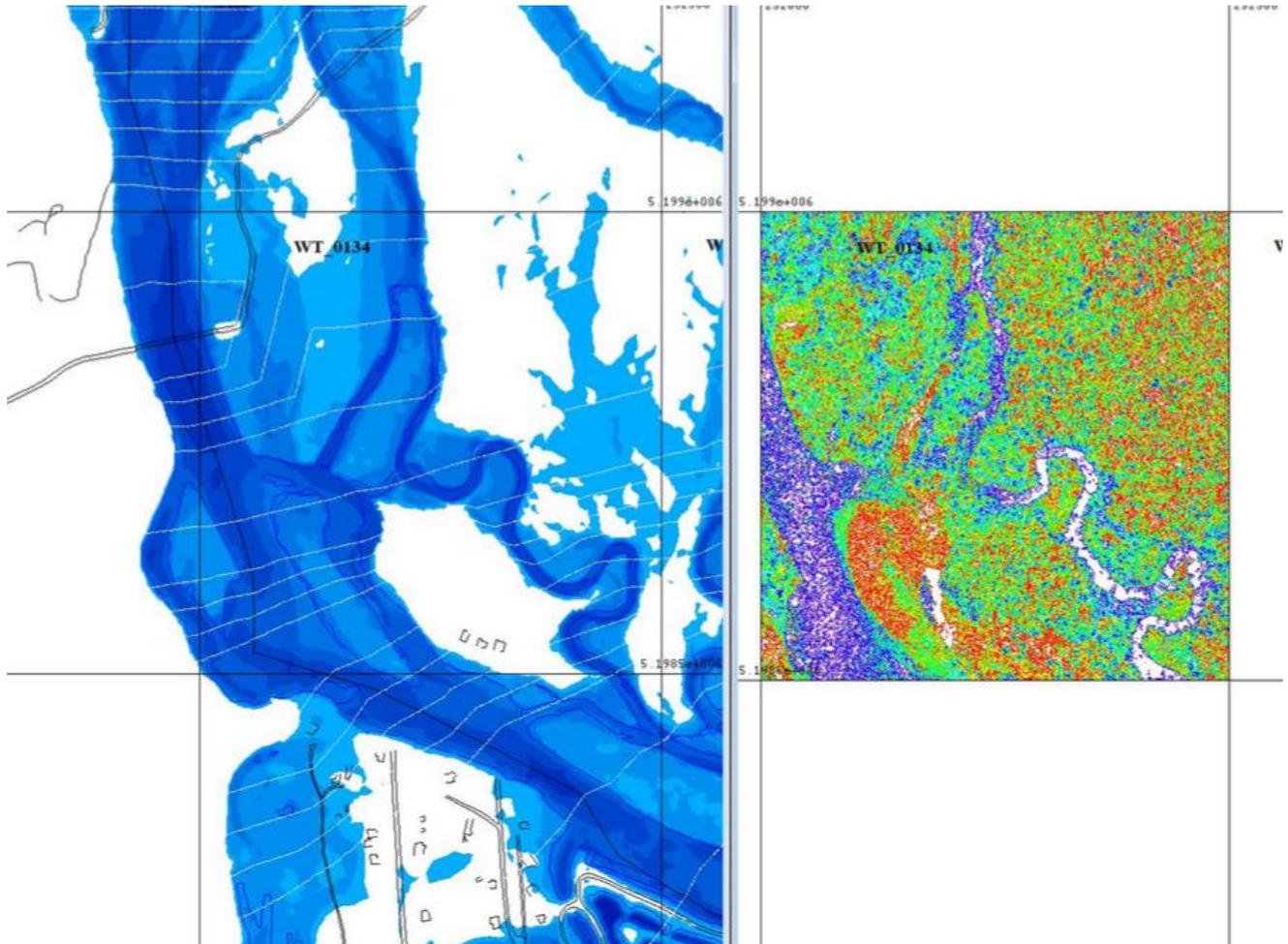


Figure 11 : Données de réflectance mises en rapport avec la submersion estimée (version préliminaire)

Traitement des données – Élaborer une surface de niveau

Afin de représenter la submersion par l'embâcle et la débâcle consécutive, l'échantillon de points relevés à partir des données LiDAR a été extra-interpolé sur l'ensemble du domaine de simulation retenu lors d'études hydrauliques antérieures pour la Ville de Québec (Études de l'Ouvrage A; Leclerc et Secretan, 2012). La Figure 12 montre la couche de données interprétatives du niveau maximum atteint par l'eau ou la glace entre le 15 avril 2014 et la fin de la débâcle le 16 avril au matin. Ce résultat forme une surface-enveloppe des conditions maximales indiquées par les observations. La même figure montre aussi la ligne de berges résultante en utilisant la topographie du LiDAR 2014 comme référence terrain. La submersion nulle indique une ligne de berge. Celle-

ci est approximative étant donné que la donnée LiDAR est parfois biaisée par la présence de neige résiduelle (estimée à 30 cm environ) en forêt.

La carte de submersion finale est présentée plus loin.

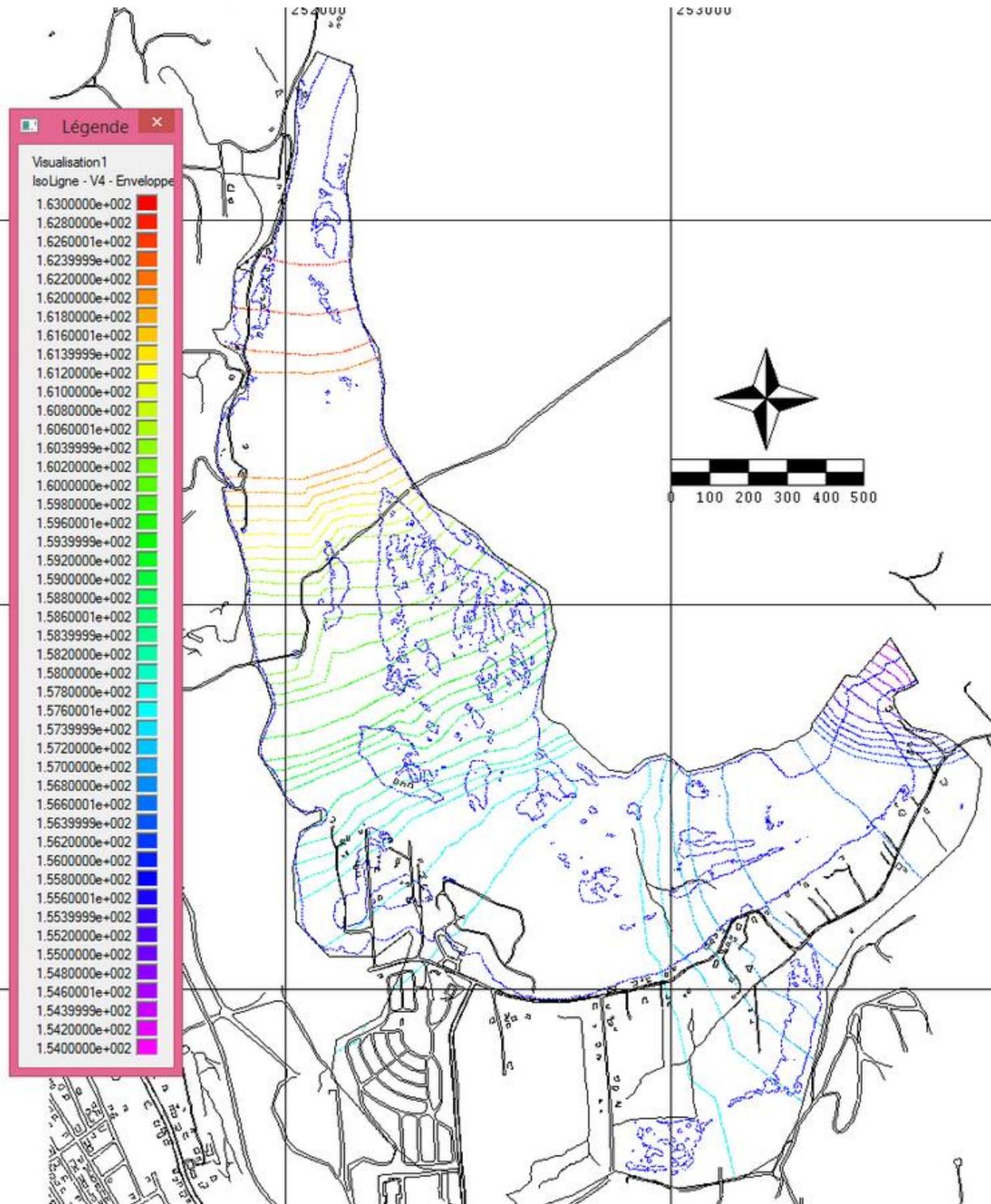


Figure 12 : Modèle du niveau d'eau établi d'après les différents jeux de données disponibles pour la débâcle du 16 avril 2014 – Rivière Montmorency

La carte de submersion et du passage de la débâcle du 16 avril 2014

En soustrayant tout simplement du niveau d'eau induit du LiDAR la topographie existante du tronçon, on obtient la submersion si la valeur est positive. Si elle est négative c'est que le terrain est demeuré émergé. Une valeur nulle indique l'intersection du niveau d'eau avec la berge, donc la ligne de berge submergée.

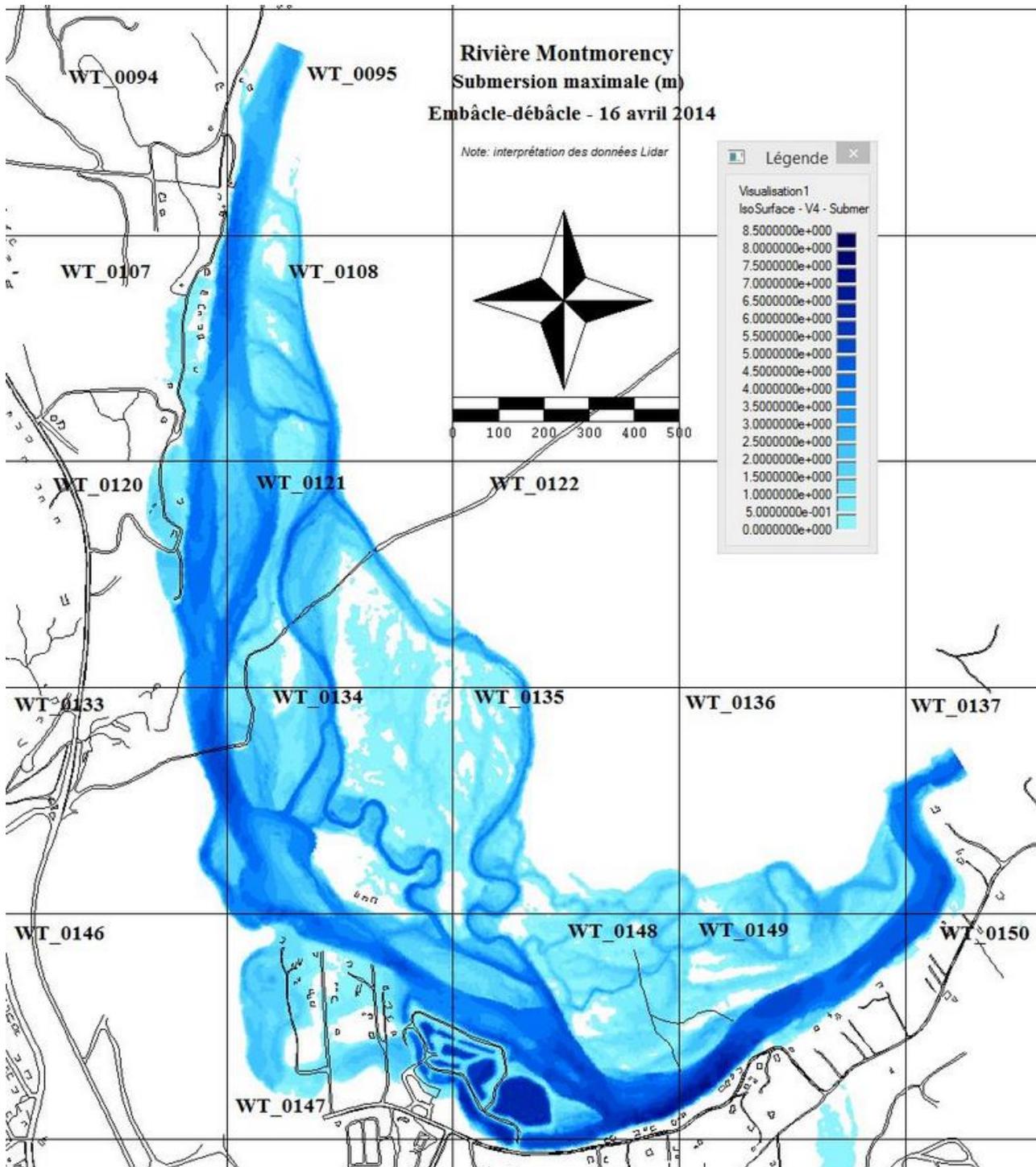


Figure 13 : Submersion maximale lors de la débâcle 2014 – Trois-Sauts – Ouvrage A (VdQ)

L'enveloppe de submersion est asynchrone étant donné que la donnée est répartie dans le temps sur plus de 12 heures.

Comment se compare un tel événement avec les crues exceptionnelles à l'eau libre

Afin de contraster et relativiser la submersion de l'embâcle-débâcle de 2014, une carte de submersion correspondant à la crue centenaire est présentée à la Figure 14. La Figure 15 fait de même pour la submersion estimée² par Leclerc et Secretan (2012) lors de la crue historique du 3 novembre 1966 qui est considérée comme équivalent à la crue du Saguenay en 1996.

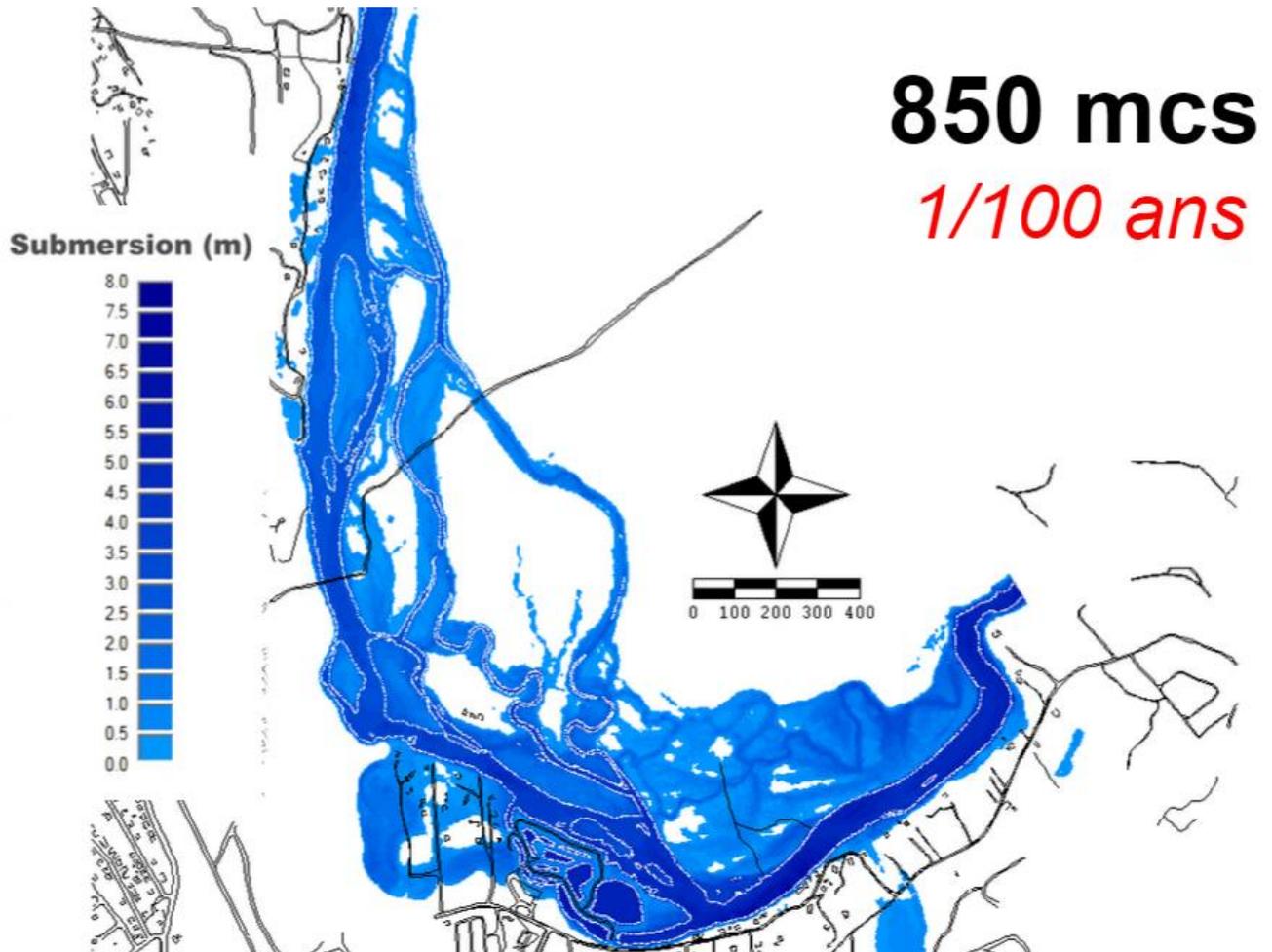


Figure 14 : Carte de submersion pour la crue centenaire à l'eau libre de 850 m³/s (+6% à la station #051001) d'après les travaux de Leclerc et Secretan (2012)

Il faut se rendre à l'évidence que les crues d'embâcle-débâcle surpassent facilement en submersion ce qui peut être observé lors des crues à l'eau libre même pour des récurrences aussi faibles que celle, multicentenaire, de 1966.

² Sous réserve de la validité de la topographie prise en compte qui est contemporaine (1999-2000)

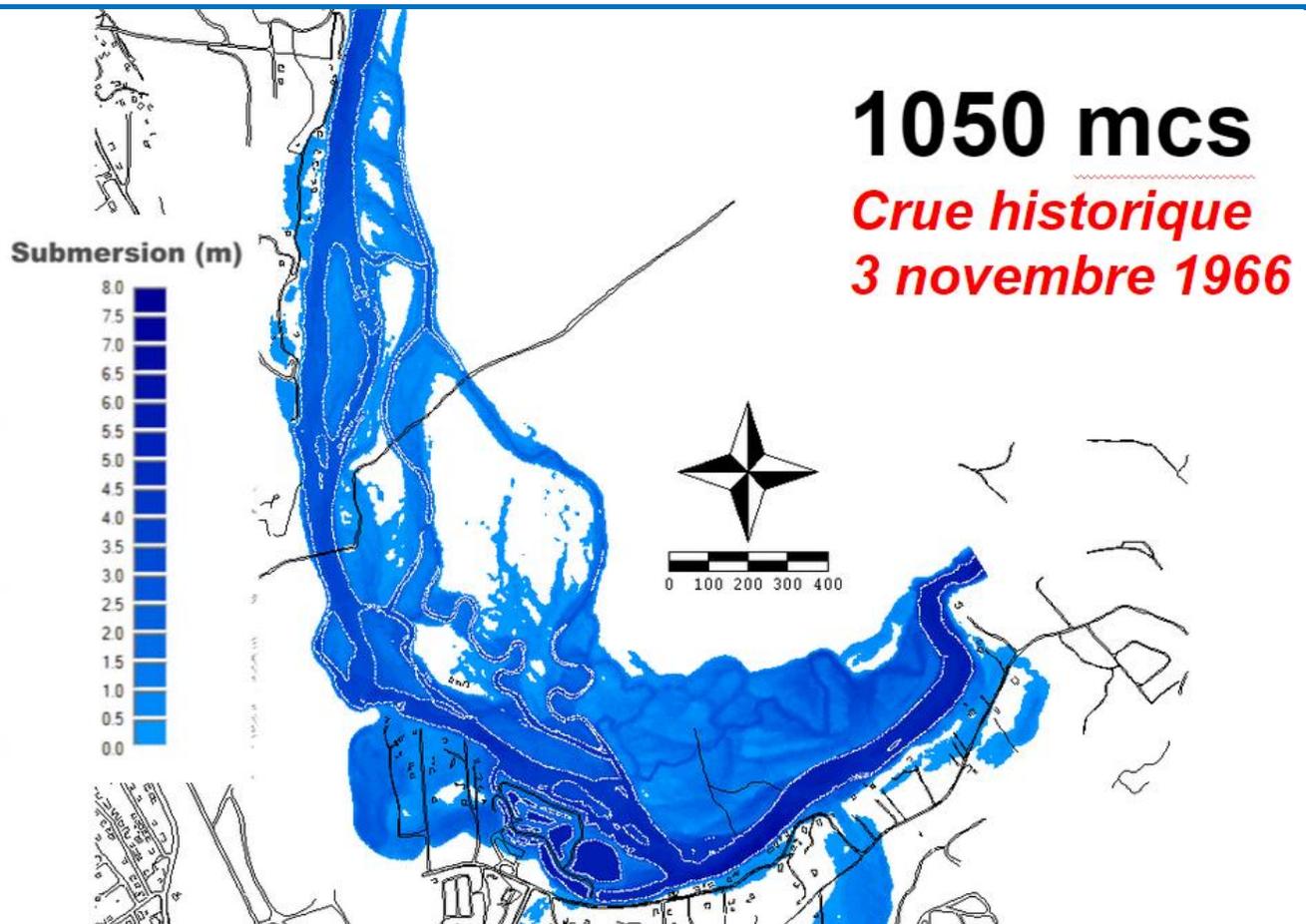


Figure 15 : Carte de submersion pour la crue historique à l'eau libre de 1050 m³/s (+6% à la station #051001) d'après les travaux de Leclerc et Secretan (2012) – Récurrence à l'eau libre multicentenaire

Profil en long du niveau maximum d'eau et/ou de glace – Analyse

Approche

L'approche consiste à établir un trajet amont-aval représentatif de l'évolution du niveau d'eau dans l'espace. La Figure 16 montre le positionnement de ce profil ainsi que des points numérotés pour se repérer sur les graphiques qui vont suivre. Les données disponibles sont portées par ce profil.

L'analyse cherche d'abord à montrer le contraste de l'événement de 2014 par rapport aux crues à l'eau libre de faible récurrence. Elle vise aussi à identifier les régions du cours d'eau plus sensibles au ralentissement voire, à l'arrêt complet des glaces au moment de la débâcle.

Accessoirement, le profil en long du niveau observé le 17 avril autour de 100 m³/s servira à ajouter un événement de validation pour le modèle hydrodynamique en place depuis 2012 (Leclerc et Secretan, 2012).



Figure 16 : Trajet du profil en long pour l'analyse du niveau d'eau –
Note : Les points numérotés sont fournis pour se référer sur les graphiques suivants

Résultats

La Figure 17 montre l'information utilisée précédemment reportée sur le profil en long retenu.

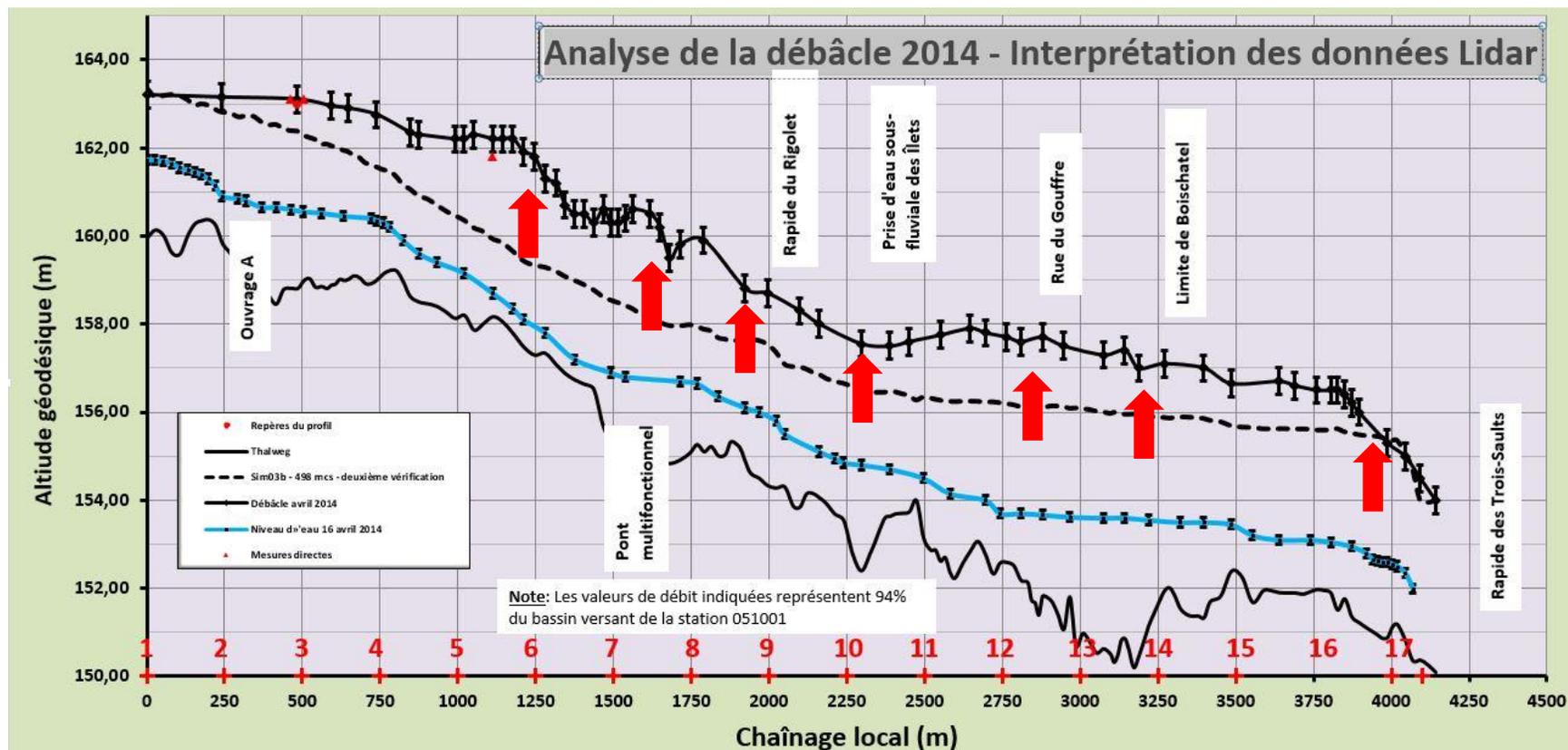


Figure 17: Profils en long du niveau d'eau pour différents états :

Note Niveau d'eau au moment de la saisie aéroportée (environ $100 \text{ m}^3/\text{s}$) en bleu;

Niveau d'eau normalement observé pour une crue non perturbée de $450 \text{ m}^3/\text{s}$ (au pic de la débâcle) en tirets noirs;

Niveau maximum de l'eau et/ou de la glace selon l'interprétation des données disponibles. Les repères en rouge sur l'axe horizontal sont positionnés sur la Figure 16.

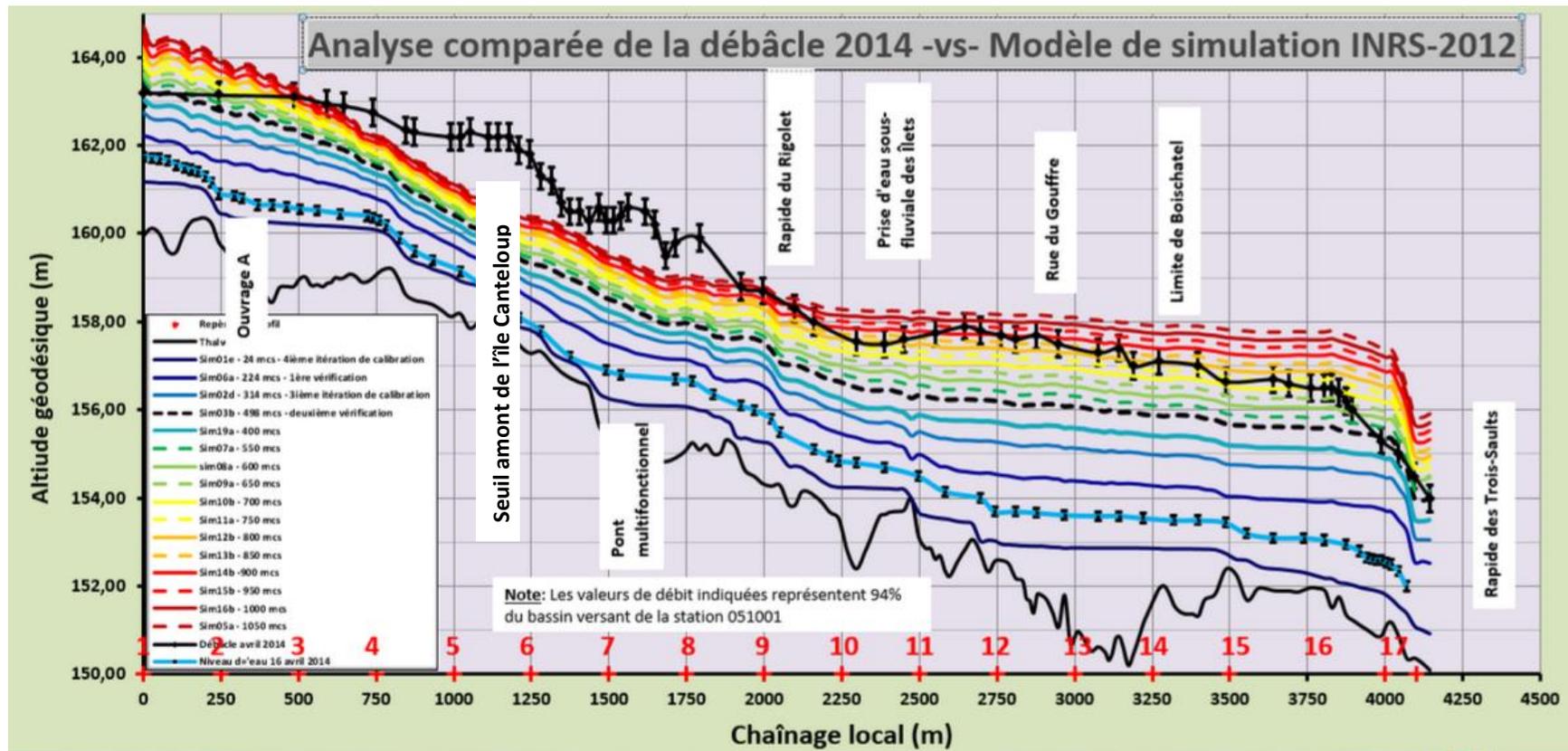


Figure 18 : Profil en long du niveau d'eau lors de la débâcle comparé aux crues à l'eau libre de récurrence faible :

Note : on peut noter que les niveaux d'eau max surpassent la plupart du temps ceux produits par les crues à l'eau libre de faible, voire très faible récurrence

Importance hydrologique des anabranches en cas de crue – Estimé

On peut s'interroger sur la valeur relative du débit dérivé vers la plaine alluviale lorsque le cours principal ralentit ou stagne pour cause d'embâcle. Pour répondre à cette question, les simulations hydrodynamiques réalisées pour le compte de la Ville de Québec (Leclerc et Secretan, 2012) peuvent fournir une première indication. Dans cette étude, des relations niveaux-débit pour chaque anabranchement sont établies pour toute la gamme des débits y compris les crues exceptionnelles à l'eau libre. Notre hypothèse est que quand des niveaux exceptionnels sont atteints en situation d'embâcle dans le cours principal, on devrait s'attendre à des résultats de débit dérivé du même ordre de grandeur à la réserve près que l'écoulement dérivé sera plutôt biphasique (avec glace), modulant par le fait même à la baisse la débitance totale dérivée.

Dans l'étude mentionnée, des sections de contrôle du débit ont été implantées numériquement dans le modèle afin de calculer le débit transitant par ces endroits (Figure 19). Les sections #8 et #9 ensemble cumulent la somme des débits dérivés vers les anabranches depuis le cours principal.

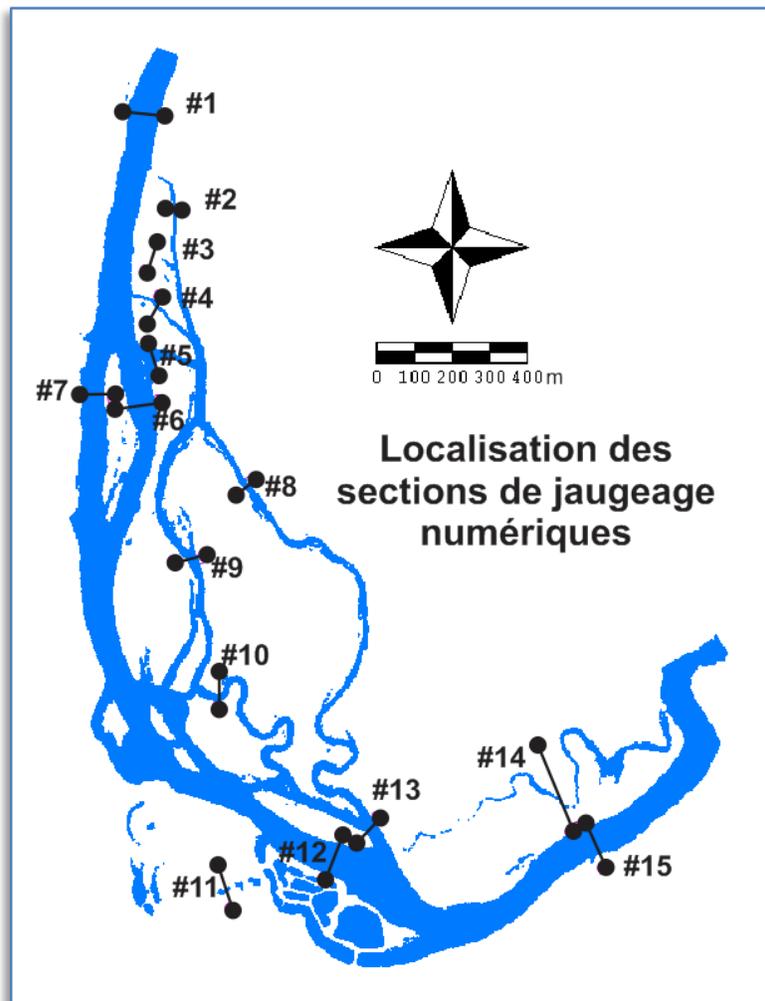


Figure 19 : Sections de contrôle du débit dans le modèle INRS selon Leclerc et Secretan (2012)

La Figure 20 montre le résultat de la modélisation pour la gamme des débits qui avaient été alors considérés; on y trouve aussi une extrapolation jusqu'à une valeur de niveau équivalent à un niveau d'eau observé partout en amont du pont multifonctionnel au moment du maximum de l'embâcle. Bien que ces valeurs ne soient qu'indicatives, on constate néanmoins que près de 400 m³/s au total auraient pu être dérivé pendant l'embâcle en supposant qu'aucune résistance glacielle à l'écoulement n'ait affecté le processus de dérivation. Rappelons que le débit total dans la rivière a atteint autour de 480 m³/s (450 au site) avant la débâcle finale. Une résistance glacielle accompagnant la dérivation est plausible car une fraction de la glace embâclée ou en dévalaison a aussi pu transiter vers les anabranches. Nous ne disposons pas d'information suffisante à cet égard. Quoi qu'il en soit, une portion très significative du débit (supérieure à 50%, sinon plus jusqu'à 80%) pourrait avoir été dérivé vers les anabranches. Ceci expliquerait l'importance des dommages subis alors (voir plus loin) tant au niveau des infrastructures de loisir (3 ponts), de la morphologie des anabranches (érosion) que de la forêt riveraine.

Au vu des dommages causés à la végétation et à la stabilité des berges (érosion), il est évident que l'événement peut être qualifié de formateur (débit formateur) pour la morphologie des anabranches.

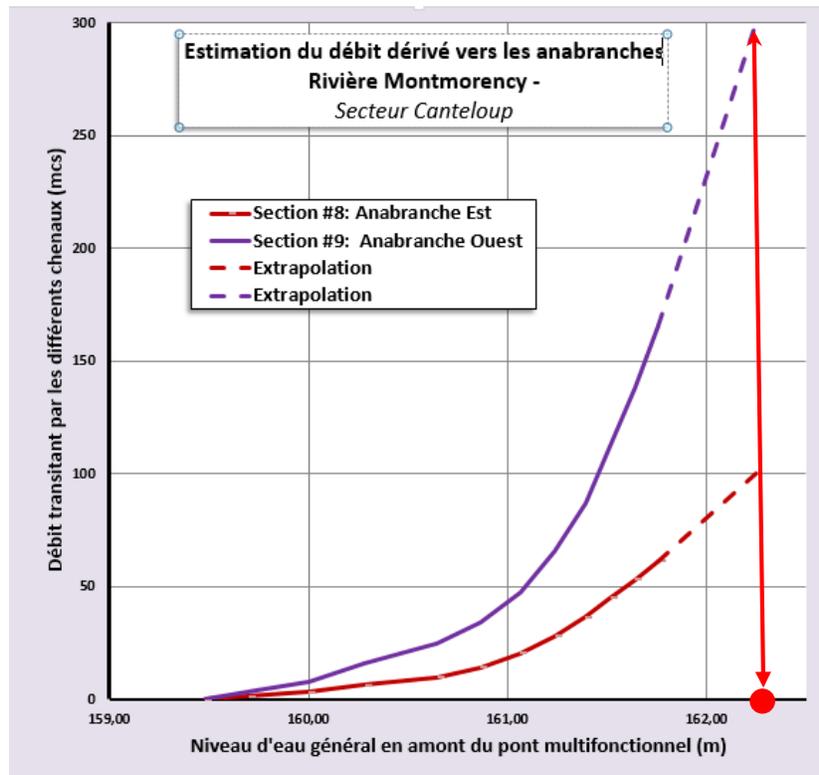


Figure 20 : Débits dérivés vers les anabranches du secteur Canteloup (Pont multifonctionnel) estimés indirectement selon le modèle H2D2 (Leclerc et Secretan, 2012) –

Note : Les segments extrapolés des courbes visent à estimer le résultat de la surélévation du niveau d'eau (à 162,25 m) dans le cours principal en lien avec l'embâcle du 16 avril 2014

Les embâcles, l'aléa dominant du secteur pour les risques

On peut aussi noter que le débit normal liquide qui se situe autour de 480 m³/s (450 au site) au maximum produit un niveau d'eau qui n'est normalement (sans glace embâclée ou en dévalaison) pas problématique nulle part. En revanche, en présence de glace, les niveaux d'eau sont majorés très significativement entre 1 et 2 m selon l'endroit. Les plus fortes majorations (ou ligne d'eau fortement inclinée) indiquent naturellement les lieux sensibles à l'engorgement qui peuvent donner lieu à des embâcles ou des ralentissements (restrictions latérales, présence de seuils, perte de puissance par redistribution des écoulements).

7 sections propices aux embâcles et/ou ralentissement

Ces endroits sont listés ci-après accompagnés d'une appréciation générale du comportement de l'aléa à ces endroits basé sur une observation à plus long terme:

1. Au droit de l'île Canteloup en amont du pont multifonctionnel (souvent le lieu de **l'embâcle principal**)
2. Le pont multifonctionnel (**embâcles**)
3. Seuil amont du rapide du Rigolet (amont du secteur résidentiel des Îlets) (**ralentissements**)
4. Prise d'eau des Îlets (**embâcles**)
5. Rétrécissement de la rivière vis-à-vis de la rue du Gouffre (**ralentissements**)
6. Seuil hydraulique aux limites de Boischatel ((**ralentissements, embâcles**))
7. Tête du rapide des Trois-Saults (indéterminé)

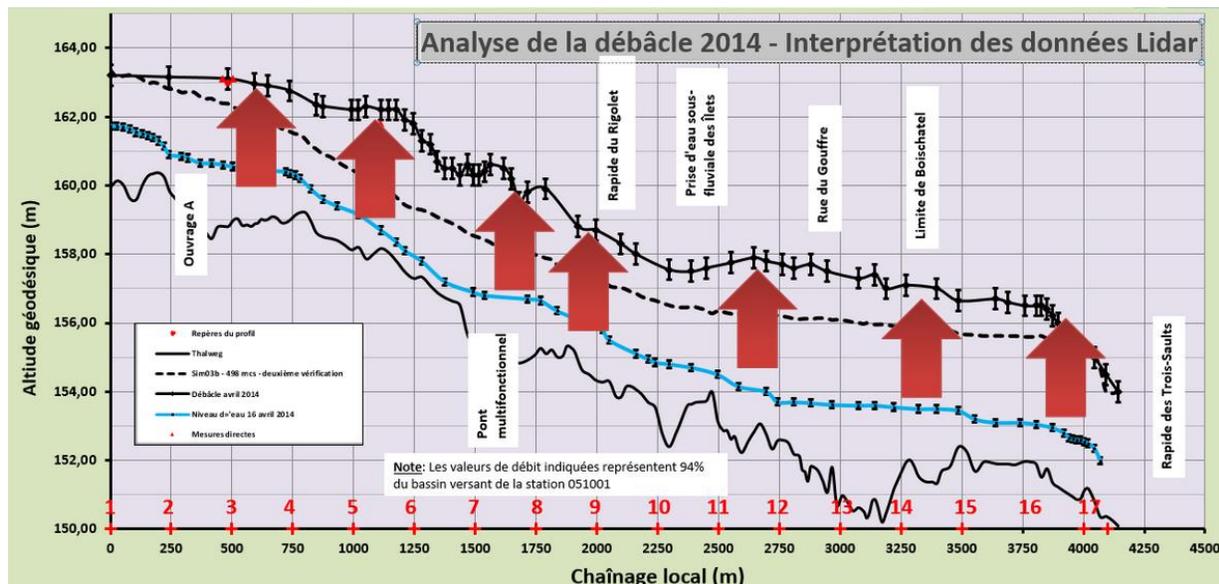


Figure 21 : Sections sensibles pour la génération d'embâcle et/ou de ralentissements du courant en cas de débâcle d'après l'interprétation de l'embâcle-débâcle 2014

L'approche statistique traditionnelle pour les crues à revoir

La Figure 18 permet de comparer l'événement du 15-16 avril 2014 à des crues à l'eau libre de différentes récurrences tel que proposé dans Leclerc et Secretan (2012). Les mêmes constats s'appliquent par rapport au rôle dominant joué par les processus glaciels dans ce tronçon de la rivière Montmorency. Ainsi la crue maximale simulée (équivalente à celle, historique, du 3 novembre 1966) est surpassée de près de 2 m à la hauteur de l'île Canteloup. C'est donc à l'évidence les crues glacielles qui ont le pouvoir formateur (*concept de débit formateur*) dominant sur les crues à l'eau libre. À la hauteur de la rue des Trois-Saults, entre du Gouffre et la limite avec Boischatel, le niveau d'eau atteint en 2014 est équivalent à une crue centenaire. Ailleurs les récurrences équivalentes (à l'eau libre) varient entre 1/20 ans et 1/100 ans.

Afin de se remémorer le comportement statistique des crues à l'eau libre, la figure suivante montre la loi statistique établie par le Professeur Ourada de l'INRS présentée dans Leclerc et Secretan (2012). Celle-ci présente la probabilité au dépassement de ces crues (moyennes horaires) au niveau de l'embouchure, soit à la station hydrométrique #051001. Au site, cette valeur est minorée de 6%. La méthode utilisée est celle dite au dépassement ou *Peak over Threshold*.

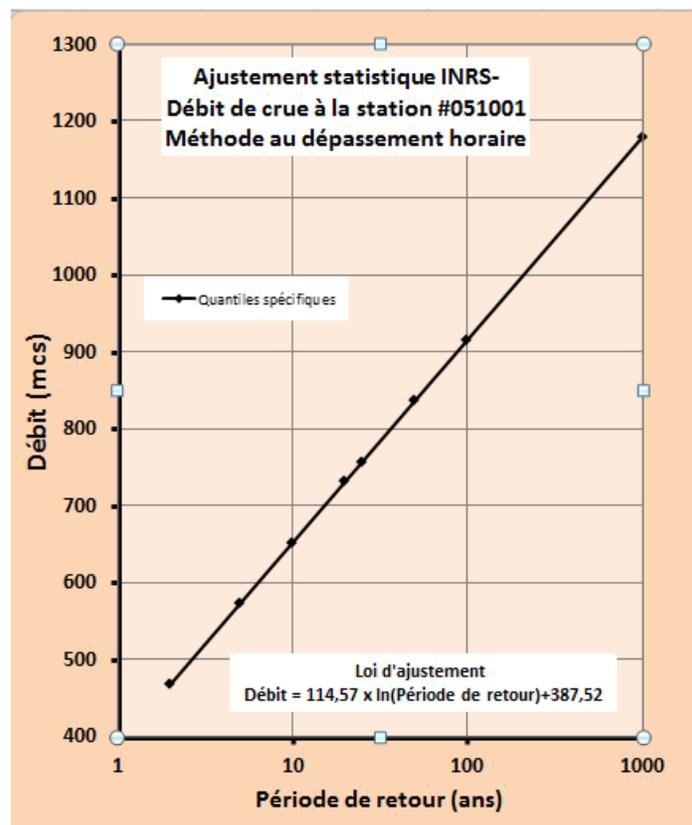


Figure 22 : Analyse statistique des crues à l'eau libre (moyennes horaires) d'après l'INRS (Ourada dans : Heniche *et al.*, 1999) –

Note : Les débâcles glacielles rehaussent les niveaux d'eau normalement observés pour le débit enregistré

Quelques observations relatives aux conséquences et aux dommages

L'annexe photographique fournit plusieurs informations visuelles relatives aux propos qui suivent. Le lecteur pourra s'y référer. Des cartes de localisation des photos sont fournies.

Les # des photos ne seront pas mentionnés ci-après sauf exception.

L'embâcle principal dans le secteur du pont multifonctionnel - Dommages rue de Canteloup

D'après les observations visuelles, le pied (limite aval) de l'embâcle principal (voir la Figure 8 pour le repérage) au pont multifonctionnel était situé à environ 200-300 m en amont du seuil du rapide du Rigolet en amont de la prise d'eau des Îlets; la tête de l'embâcle (amont) se situait à la hauteur de la rue de Canteloup où un épisode de submersion importante a été observé (50 cm –à 1 m dans les points bas de la rue selon des témoins oculaires). Cette information pourra être précisée lorsque les données Lidar obtenues seront disponibles pour analyse.

Au pied de la côte de la même rue, en continuant vers l'aval sur ce terrain privé, un lac artificiel derrière une digue située en berge à l'extrémité du terrain a subi des dommages importants; il s'est vidangé complètement suite à la rupture de la digue formant le périmètre de fermeture. Ce plan d'eau était sans doute en partie ou complètement en empiètement sur le cours principal. Lors de l'embâcle, la rivière s'est déversée dans ses anabranches de la rive gauche mais aussi dans un ancien lit colmaté par l'empiètement mentionné en rive droite.

Il ne semble pas que la nouvelle prise d'eau de Charlesbourg (Ouvrage A) ait été exposée aux conséquences de cet aléa. Par contre, il serait pertinent de vérifier l'évolution des alluvions grossières utilisées pour recouvrir le dispositif de captage sous-fluvial d'eau potable installé à cet endroit.

Par contre certains terrains résidentiels ont subi des dommages reliés à l'érosion des berges, et dans un cas par l'affouillement d'un mur de soutènement à sa base suivi d'un renversement dans le lit mineur. Cette propriété (Denis Gravel) a d'ailleurs été récemment expropriée.

Le secteur des anabranches comme trop-plein - Dommages importants au sentier de motoneige - Potentiel important de débris

Nous avons vu précédemment que le secteur des anabranches jouxtant le cours principal a servi de « parc à glace et de trop plein pour le débit au moment de l'embâcle. Ainsi, une quantité indéterminée mais importante d'eau et possiblement de glace a été dérivée du cours principal vers les anabranches (Figure 8) de ce secteur anastomosé (bras secondaires). Ce comportement a sans doute aidé à minimiser les dommages qu'auraient pu subir les riverains et infrastructures à cet endroit.

Par contre, sur les 3 ponts qui enjambent ces anabranches (sentier trans-canadien de motoneiges et quads), 2 ont été carrément emportés à 150 m en aval et gisent dans le lit mineur, le troisième pont situé immédiatement à proximité du pont multifonctionnel a aussi subi des dommages importants (déflexion

excessive, voilement de la structure) avec un partie de la travée arrachée. Enfin, une digue-chaussée récente reliant ce pont avec un autre sous la ligne hydroélectrique 750 kV a subi de lourds dommages (rupture) par surpassement suivi d'un ravinement transversal. Cette digue implantée transversalement dans la plaine inondable a pour effet d'y bloquer l'écoulement, malgré la présence d'un ponceau, et de le concentrer sous les deux ponts mentionnés. Ceux-ci n'offrant pas la section de passage suffisante pour la débâcle et les crues importantes, ils subissent des dommages récurrents années après années. Une solution durable devra éventuellement être trouvée à la fois pour les ponts et la chaussée submersible.

Enfin, il est à noter que la végétation riveraine dans le secteur des anabranches a subi de grands dommages par l'action directe de la glace (arbres arrachés, renversés ou écorchés), érosion massive des berges, nombreux débris mobilisés et/ou encore mobilisables. De nombreuses cicatrices glacielles sont encore observables sur les arbres. On peut déjà anticiper que lors d'une crue importante à venir, une quantité importante de débris ligneux pourraient être remobilisés sans qu'on puisse en prédire le comportement, surtout si ils se combinent à une débâcle future. C'est donc un enjeu qu'il faudra surveiller dans l'avenir. Des photos de ces différents dommages sont fournies en annexe.

Conséquences dans le secteur résidentiel amont et à la prise d'eau des Îlets

Dans le secteur résidentiel jouxtant en amont la prise d'eau des Îlets (Figure 8), les incon vénients habituels ont été constatés : isolement temporaire des propriétés par la submersion des chemins d'accès (côte de la « Carmichaelerie », côte de la rue des Trois-Saults ; voir les photos en annexe). Il est possible que certaines résidences aient subi de la submersion au niveau du sous-sol (donnée non vérifiée). Le bureau de la Sécurité civile pourrait documenter les dommages associés à cet évènement.

Les bassins de la prise d'eau ont été submergés de 50-80 cm au maximum de la débâcle (constat de l'auteur à 5h00 le 16 avril corroboré par les données LiDAR). Ce niveau d'eau est inférieur au seuil de la porte arrière du poste de pompage situé à la cote 158 m de sorte qu'aucun dommage n'y a été causé. Par contre de nombreux morceaux de banquise ont été déplacés vers les bassins sans causer de dommage significatif. La circulation de l'eau en provenance de l'amont (le « Rigolet » ou marais derrière le secteur résidentiel) se fait à même le fossé de ceinture de la prise d'eau et peut temporairement apporter une eau impropre à la consommation. Les segments fusibles implantés dans les digues des bassins n'ont pas lâché par l'action du ravinement sans doute en raison de leur état gelé au moment de la débâcle.

Portée spatiale de la débâcle vers le lac du Délaissé.

La destination finale de la glace lors de la débâcle a été l'entrée du lac du Délaissé (Figure 8) qui a vu son niveau d'eau monter rapidement sans toutefois que des dommages aux berges ou aux propriétés riveraines nous aient été rapportés après la débâcle. Par contre, tout le secteur boisé et de basse altitude (typiquement 112m) en rive droite du lac (côté ville de Québec) a servi de déversoir pour la glace en dévalaison. La banquise originale du lac est restée intacte sur une bonne partie du lac protégée par les nombreuses îles, du moins en date du 17 avril. Plus tard (à déterminer), il semble qu'une autre débâcle partielle a permis d'évacuer une partie de cette glace présente dans le cours principal vers le barrage des Marches-Naturelles de sorte que le reste devrait fondre en place.

Aucune propriété riveraine ne semble avoir subi de dommages reliés à ce comportement. Il est à noter que la partie inférieure de la rue de la Sablonnière (située dans le segment ayant servi d'exutoire pour la glace) s'est retrouvée envahie par 2 m de glace au minimum de sorte que les quelques résidents situés au bout de la rue ont dû être évacués en embarcation.

Une analyse plus détaillée de ce secteur est encore en cours. Les résultats seront rendus disponibles en temps et lieu.

Problématique du drainage de la sablière CSL-LOMA

Il est aussi à noter que la grande quantité de ruissellement a entraîné une accumulation importante d'eau dans les points bas de la sablière sud de CSL-LOMA situés à cote 130 m (Figure 23) le long de la rue de la Sablonnière. Résultant récemment de nouvelles activités d'extraction, le plan d'eau ainsi formé est délimité par une digue étroite et basse (bourellet de sable plutôt) qui le sépare de la rue de la Sablonnière. La mise en place récente de cette configuration topographique permet encore un certain niveau d'infiltration de surplus d'eau mais à terme l'accumulation de matières fines apportées par le ruissellement pourrait contribuer à colmater les couches superficielles et limiter l'infiltration.

Il est vraisemblable que lors d'un coup d'eau plus important et en tenant compte du colmatage progressif du fond de ce plan d'eau, cette digue pourrait être surpassée et rapidement ravinée mettant ainsi en péril l'intégrité de la rue de la Sablonnière, et conséquemment l'accès au quartier résidentiel situé plus loin en contrebas. D'ailleurs, le 17 avril 2014, un filet d'eau percolait sous la digue (renardière?) et un début de ravinement en travers de la rue de la Sablonnière était observable.

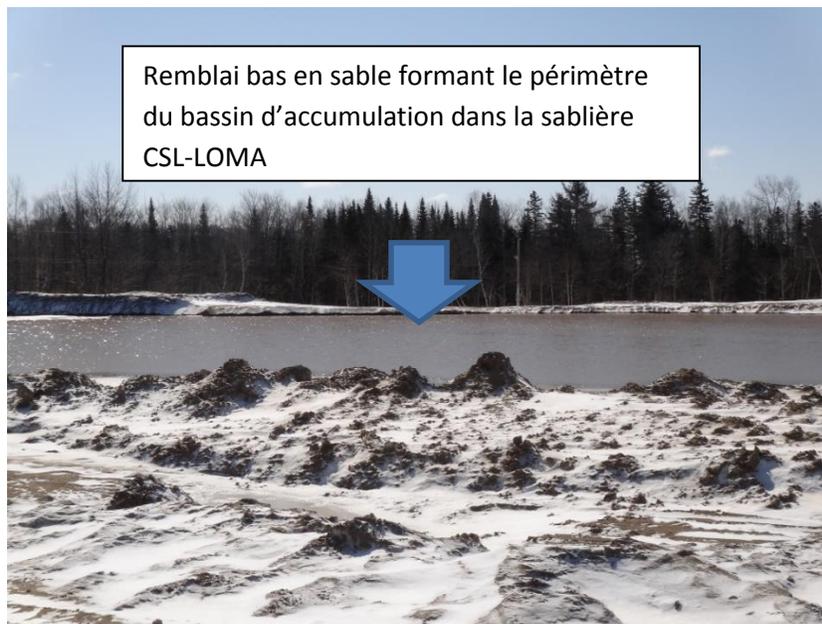


Figure 23: Bassin d'accumulation vulnérable au surpassement ou au ravinement dans la sablière sud CSL-LOMA jouxtant la rue de la Sablonnière (Photo ML, 2014)

Note : le niveau d'eau atteint sinon dépasse celui de la rue Sablonnière qui longe la sablière – Un surpassement du remblai de sable pourrait entraîner sa rupture suivie par un ravinement en travers de la rue et éventuellement sa coupure suite à la vidange brusque du bassin.

L'enjeu d'une crue géomorphique toujours possible au niveau de la rue du Torrent

Cette problématique concerne la possibilité d'une crue exceptionnelle mettant la table à un processus d'avulsion (bifurcation du cours principal de la Montmorency) à la hauteur de la rue du Torrent. Cette problématique a déjà été expertisée par l'INRS, la Ville de Québec et la CMQ. Des mesures préventives ont déjà été entreprises pour contrer sinon l'aléa lui-même, du moins la vulnérabilité (l'exposition) de la zone voisine à une telle éventualité.

Les facteurs déclencheurs d'un tel aléa cause pourraient être une combinaison quelconque de causes adverses telles que : un **débit de crue exceptionnel**, une **débâcle glacielle simultanée**, une **coulée de débris ligneux** (*debris flow*) ou encore **des mouvements de sol** (glissements de terrain) **majeurs** dans le secteur du pont multifonctionnel en rive droite (des précédents existent).

Dans une telle situation, il faut examiner attentivement la possibilité qu'une surélévation du niveau d'eau à la hauteur de la rue du Torrent ou encore aux limites de Québec avec Boischatel (rue des trois-Saults) atteigne un ancien délaissé de la rivière Montmorency (le boisé humide jouxtant la sablière sud de CSL-LOMA est situé à la cote 157 m), submerge le relief de la rue du Torrent et amorce un processus de ravinement en direction sud dont personne actuellement ne peut prédire la durée, l'évolution et les dommages. Or, ceux-ci pourraient s'avérer considérables, voire catastrophiques. Ultiment, il est vraisemblable que la rivière Montmorency puisse subir un changement de son cours normal en travers des sablières, un processus dit d'« avulsion » dont les conséquences humaines et financières sont si considérables que tout doit être fait pour l'éviter et ce, même si la probabilité demeure faible quoiqu'inconnue.

Lors de la débâcle 2014, des blocs de béton (57) ont été accumulés à proximité du réservoir des Îlets; ils auraient permis, le cas échéant, de mettre en place un périmètre de fermeture temporaire (digue ou batardeau) et prévenir le ravinement et l'avulsion redoutés.

Recommandation : cette solution temporaire devrait être pérennisée par un reprofilage adéquat et permanent de la rue du Torrent (rehaussement à la hauteur du réservoir des îlets) ainsi qu'une réorganisation du drainage pluvial du secteur (fossés).

Il demeure donc impérieux de planifier une telle mesure pour les occurrences futures de tels aléas, d'autant plus qu'on ne peut garantir à long terme le niveau de vigilance remarquable des autorités en 2014.

Aspect humain et psycho-social.

Est-il besoin de mentionner que plusieurs personnes ont subi cet événement avec un grand stress? Par exemple, certains propriétaires riverains ont rapporté que le passage de la débâcle a été similaire à un tremblement de terre qui peut durer près de 10 minutes, voire plus. Il est important que les intervenants publics puissent faire preuve d'un minimum d'empathie en ces circonstances et de rassurer les gens qui

les subissent, plus particulièrement ceux qui n'ont pas encore intégré l'expérience de cohabiter avec ce genre de risque.

Une gestion intégrée et concertée du risque à l'échelle du bassin versant

La démarche préconisée par la Politique nationale de l'eau et véhiculée par les Plans directeurs de l'Eau produits par les organismes de bassins versants (OBV) visant une gestion intégrée à l'échelle territoriale du bassin de la Montmorency a été appliquée rigoureusement par l'ensemble des intervenants. Dans le cas de la Montmorency, les enjeux reliés à la gestion intégrée des risques sont considérés comme prioritaires pour la sécurité des riverains et des infrastructures publiques d'eau et de voirie. La Ville de Québec a pris l'initiative de coordonner la concertation avec les autres Municipalités du bassin.

Conçue au départ pour une application à la qualité de l'eau, cette approche est aussi hautement recommandée, voire nécessaire à la gestion des risques hydrologiques, qu'il s'agisse d'étiages ou de crues. Cette nécessité s'explique par la nature de l'aléa qui se propage d'amont en aval; ainsi les intervenants de l'amont contribuent de l'information en temps réel aux autres situés en aval. Ils contribuent ainsi à une gestion plus efficace en situation opérationnelle.

Son application rigoureuse dans le contexte doit être soulignée car c'est l'approche la plus efficace pour faire face à de telles situations. La soudaineté de tels aléas ajoutée à leur caractère imprévisible, du moins à court terme (heures), et chaotique aussi, rend de telles situations difficiles à gérer efficacement dans le temps. D'autant plus que les phases critiques de l'aléa peuvent se produire au milieu de la nuit alors que la population dort (pas tous) et que les effectifs pour l'intervention sont en nombre réduit.

La coordination des opérations par la Ville s'est faite sous la forme d'une conférence téléphonique quotidienne (15h30) où tous les intervenants au dossier pouvaient apporter ses connaissances et observations en vue de l'intervention en préparation. Un support géomatique était aussi disponible au centre des mesures d'urgence de Beauport (Centrale de police).

Sous la responsabilité du Service Environnement de la Ville de Québec (Jacques Deschênes, responsable), le bassin de la rivière Montmorency bénéficie de prévisions de débit en provenance du Centre d'Expertise hydrique du Québec (MDDEFP) et de la firme Hydrométéo (Pierre Corbin, géophysicien). Ces prévisions gagneraient à être plus précises avec de meilleures données météorologiques à la tête du bassin mais elles fournissent tout de même une indication précieuse sur les pointes de débits anticipées, sur leur synchronisme et sur la probabilité du déclenchement d'une débâcle.

D'autres données hydrométéorologiques sont également mobilisées sur le bassin, notamment aux stations hydrométriques du CEHQ #051001 (Marches-Naturelles; 1100 km²) et #051005 (0,3 km amont de la Blanche; 267 km²), à la Forêt Montmorency (#051002-#051004) et au barrage de la prise d'eau de Boischatel sur le ruisseau Ferré. L'analyse des valeurs de débit spécifique (en m³/s/km²) aux différentes stations proposée par A. Bouillon de la CMQ donne aussi une bonne indication du comportement spatial relatif du bassin. On obtient ainsi une approximation de la distribution du ruissellement dans le bassin.

Dès que les premières indications d'une crue importante et d'une débâcle anticipée se sont avérées, le Bureau de la Sécurité civile de la Ville de Québec (équipe dirigée par Christian Boily et Claude Pigeon) a pris contact avec la Municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval (Claude Côté, Sécurité publique) et avec celle de Boischatel (Carl Michaud, DG) afin de coordonner la cueillette d'informations en situation de veille et la relayer aussitôt d'amont en aval. Ainsi la Ville de Québec a été tenue constamment informée de la progression de la situation par les agents de Sainte-Brigitte-de-Laval. Ces données s'ajoutaient à celles obtenues par l'équipe du département de Génie civil de l'Université Laval (B. Morse, B. Turcotte) qui conduit des recherches glaciologiques au nord du secteur urbanisé de la rivière.

Recommandations

La rareté et le potentiel destructeur prédominant de tels événements glaciels nous rappellent, si besoin est, l'importance de la prévention en de telles circonstances. Une prévention efficace nécessite une bonne connaissance de l'aléa, de sa dynamique et de l'exposition des éléments vulnérables à ce genre d'événement. Heureusement, la Ville a su prendre une décision judicieuse en autorisant la conduite d'un relevé LiDAR des délaissés de crue et en procédant à un suivi constant des phases de l'aléa.

Il est maintenant le temps de s'interroger sur l'adéquation de nos connaissances et de nos critères de décision face à de telles situations. Nous recommandons de :

- Examiner les moyens requis pour améliorer la prévision hydrologique par une meilleure information météorologique en provenance de la tête du bassin versant (nouvelles stations)
- Implanter un accès internet aux données limnimétriques (niveau d'eau) relevées aux prises d'eau des îlets et à l'Ouvrage A
- Automatiser et implanter l'accès internet aux données limnimétriques au barrage de la prise d'eau de Boischatel
- Pérenniser une solution visant à contenir les crues majeures au niveau de la rue du Torrent et prévenir le phénomène géomorphique (avulsion du cours d'eau)
- Compléter l'interprétation des données de débâcle-embâcle disponibles (volume de glace, séquence précise des phases de l'aléa, etc.) pour les secteurs amont (Sainte-Brigitte-de-Laval) et aval (Québec et Boischatel)
- Mettre à jour le modèle numérique de terrain du secteur Trois-Saults – Ouvrage A et éventuellement procéder à un relevé topographique des secteurs ayant subi des transformations morphologiques significatives, notamment face à la prise d'eau des îlets et à l'entrée des anabranches (seuils), particulièrement celle directement en amont de l'île de Canteloup fortement sollicitée lors de la débâcle
- Mettre à jour expérimentalement le modèle de simulation hydrodynamique H2D2 de l'INRS en y introduisant l'effet de la glace embâclée et/ou en dévalaison; pour ce faire, une adaptation du modèle conceptuel ou de la paramétrisation est requise
- Tester numériquement l'influence de la composante transitoire de cette crue subite
- Documenter les dommages matériels aux biens (résidences et infrastructures) associés à cet événement (Bureau de la Sécurité civile)

Bibliographie

Heniche, M., M. Leclerc, Y. Secretan et Taha Ouarda (1999). Travaux d'atténuation des risques de crue à l'eau libre de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets – Phase 2. Mise à jour de l'analyse hydrologique, dimensionnement des travaux d'atténuation et analyse de l'impact sur les risques résiduels de dommage aux résidences. Rapport scientifique INRS-Eau #R555

Leclerc, M. et Y. Secretan (2012). Reconstruction de la prise d'eau de l'Arrondissement Charlesbourg – Modélisation hydrodynamique de la rivière Montmorency entre les Trois-Saults et le secteur Cantaloup. Rapport INRS #1416. 111 pages et 6 annexes.

<http://www1.ete.inrs.ca/pub/rapports/R001416.pdf>

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.

Turcotte, B., Morse, B et F. Pigeon (2015a) dynamique de la débâcle de l'hiver 2013-2014 - Rivière Montmorency, Université Laval, Génie civil

Turcotte, B., Morse, B et F. Pigeon (2015b) Guide de la débâcle des glaces sur la rivière Montmorency Université Laval, Génie civil

Annexe 2 – Couverture photographique

Des cartes de localisation des images sont fournies après la liste des photographies. Les documents originaux ont été mis à disposition de la Ville de Québec. Les métadonnées (fichier numérique) de ces documents permettent d'en préciser la date et l'heure de captation.



Figure 24 : Carte de repérage des photographies dans le secteur des îlets



Figure 25 : Carte de repérage des photographies dans le secteur de la rue des Trois-Saults



Figure 26 : Carte de localisation des photographies dans le secteur de la rue des anabranches et du pont multifonctionnel

Liste des photographies prises par l'auteur

Photo 1: Segment des îlets de la rue des Trois-Saults inondé – Secteur résidentiel des îlets isolé	43
Photo 2: Segment Carmichael de la rue des Trois-Saults inondé – Secteur résidentiel des îlets isolé.....	43
Photo 3: Périmètre des bassins de la prise d'eau des îlets submergé (début) – L'eau provient du marais (derrière le secteur résidentiel des îlets) qui est alors connecté sur le cours principal	44
Photo 4: Périmètre des bassins de la prise d'eau des îlets – Délaissés de glace après la débâcle	44
Photo 5: Périmètre des bassins de la prise d'eau des îlets – Délaissés de glace après la débâcle	45
Photo 6: Bas de la rue de la Sablonnière (côte) inondé – Secteur résidentiel isolé	45
Photo 7 : Rue de la Sablonnière (lac du Délaissé en arrière-plan) envahi par la glace	46
Photo 8 : Lac du Délaissé en arrière-plan - Berges envahies par la glace; le chenal principal a débâclé...	46
Photo 9: Lac du Délaissé vue du Camping municipal – La banquise est demeurée intacte après la débâcle; Elle fondra en place.....	47
Photo 10 : Vue de l'embouchure du lac du Délaissé à partir du centre de loisir de Boischatel	47
Photo 11 : Pied du rapide des Trois-Saults après la débâcle principale le 16 avril 2014 au matin	48
Photo 12: Murs de cisaillement délaissés par la débâcle – Poste de pompage des îlets en arrière-plan ..	48
Photo 13: Érosion active face à la prise d'eau des îlets(rive gauche) – Morphologie en transformation ..	49
Photo 14: En rive gauche de la rue des Trois-Saults – Plusieurs talus de berges fragilisés – Débris mobilisables.....	49
Photo 15: En rive droite de la rue des Trois-Saults – Plusieurs talus de berges fragilisés – Murs de cisaillement de glace en partie responsables de mouvements de sols	50
Photo 16 : Talus en recul à proximité d'habitations – Intervention sans doute requise	51
Photo 17: Secteur des anabranches en rive gauche – Cicatrices glacielles fraîches (hauteur 2 m environ) 1/2	52
Photo 18: Secteur des anabranches en rive gauche – Cicatrices glacielles fraîches (hauteur 2 m environ) 2/2	53
Photo 19: Pont multifonctionnel en rive gauche – L'embâcle a contourné la culée gauche.....	54
Photo 20: Sentier de motoneiges – Secteur des anabranches – Pont arraché par la débâcle – Photo 1/254	
Photo 21: Sentier de motoneiges et quads – Secteur des anabranches – Pont arraché par la débâcle – Photo 2/2.....	55
Photo 22 : Site du deuxième pont arraché sur le sentier des quads – La tranchée dans la glace correspond à l'anabranchement la plus à l'est	55
Photo 23 : Alluvions 10-20 cm laissées par la banquise – L'empreinte des cailloux est visible dessous....	56
Photo 24 : Vue amont à partir du pont multifonctionnel	56
Photo 25 : Vue aval à partir du pont multifonctionnel	57
Photo 26 : Vue aval du premier pont fragilisé après le pont multifonctionnel	57
Photo 27: On n'arrête pas les sports extrêmes –Kyakistes se préparant à sauter les Trois-Saults – Départ au coin des rues du Gouffre et Trois-Saults (escalier public).....	58



Photo 1: Segment des îlets de la rue des Trois-Saults inondé – Secteur résidentiel des îlets isolé



Photo 2: Segment Carmichael de la rue des Trois-Saults inondé – Secteur résidentiel des îlets isolé



Photo 3: Périmètre des bassins de la prise d'eau des Îlets submergé (début) – L'eau provient du marais (derrière le secteur résidentiel des Îlets) qui est alors connecté sur le cours principal



Photo 4: Périmètre des bassins de la prise d'eau des Îlets – Délaissés de glace après la débâcle



Photo 5: Périmètre des bassins de la prise d'eau des Îlets – Délaiés de glace après la débâcle



Photo 6: Bas de la rue de la Sablonnière (côte) inondé – Secteur résidentiel isolé



Photo 7 : Rue de la Sablonnière (lac du Délaissé en arrière-plan) envahi par la glace



Photo 8 : Lac du Délaissé en arrière-plan - Berges envahies par la glace; le chenal principal a débâclé



Photo 9: Lac du Délaissé vue du Camping municipal – La banquise est demeurée intacte après la débâcle; Elle fondra en place



Photo 10 : Vue de l'embouchure du lac du Délaissé à partir du centre de loisir de Boischatel



Photo 11 : Pied du rapide des Trois-Sauts après la débâcle principale le 16 avril 2014 au matin



Photo 12: Murs de cisaillement délaissés par la débâcle – Poste de pompage des Îlets en arrière-plan



Photo 13: Érosion active face à la prise d'eau des Îlets (rive gauche) – Morphologie en transformation



Photo 14: En rive gauche de la rue des Trois-Saults – Plusieurs talus de berges fragilisés – Débris mobilisables



Photo 15: En rive droite de la rue des Trois-Sauts – Plusieurs talus de berges fragilisés – Murs de cisaillement de glace en partie responsables de mouvements de sols



Photo 16 : Talus en recul à proximité d'habitations – Intervention sans doute requise



Photo 17: Secteur des anabranes en rive gauche – Cicatrices glacielles fraîches (hauteur 2 m environ)
1/2



Photo 18: Secteur des anabranes en rive gauche – Cicatrices glacielles fraîches (hauteur 2 m environ)
2/2



Photo 19: Pont multifonctionnel en rive gauche – L’embâcle a contourné la culée gauche



Photo 20: Sentier de motoneiges – Secteur des anabranches – Pont arraché par la débâcle – Photo 1/2



Photo 21: Sentier de motoneiges et quads – Secteur des anabranches – Pont arraché par la débâcle – Photo 2/2



Photo 22 : Site du deuxième pont arraché sur le sentier des quads – La tranchée dans la glace correspond à l’anabranchement la plus à l’est



Photo 23 : Alluvions 10-20 cm laissées par la banquise – L’empreinte des cailloux est visible dessous



Photo 24 : Vue amont à partir du pont multifonctionnel



Photo 25 : Vue aval à partir du pont multifonctionnel



Photo 26 : Vue aval du premier pont fragilisé après le pont multifonctionnel



Photo 27: On n'arrête pas les sports extrêmes –Kyakistes se préparant à sauter les Trois-Saults – Départ au coin des rues du Gouffre et Trois-Saults (escalier public)