Analyse de la signature laissée par le tsunami généré par un glissement de terrain à Lac-des-Seize-Îles, Québec, Canada, le 15 avril 2014





Section des mouvements de terrain, Service de la géotechnique et de la géologie, Ministère des Transports, Québec, Québec, Canada

ABSTRACT

On April 15th 2014, a landslide occurred on the shore of a lake in the municipality of Lac-des-Seize-Îles, 100 km north of Montréal. The landslide mobilised an estimated volume of 30,500 m³ of till and triggered a tsunami that lifted and broke the ice cover, causing partial or complete destruction of seasonal residences, docks and boathouses in an area extending 450 m north and 500 m south of the impact location. Aerial photographs taken shortly after the event showed the existence of radial fractures on the ice cover, revealing the wave propagation pattern. A bathymetric survey conducted in 2013 by the Université de Montréal made possible the determination of the lake depth in the affected area. Field investigations showed evidences of net marks on tree trunks explained by ice impact and associated with the inundation height.

RÉSUMÉ

Le 15 avril 2014, un glissement de terrain s'est produit sur la berge d'un lac dans la municipalité de Lac-des-Seize-Îles, à 100 km au nord de Montréal. Le glissement a mobilisé un volume estimé à 30 500 m³ de till et a généré une vague qui a soulevé et brisé le couvert de glace du lac, provoquant la destruction partielle ou totale de nombreuses résidences saisonnières, quais et abris à bateaux sur près de 450 m au nord et 500 m au sud du glissement. Des photographies aériennes prises peu de temps après l'événement ont révélé l'existence d'un patron de fissurations radiales sur la glace, montrant la propagation de la vague. Des données bathymétriques issues des sondages de l'Université de Montréal en 2013 ont permis de déterminer la profondeur du lac dans la zone affectée. Des investigations de terrain ont permis d'observer des marques sur des troncs d'arbre expliquées par le choc des fragments de glace et associées à la hauteur d'inondation.

1 INTRODUCTION

Selon la base de données du Ministère des Transports du Québec, les tsunamis générés par un glissement de terrain sont relativement fréquents au Québec (par exemple Saint-Étienne-des-Grès en 2004, Longue-Rive en 2005 et Nicolet en 2006), mais les impacts qui y sont associés sont généralement restreints. Malgré tout, certains cas documentés ont eu des conséquences beaucoup plus importantes. On pense notamment au glissement de terrain de la rivière La Grande à la Baie James en 1987 qui a généré un tsunami, dévastant une large portion de la rive opposée jusqu'à une élévation de 14 m au-dessus du niveau de la rivière (Lefebvre et al., 1991, Locat et al., ce volume), de même qu'au glissement de Notre-Dame-de-la-Salette en 1908 où l'eau et la glace entraînés par l'étalement des débris dans la rivière du Lièvre ont détruit une portion du village et causé le décès de 33 personnes (Ells, 1908, Locat et al., ce volume).

Plus récemment, le 15 avril 2015, dans la municipalité de Lac-des-Seize-Îles, Québec, Canada (Figure 1), la fonte rapide du couvert neigeux jumelée à des pluies intenses ont provoqué un glissement de terrain d'environ 30 500 m³ (Leblanc et al., 2015). Le matériel mobilisé, situé sur la berge est, s'est étalé au fond du lac et a

généré un tsunami qui a partiellement soulevé et brisé le couvert de glace initialement intact. De nombreuses résidences saisonnières ont été endommagées ou détruites dans l'événement, dont l'une par le glissement et quatre autres par la vague d'eau et de glace durant l'inondation des rives. Plusieurs quais et abris à bateaux ont aussi été sévèrement affectés dans une zone s'étalant sur une distance d'environ 500 m autour du point d'impact du glissement à la surface du lac. Mis à part les dommages matériels causés par le tsunami, certains résidents ont dû être évacués, voire même temporairement isolés, puisque le couvert de glace était l'unique chemin d'accès hivernal de plusieurs habitations. Heureusement, cet événement n'a occasionné aucun décès ni blessés. Ce cas est particulièrement intéressant puisque des photographies aériennes ont été prises environ une semaine après l'événement, permettant de révéler la présence d'une série de fissures radiales sur le couvert de glace de la zone affectée, indicatrice de la propagation du front de vague.

Il existe très peu de cas dans la littérature concernant les effets d'un couvert de glace sur la propagation d'un tsunami, et ce particulièrement pour de faibles profondeurs d'eau (Jørstad, 1968, Murty et Polavarapu, 1979, Vanneste et al., 2010, Wang et al., 2015). Les



Figure 1 : Carte de localisation du lac des Seize-Îles, Québec, Canada. La figure comprend aussi une carte bathymétrique de la moitié supérieure du lac. La zone affectée est présentée en détail à la Figure 3.

objectifs de cet article sont d'illustrer et d'analyser la signature laissée par le tsunami sur le couvert de glace ainsi que de souligner le rôle de cette glace en tant que facteur aggravant potentiel pour l'intégrité des infrastructures côtières.

2 MÉTHODOLOGIE

Des données bathymétriques du lac, une série de photographies aériennes, une investigation de terrain ainsi que le témoignage de certains résidents ont été utilisés pour l'analyse du glissement de terrain et du tsunami du lac des Seize-Îles. Les données bathymétriques ont été obtenues en juin 2013, soit avant le glissement, par une équipe de chercheurs de la Station de biologie des Laurentides de l'Université de Montréal. Le levé a été réalisé avec un échosondeur scientifique BioSonics à faisceau étroit relié à un GPS recevant en temps réel une correction différentielle d'une précision d'environ 10 cm. Les données ont par la suite été interpolées dans le but de créer un modèle numérique de terrain. Les photographies aériennes ont été prises par le Ministère des Transports du Québec, environ une semaine après l'événement. Leur résolution est de 7 cm et la zone couverte correspond au secteur affecté, soit la

portion nord du lac. L'investigation de terrain a été réalisée après l'événement, les 21 et 22 avril 2014. Elle a permis de caractériser la cicatrice du glissement de terrain ainsi que le matériel mobilisé. Des indices permettant de caractériser le processus d'inondation du tsunami, principalement la hauteur d'inondation et la limite de pénétration de l'eau sur la rive, y ont aussi été compilés. Finalement, plusieurs témoins de l'événement ont été rencontrés durant cette visite de terrain.

3 MORPHOLOGIE DES CÔTES ET DU LAC

Les dépôts d'origine glaciaire que l'on retrouve dans le secteur ont une épaisseur variable et sont sus-jacents au socle rocheux gneissique. Le talus monte une inclinaison d'environ 28° et est composé d'un till sableux à graveleux contenant des blocs angulaires à sub-angulaires dont le diamètre varie entre 1 et 2 m.

Le lac des Seize-Îles est situé à une élévation moyenne de 278 m au-dessus du niveau moyen des mers et couvre une superficie totale de 3,5 km². La carte bathymétrique réalisée à partir du levé de juin 2013 (Figure 1) montre la présence d'une fosse de 67 m de profondeur, localisée beaucoup plus loin au sud de la



Figure 2 : Cicatrice du glissement de terrain survenu à Lac-des-Seize-Îles, dont la longueur est de 94 m et la largeur de 55 m, tel qu'observé à partir de la rive ouest du lac.

cicatrice du glissement de terrain. Dans le secteur affecté, la profondeur d'eau maximale est plutôt de 23 m et se retrouve au niveau d'une série de deux fosses au sud. Avant que l'événement ne se produise, dans la zone de déposition du glissement, la profondeur d'eau était relativement constante à 6 m avec une dépression de 10 m à une distance de 130 m de la rive est. Plusieurs îles peuvent être observées sur le lac, dont deux qui sont localisées au nord-ouest du glissement de terrain. Cellesci sont particulièrement importantes puisqu'elles ont eu une influence sur la propagation du tsunami. L'investigation de terrain a révélé que le couvert de glace était relativement constant à 0.66 m d'épaisseur avant l'événement. Des témoins ont aussi mentionné que le niveau d'eau du lac était 0,5 m plus élevé que la normale, ce qui est commun tôt au printemps.

Concernant les infrastructures côtières retrouvées sur le pourtour du lac des Seize-Îles, il est possible d'observer de nombreuses résidences saisonnières, de même qu'une marina sur la pointe nord du lac. Les résidences sont toutes équipées d'au moins un quai ou un abri à bateau. Mis à part la présence de sentiers étroits de chaque côté du lac, le seul accès entre la partie centrale de la municipalité et les résidences saisonnières est le lac en été ou une route temporaire aménagée sur le couvert de glace en hiver.

4 LE GLISSEMENT DE TERRAIN

Comme mentionné précédemment, le matériel mobilisé lors du glissement de terrain est constitué de till (Figure 2). La longueur de la surface de rupture est de 94 m alors que sa largeur vis-à-vis la ligne de rivage est de 55 m. L'épaisseur moyenne du matériel mobilisé est de 6,5 m, pour un volume total de 30 500 m³. Les débris, mis en évidence par la ligne tiretée bleue à la Figure 3, émergent de la surface de l'eau et peuvent être observés jusqu'à une distance de 68 m de la rive sur les photographies aériennes. À partir de ce point, l'angle de parcours est de 13°. Cet événement peut être interprété comme un glissement planaire dans un dépôt granulaire sus-jacent à un socle rocheux caractérisé par une surface polie.

Dans les jours précédant l'événement, la région a été sujette à de fortes pluies associées à un réchauffement de la température, entraînant une fonte rapide du couvert neigeux. Cet apport important en eau a été observé durant l'investigation de terrain, par une accumulation d'eau de ruissellement en sommet de talus, derrière l'escarpement arrière du glissement de terrain. De plus, plusieurs évidences de ruissellement d'eaux souterraines ont été notées à l'intérieur de la cicatrice. Cet apport important en eau, modifiant les pressions interstitielles, pourrait être un facteur déclenchant raisonnable permettant d'expliquer ce glissement de terrain (Turner et Schuster, 1996).

5 LE TSUNAMI

5.1 La propagation du front de vague

Les traces de la propagation du tsunami peuvent être observées sur les photographies aériennes par la fracturation du couvert de glace (Figure 3). En effet, en se propageant, le front de vague a généré des fissures radiales sur la glace, ayant comme point de départ la zone de déposition du matériel mobilisé. Le patron de propagation s'étend jusqu'à 500 m au sud et 450 m au nord du glissement. Celui-ci est difficile à mettre en évidence dans un rayon d'environ 75 m près de la cicatrice, puisque l'impact du matériel mobilisé a eu un effet majeur sur la fracturation de la glace, laquelle est beaucoup plus irrégulière dans ce secteur. En s'éloignant, le patron devient beaucoup plus régulier, avec un espacement variant entre 10 et 15 m entre les fractures.



Figure 3 : Photographies aériennes prises peu de temps après l'événement et montrant le secteur affecté par le tsunami qui a soulevé et brisé le couvert de glace, initialement intact, dans un rayon de 450 m autour de la zone d'impact du glissement de terrain. Ce secteur correspond à la zone affectée mise en évidence à la Figure 1.

Cet espacement augmente jusqu'à environ 20 m à la limite sud de la zone affectée, coïncidant avec la présence d'une fosse plus profonde atteignant jusqu'à 23 m.

La première île, localisée à 170 m au nord-ouest de la cicatrice du glissement de terrain, ne semble pas avoir eu d'effet sur la propagation du tsunami (Figure 3). En effet, les fissures observées sur la glace derrière l'île sont relativement continues et il n'y a pas de changement évident de la direction de propagation du front de vague. Par contre, les observations faites sur la deuxième île, à 300 m au nord-ouest de la cicatrice, sont totalement différentes. En effet, il est possible d'observer le phénomène de diffraction dans la zone d'ombre de l'île, où il y a une absence de fissuration sur le couvert de glace. Thomson (1981) prétend que ce phénomène est observé lorsque seulement une portion de l'énergie de la vague se fraie un chemin à l'arrière de l'île qui agît à titre de barrière de protection.

Des signes de mouvements similaires à du cisaillement sont observés sur le couvert de glace (Figure 3). Ceux-ci sont perpendiculaires à la ligne de rivage et sont principalement observés sur les routes d'accès, situées de part et d'autre du lac. Ce cisaillement est associé à la remontée de l'eau durant l'inondation des berges dans les zones peu profondes, de même qu'à la réflexion des vagues vers la rive opposée. Le cisaillement moyen est de 2,6 m dans la zone affectée.

Au moins deux témoins ont vu l'évolution du tsunami durant l'événement. Le premier a prétendu que la vague d'eau et de glace avait une hauteur de 2 m durant la propagation. De plus, il a dit avoir observé la réflexion des vagues de la rive ouest à la rive est. Le deuxième a aussi observé deux vagues, dont l'une était issue d'une réflexion sur la rive ouest. Il a prétendu pour sa part que la hauteur de la vague était de 2,5 à 3 m durant la propagation, spécifiant que cette hauteur avait diminué de manière importante au moment où la vague avait atteint la marina au nord du lac.

5.2 L'inondation des berges

La hauteur d'inondation, associée à la différence entre le niveau d'eau au moment de l'inondation et le niveau d'eau initial lors de la visite de terrain calculé à la ligne de rivage, a été estimée à partir de marques engendrées par l'impact des blocs de glace sur les troncs d'arbres sur la rive. Ces évidences ont été observées de chaque côté du lac au moment de la visite de terrain. Sur la rive ouest, en face de la cicatrice du glissement de terrain, la hauteur



Figure 4 : a) Marques laissées sur les arbres par les blocs de glace lors de l'inondation de la berge ouest du lac. b) Résidence saisonnière sévèrement endommagée par l'eau et la glace durant l'inondation sur la berge ouest, directement en face du glissement de terrain.

d'inondation mesurée est de 1,1 m à une distance de 11 m de la ligne de rivage. À 50 m plus au nord, ces marques ont été mesurées à 1,5 m (Figure 4a). La hauteur d'inondation semble avoir atteint 1,8 m à 260 m au sud de la position projetée du glissement de terrain sur la rive ouest du lac. Il y a beaucoup moins d'évidence de l'impact des blocs de glace sur les arbres de la rive est. À 20 m au sud de la cicatrice, l'eau semble avoir atteint une hauteur de 1 m. Il en est de même plus au sud, à 370 m du glissement de terrain. Les positions des différentes mesures de hauteur d'inondation sont présentées à la Figure 3.

Les distances d'inondation ainsi que l'élévation maximale atteinte par l'eau à la limite de la pénétration de celle-ci sur les rives ont été déterminées à partir des dommages générés par les vagues sur les photographies aériennes, des observations issues de la visite de terrain et d'un modèle numérique d'élévation du secteur touché (Base de données topographique du Québec [BDTQ], 2009). En face du glissement de terrain, sur la rive ouest, la distance d'inondation est d'environ 10 à 15 m et la limite de pénétration de l'eau correspond à une élévation de 290 m. En s'éloignant de cette zone, toujours sur la rive ouest, la distance d'inondation diminue pour atteindre 5 à 6 m alors que l'élévation de la limite de pénétration de l'eau atteint 280 m. Très peu de changements sont observés sur la rive est du lac, où la distance d'inondation est de 5 m au nord et 10 m au sud de la cicatrice du glissement de terrain. La limite de pénétration de l'eau atteint, elle aussi, une élévation de 280 m.

5.3 Les conséquences de l'événement

En ce qui a trait aux infrastructures côtières présentes dans la zone affectée, une résidence saisonnière, située au pied du glissement de terrain sur la rive est du lac, a été complètement détruite et emportée par le matériel mobilisé lors du glissement de terrain. Quatre autres résidences, localisées sur la rive ouest, en face de la cicatrice, ont été sévèrement endommagées par l'eau et la glace. Une d'entre elles a été entièrement arrachée de sa fondation et entraînée vers le lac (Figure 4b). La majorité des quais et des abris à bateaux dans la zone affectée ont été endommagés ou détruits. Les dommages matériels semblent indiquer que la zone affectée s'étend plus loin au sud que ce que laisse suggérer le patron de propagation. Ces dommages sont d'ailleurs associés à la présence de fractures parallèles à la ligne de rivage sur des bandes étroites de 5 à 10 m. Les quelques résidents présents sur les lieux après l'événement ont été évacués préventivement. Deux d'entre eux ont été temporairement isolés en raison de la destruction de la route d'accès sur le couvert de glace.

6 DISCUSSION

L'impact des débris du glissement de terrain de Lac-des-Seize-Îles a initié un tsunami qui s'est propagé sous un couvert de glace dans toute la portion nord ainsi qu'à au moins 500 m vers le sud du lac. En se propageant, le front de vague a soulevé puis brisé la glace en formant un patron de fissuration radial, avec les débris mobilisés au fond du lac comme point de départ. Le front de vague entraîne le fléchissement de la plaque de glace intacte, générant ainsi des déformations suffisantes afin d'initier une rupture (Liu et Mollo-Christensen, 1988, Kohout et Meylan, 2008). Squire (1993) explique à partir d'études et de modèles théoriques que, pour une amplitude de vague constante, les déformations maximales appliquées sur une plaque de glace sont localisées à une distance constante de la lisière de glace. Comme cette dernière se déplace à chaque nouvelle fracture générée par la propagation du front de vague, le couvert de glace devrait se briser en morceaux approximativement de mêmes dimensions, tel qu'observé à Lac-des-Seize-Îles. L'augmentation de l'ordre de 5 à 10 m de la distance entre deux fissures consécutives, observée au sud de la zone affectée, pourrait s'expliquer par une diminution de l'amplitude de la vague causée par l'augmentation de la profondeur d'eau et par l'atténuation de celle-ci avec la distance.

En se propageant au nord du lac, les vagues se sont diffractées autour d'une île située à 300 m de la zone d'impact des débris, formant une zone d'ombre caractérisée par une absence de fractures derrière celleci. Les fractures associées au cisaillement du couvert de glace de la route d'accès, de même que les témoignages, révèlent une réflexion de la vague, de la berge ouest vers la berge est. Comme dans le cas de Notre-Dame-de-la-Salette en 1908 (Ells, 1908), le couvert de glace a été un facteur aggravant considérable durant l'événement et une cause majeure des dommages engendrés sur les différentes infrastructures côtières. Cependant, cette glace pourrait aussi avoir réduit la superficie de la zone affectée en atténuant l'énergie de la vague.

Concernant les travaux futurs, il serait intéressant d'utiliser des outils de modélisation numérique de tsunami généré par un glissement de terrain, tels GeoWave (Berger et al., 2011), GloBouss (Pedersen et Løvholt, 2008) ou Coulwave (Lynett et Liu, 2004), afin de reproduire les observations concernant le patron de propagation, la hauteur de vague, la limite de pénétration de la vague sur les berges durant l'inondation ainsi que la hauteur d'inondation. De plus, les expérimentations réalisées sur des modèles physiques par Mohammed et Fritz (2012) pourraient être utiles pour caractériser le processus de l'impact d'un glissement de terrain composé de matériel granulaire comme générateur de tsunami. Le défi majeur sera d'intégrer les effets qu'ont la résistance et le comportement d'un couvert de glace sur la propagation des vagues dans les modèles numériques préexistants. Finalement, afin de procéder aux modélisations numériques, une analyse cinématique du glissement de terrain sera nécessaire dans le but de déterminer le profil de vitesses et d'accélérations de la masse mobilisée dans le temps.

7 CONCLUSION

Cet article présente le cas du Lac-des-Seize-Îles, où un glissement de terrain d'environ 30 500 m³ s'est déclenché sur la rive est de la portion nord d'un lac, à cause d'un apport en eau important provoqué par de fortes pluies et une fonte rapide du couvert neigeux. En se mobilisant, les débris ont provoqué un impact sur le couvert de glace et ont généré une vague qui s'est propagée dans une zone s'étendant sur un minimum de 450 m au nord et 500 m au sud de la cicatrice. En se propageant, le front de vague a soulevé et brisé la glace, causant de sérieux dommages aux abris à bateau, aux quais ainsi qu'à cinq résidences saisonnières situés sur la rive du lac dans la zone affectée.

Cet événement a permis de démontrer que même un glissement de terrain mineur peut, en générant un tsunami, avoir des conséquences sur les infrastructures côtières, à la fois dans et autour d'un bassin d'eau. De plus, la présence d'un couvert de glace peut provoquer des conséquences plus sérieuses en agissant à titre de facteur aggravant dans le processus d'inondation du tsunami. Il y a un besoin d'approfondir la compréhension et l'analyse de l'impact et du comportement d'un couvert de glace dans les rivières et les lacs lorsqu'il est question de glissement de terrain, plus particulièrement dans le cas de génération, de propagation et d'inondation d'un tsunami.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été possible grâce à l'aide et au soutien de la Section des mouvements de terrain du Ministère des Transports du Québec qui ont rapidement réalisé et partagé les photographies aériennes de la zone affectée. Merci aussi à Richard Carignan de l'Université de Montréal de nous avoir permis l'accès aux données des levés bathymétriques réalisés sur le lac.

RÉFÉRENCES

- Berger, M. J., George, D. L., LeVeque, R. J., Mandli, K. T. 2011. The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptative refinement. *Advances in Water Resources*, 34 : 1195-1206.
- Ells, R.W. 1908. Report on the landslide at Notre-Dame de la Salette, Lièvre River, Quebec. *Canada Department of mines, Geological Survey Branch*, No. 1030: 1-16.
- Jørstad, F.A. 1968. Waves generated by landslides in Norwegian fjords and lakes. *Norwegian Geotechnical Institute*, 79: 13-32.
- Kohout, A.L., Meylan, M.H. 2008. An elastic plate model for wave attenuation and ice floe breaking in the marginal ice zone. *Journal of Geophysical Research*, 113(C09016): 1-17.
- Leblanc, J., Turmel, D., Therrien, J., Locat, J. 2015. Observations of coastal landslide-generated tsunami under an ice cover: the case of Lac-des-Seize-Îles, Québec, Canada. 7th International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences, Wellington, Nouvelle-Zélande (accepté pour publication).
- Lefebvre, G., Rosenberg, P., Paquette, J., Lavallée, J.G. 1991. The 5 September 1987, landslide on the La Grande River, James Bay, Quebec, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 28 : 263-275.
- Locat, J., Turmel, D., Leblanc, J., Demers, D. 2015. Tsunamigenic landslides in Québec. *GéoQuébec 2015* (ce volume).
- Liu, A.K., Mollo-Christensen, E. 1988. Wave propagation in a solid ice pack. *Journal of Physical Oceanography*, 18: 1702-1712.
- Lynett, P. J., Liu, P. L.-F. 2008. Modeling Wave Generation, Evolution, and Interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave Equations COULWAVE Code Manual, Technical Report : 1-180.

- Mohammed, F., Fritz, H.M. 2012. Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides. *Journal of Geophysical Research*, 117(C11015) : 1-20.
- Murty, T.S., Polavarapu, R.J. 1979. Influence of an ice layer on the propagation of long waves. *Marine Geodesy*, 2(2) : 99-125.
- Pedersen, G., Løvholt, F. 2008. Documentation of a global Boussinesq solver. *Mechanics and applied mathematics*, No. 1:1-69.
- Squire, V.A. 1993. The breakup of shore fast sea ice. Cold Regions Science and Technology, 21: 211-218.
- Thomson, R.E. 1981. Oceanography of the British Columbia coast, Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, Ottawa, Ontario, Canada.
- Turner, A.K., Schuster, R.L. 1996. Landslides investigation and mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, Washington, D.C., É.-U.
- Vanneste, M., Harbitz, C.B., De Blasio, F.V., Glimsdal, S., Mienert, J., Elverhøi, A. 2010. Hinlopen-Yermak landslide, Arctic Ocean-geomorphology, landslide mechanics, and tsunami simulations. *Mass-Transport Deposits in Deepwater Settings*, SEPM Special Publication No. 95: 1-19.
- Wang, Z., Parau, E.I., Milewski, P.A., Vanden-Broeck, J.M. 2015. Numerical study of interfacial solitary waves propagating under an elastic sheet. *Proceedings of the Royal Society A*, 470: 1-17.