

Mesures nécessaires afin que le barrage de Saint-Raymond (numéro X0001840) joue son rôle de réduire les risques liés aux inondations

1^{er} août 2019

Travail réalisé pour :

Ministère de la Sécurité publique
2525, boulevard Laurier, Tour des Laurentides, 6e étage
Québec (Québec) G1V 2L2

Travail réalisé par :

Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval
Faculté des sciences et de génie, Université Laval, pavillon Adrien-Pouliot
1065, av. de la Médecine,
Québec (Québec), G1V 0A6

Téléphone : 418 656 2867

Courriel : brian.morse@gci.ulaval.ca

Réalisation des travaux

Brian Morse, Ph.D., ing., professeur titulaire Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval est le seul responsable de ce rapport.

Il fut écrit et basé en grande partie sur un travail réalisé par Benoit Turcotte, Ph.D., Ing. Hydrologue Senior, Environnement Yukon avec l'aide Thomas Simard-Robitaille, ing. jr., étudiant à la maîtrise Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval.

Nous tenons à remercier le soutien administratif, technique et scientifique de Pascal Marceau et Josée Pelland du ministère de la Sécurité publique.

Pour des fins de citations

Morse, B. 2019. Mesures nécessaires afin que le barrage de Saint-Raymond (numéro X0001840) joue son rôle de réduire les risques liés aux inondations. Rapport présenté au ministère de la Sécurité publique. 1^{er} août 2019. 14 p.

Contenu

Réalisation des travaux	II
Pour des fins de citations.....	II
1. Mise en contexte	1
2. Historique.....	1
3. Impact du barrage sur les inondations	3
3.1 Dynamique des processus	3
3.2 Dommage moyen annuel (DMA)	6
4. Fonctionnement théorique d'un Barrage Estacade	6
5. Objectif des mesures à entreprendre.....	9
6. Mesures nécessaires.....	10
Dommage évité moyen annuel (DEMA)	12
Limite d'investissement rentable	12
7. Références	13

1. Mise en contexte

Ce rapport décrit le Barrage de Saint-Raymond (numéro X0001840 au répertoire des barrages du ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques du Québec), situé sur la rivière Sainte-Anne, en ce qui a trait aux risques liés aux inondations causées par les glaces dans la ville de Saint-Raymond et les mesures envisagées se rattachant à ce barrage dans la réduction de ces risques. Le nom vernaculaire de ce barrage, soit « barrage de l'estacade » (BE), sera utilisé dans la suite du document.

Ce rapport a été écrit à la demande du ministère de la Sécurité publique (MSP) du Québec qui finance depuis 2015 des études pour comprendre les risques liés aux inondations par glaces dans la ville de Saint-Raymond et identifier des mesures à mettre en place pour réduire ces risques. La gestion des glaces par le BE constitue un élément important de cette réduction.

2. Historique

- ❖ Des inondations par les glaces durant les années 1950 et 1960 à Saint-Raymond ont justifié des études sur leurs causes (Piette [1953], Leclerc [1966] et Boisvert [1970a, b]).
- ❖ Parmi ces causes, la présence d'îles (chenaux multiples entre les îles Cantin, Lefebvre et Barrette) et la rupture de pente de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond ont été identifiées.
- ❖ Les îles ont été enlevées et le chenal de la rivière Sainte-Anne a été modifié.
- ❖ En 1973 et 1974, un dragage important a été effectué dans la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond. Des plans montrent que ce dragage aurait été fait à la cote d'élévation 132.0 m entre le Pont de Fer et l'avenue de l'Hôtel de Ville et à la cote 133.2 m entre cette avenue et le site du futur BE. L'élévation actuelle (relevée après 1995) du lit suggère que les plans n'ont pas été respectés en termes d'élévation et d'étendue de l'opération.
- ❖ Le BE a été construit entre 1973 et 1976, possiblement par St-Henri Lévis SAF Construction sur les bases d'une conception par le Groupe Conseil LaSalle. Il est actuellement la propriété du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC).

- ❖ Le BE est formé d'un seuil dont la crête est à l'élévation 136.85 m et il comportait originellement 10 pertuis, de 7.6 m de large chacun. La hauteur de chute est d'environ 3.2 m.
- ❖ Des plans montrent que le lit de la rivière était possiblement proche de la cote 137.0 m à l'endroit même du BE avant sa construction. Si c'était le cas, cela signifierait que le lit de la rivière aurait été excavé massivement en aval du BE et au centre-ville de Saint-Raymond (ce qui est partiellement confirmé par le remodelage complet des berges entre le BE et le pont Tessier datant de 1889). Cela signifierait également que son réservoir, mesurant environ 400 m de longueur, aurait lui aussi été excavé dans le lit historique de la rivière.
- ❖ À une date inconnue, deux pertuis ont été ajoutés en rive droite à une élévation de 135.94 m (des poutrelles permettent de remonter le seuil à la cote 136.85 m, harmonisant du coup l'élévation de la crête de tous les pertuis). Depuis, le déversoir a une longueur totale de 101.50 m.
- ❖ Des résidents racontent que le réservoir du BE aurait été dragué plusieurs années après sa construction. L'année de cette opération est inconnue. Depuis, aucun dragage n'a été entrepris dans le réservoir.
- ❖ La structure du barrage fut réparée en 2014.
- ❖ Une étude réalisée par Tecslut (Mercier et coll., 2005) sur la stabilité du BE a soulevé des questions par rapport à son facteur de sécurité par glissement en présence de glace. Une note de M. Laganière (2006) suggère que la poussée des glaces ne compromettrait pas la stabilité de l'ouvrage.
- ❖ Lors d'une inspection ponctuelle et informelle avec Jean-Philippe Baril Boyer, Claude Beaulieu, Thomas Simard-Robitaille et Brian Morse le 13 juin 2019, Gilles Bordeleau, ing. de Gadian inc., a indiqué qu'il serait très faisable a priori d'ajouter de la masse au BE afin d'augmenter sa stabilité si une étude en confirmait le besoin relativement à la poussée des glaces.
- ❖ Depuis sa construction, le BE ne semble pas avoir atténué les inondations par les glaces à Saint-Raymond. En fait, depuis l'an 2000, les inondations par les glaces semblent devenir de plus en plus fréquentes.

- ❖ Le début de l'hiver 2003-2004 aura été exceptionnel, avec une succession de plusieurs vagues de froid interceptées par des événements de pluie sur neige qui causaient des débâcles partielles.
- ❖ En 2012, c'est une débâcle printanière hâtive qui a causé une inondation importante.
- ❖ En 2014, c'est plutôt une débâcle tardive suite à un hiver très froid qui a causé l'inondation la plus importante à Saint-Raymond à ce jour.
- ❖ En 2012 et 2018, le BE a laissé passer un train de glaces majeur vers le centre-ville tandis qu'en 2003-04 et 2014, l'inondation était largement causée par le fait que le barrage avait laissé passer trop de frasil au début de l'hiver.

3. Impact du barrage sur les inondations

3.1 Dynamique des processus

Depuis 2014, l'Université Laval étudie les processus qui mènent à la formation du couvert de glace et à la débâcle sur environ 35 km en amont et 6 km en aval du BE sur la rivière Sainte-Anne ainsi que sur ses tributaires (incluant la rivière Bras-du-Nord, de taille comparable). Voici les principales conclusions, en lien avec les inondations et le BE (Turcotte et coll., 2019):

- ❖ Les inondations par les glaces à Saint-Raymond sont causées par :
 - les embâcles de frasil (cristaux de glace dans l'écoulement et sloche de neige qui forment des bouchons au centre-ville au début de l'hiver ou à la suite d'une débâcle) ;
 - Les embâcles de glaces (causés par un train de glaces provenant de l'amont du centre-ville ou par un mouvement local du couvert de glace au centre-ville).
- ❖ Au début de l'hiver, la rivière Sainte-Anne en amont du BE produit une quantité significative de frasil, pouvant être accompagnée de sloche de neige (lors des chutes de neige).
- ❖ Tout ce frasil et cette sloche passent facilement à travers le BE et se déposent dans le bief du centre-ville. Les vitesses d'écoulement sont simplement trop grandes dans le court réservoir et aucune structure de surface ne permet d'intercepter le frasil.
- ❖ Sans intervention, donc avec un BE utilisé passivement, sa crête agit plutôt comme un aspirateur qui attire le frasil pour l'envoyer vers le centre-ville où la pente de la rivière

Sainte-Anne est pratiquement nulle. Dans ce cas, le frasil s'y dépose inmanquablement, initialement sous le pont Tessier, mais par la suite, entre le pont de Fer et le pied du BE.

- ❖ Les biefs de la rivière Sainte-Anne situés en amont étant plus pentus, ils ne cessent de produire du frasil que plusieurs semaines après que le bief du centre-ville soit engorgé de frasil et de glace.
- ❖ La quantité de glace produite et transportée par la rivière Sainte-Anne au début d'un hiver varie d'une année à l'autre, principalement selon le nombre de redoux, de crue et de tempêtes de neige entre les mois de novembre et janvier. Sur la base de modèles (Vergeynst et coll., 2015, Turcotte et Morse, 2016), on estime cette quantité à un minimum de 220 000 tonnes avant la formation d'un couvert de glace complet qui prévient la production de glace. En 2003-04, ce sont plutôt 1 000 000 de tonnes de frasil et de blocs de glace qui ont été produites.
- ❖ Durant les hivers 2014-15 et 2015-16, le BE était finalement submergé par le frasil, les trains de sloche de neige et les trains de glace du début de l'hiver, ce qui signifie qu'entre 3 et 4 m de glace étaient présents, par endroits, dans le centre-ville.
- ❖ La submersion du BE étant causée par environ 120 000 tonnes de frasil, sloche de neige et glace, il a été établi qu'il serait donc submergé tous les hivers si rien ne change (Figure 1).
- ❖ Une fois le BE submergé, la glace commence à s'accumuler vers l'amont. Il est très fréquent que des trains de glaces ou de sloche de neige au début de l'hiver causent une consolidation du couvert déjà en place, ce qui cause un épaissement additionnel du couvert de glace, parfois à travers les piliers du BE.
- ❖ Les crues hivernales causent des débâcles qui envoient des trains de glaces vers l'aval :
 - Si le couvert de glace immédiatement en amont du BE est encore fragile, le barrage laisse passer le train de glaces;
 - Au milieu de l'hiver, lorsque le couvert est plus résistant, les trains de glaces semblent souvent être interceptés naturellement à 5 kilomètres en amont du BE. Par contre, le frasil produit dans les rapides à la suite d'une débâcle hivernale passe sous le couvert de glace et facilement à travers le réservoir et le BE pour s'accumuler au centre-ville.

- Au printemps, le BE semble uniquement être capable d’intercepter les trains de glaces mineurs. Si un train de glaces majeur arrive au BE, ce dernier ne peut le retenir et le train de glaces parvient au centre-ville, comme ce fut le cas en 2012 et en 2018.



Figure 1. Barrage Estacade submergé par les glaces le 19 décembre 2014 (vue de la rive droite, le courant allant de gauche à droite). Cette situation est causée par l’impossibilité de former un couvert de glace hâtif à l’amont du barrage Estacade dans le réservoir de ce dernier, ce qui expose la ville à des inondations fréquentes.

La configuration de la rivière antérieurement à la construction du BE permettait sensiblement la formation d’un couvert de glace, du fait de la présence des îles Cantin, Lefebvre et Barrette et aussi d’une plaine inondable en rive gauche. Ainsi, la construction du BE non fonctionnel a possiblement augmenté les risques liés aux inondations à Saint-Raymond en supprimant les îles, en remodelant la rivière et en y ajoutant une digue reliée au BE en rive gauche. Démolir le BE ne réduira aucunement le risque créé, car les îles Cantin, Lefebvre et Barrette ne peuvent être recrées, la plaine inondable est désormais occupée par des digues, dont celle reliée au BE, et des bâtiments construits dans la plaine inondable, dont une importante résidence pour aînés.

3.2 Dommage moyen annuel (DMA)

Pour rappel, le dommage moyen annuel (DMA) intègre pour un territoire donné l'ensemble des dommages (D) dus aux inondations possibles en prenant en compte la fréquence (f) de chaque inondation. Le DMA exprime donc ce que coûtent en moyenne chaque année les inondations, en montant par année (\$/an). Le DMA est calculé avec la formule suivante :

$$\text{DMA} = \int_0^1 D(F)dF$$

Des modèles empiriques ont été développés et calibrés pour évaluer le dommage moyen annuel (DMA) causé par les différents types d'inondations. Un de ces modèles utilise les données de dommages rapportés lors de l'inondation de 2014 de même que les résultats d'autres modèles qui simulent les niveaux d'eau pour différents types d'inondations. Les années 1977 à 2016 ont été simulées pour estimer le DMA (Turcotte et Morse, 2019):

- ❖ DMA pour tous les types d'inondations (eau libre et par les glaces): 1.06 M\$/an;
- ❖ DMA pour les inondations par les glaces au début ou pendant l'hiver : 0.19 M\$/an;
- ❖ DMA pour les inondations par embâcle à la fin de l'hiver : 0.53 M\$/an.

Au total, les inondations par les glaces représentent 0.72 M\$/an, soit 67% du DMA total.

4. Fonctionnement théorique d'un Barrage Estacade

Un Barrage Estacade (BE) est aussi appelé une « estacade fixe » ou un '*ice control structure*' (ICS). Il est toujours composé de piliers (avec ou sans tablier) et souvent, il intègre un seuil.

Un ICS est conçu pour « retenir » les glaces. Ceux qui n'ont pas de seuils intégrés visent surtout à retenir et/ou retarder les trains glaces lors de la débâcle. Un exemple d'une telle construction se trouve sur la rivière Credit (Ontario). Leur efficacité dépend de la présence d'une plaine inondable. L'idée est que les trains de glace sont retenus dans la rivière pendant que beaucoup d'eau passe à côté sur la plaine inondable. Si le train est entièrement retenu, la ville à l'aval est protégée contre l'inondation associée à la formation d'un embâcle. Si le train n'est que retardé, l'embâcle éventuellement formé en ville est associé à un débit plus faible et alors l'intensité de l'inondation est réduite.

Un autre rôle d'un BE est la formation hâtive un couvert de glace. Alors qu'une estacade flottante est conçue pour former un couvert sur un bief à faible courant (par exemple, les estacades de Lavaltrie, Lanoraie et Yamachiche du fleuve Saint-Laurent), un BE est construit sur des biefs ayant des vitesses plutôt élevées. Le seuil augmente la profondeur d'eau et réduit la pente du bief. Ainsi, les réductions de vitesses et du nombre de Froude présentent des conditions favorables à la création d'un couvert de glace. Un exemple d'un seuil très épais est le BE sur la rivière Chaudière à Saint-Georges de Beauce. Le réservoir créé est si profond (hauteur de barrage de 12.8 m) que le couvert de glace se forme très rapidement. Parfois le seuil n'est pas très important et il est nécessaire que le BE soit partiellement inondé afin que l'eau soit assez profonde pour que les vitesses soient suffisamment petites pour créer le couvert. Cet élément fut intégré dans la conception de l'Estacade fixe du fleuve Saint-Laurent située juste à l'amont du pont Champlain à Montréal. L'idée était qu'en présence d'embâcles mineurs sur le fleuve, le débit de glace rentrant sur Montréal serait réduit une fois que le couvert formé derrière l'Estacade et le niveau d'eau sur Montréal serait limité à une cote acceptable protégeant Montréal et les îles d'EXPO67 contre des inondations importantes.

Le couvert de glace créé sur le réservoir derrière le BE est bénéfique pour trois raisons : (1) il isole la rivière contre l'air froid et ainsi la quantité de glace formée est significativement réduite, (2) le frasil transporté de l'amont dans la rivière se stocke dans le réservoir sous le couvert et ainsi le volume de frasil transporté vers l'aval est réduit, et (3) lors de la débâcle, le couvert de glace s'appuie sur les piliers et c'est le couvert de glace (plutôt que les piliers) qui arrête le train de glace à l'amont de la ville. (Un couvert est beaucoup plus efficace à arrêter un train de glace que juste les piliers).

Dans le concept original des BE dans les années 1960, entre les piliers, il devait y avoir des poutres flottantes sur lesquelles la construction du couvert de glace pouvait s'initier. Par exemple, pendant plusieurs années, il y a eu des grandes opérations annuelles de pose et d'enlèvement de poutres (1.2 m de haut x 1.8 m de large x 24 m de long) entre les piliers de

l'Estacade fixe sur le fleuve. Avec le passage des hivers, ils ont constaté que la pose de poutres n'aidait pas beaucoup la formation du couvert si les vitesses n'étaient pas suffisamment faibles. Par ailleurs, si les vitesses étaient faibles (présence d'embâcles mineurs à l'aval), le couvert pouvait réussir à se former en s'appuyant sur les piliers sans la présence de poutres. Alors, la pose annuelle, pas vraiment utile, fut annulée.

Le BE à Saint-Georges n'a pas de poutre, mais a une grille entre les piliers pour arrêter le passage de blocs de glace entre les piliers. (Il y a quelques années, la nécessité de cet élément fut remise en question par le MELCC).

La conception de ces structures innovatrices était réalisée par le même Groupe Conseil LaSalle (GCL) qui a aussi conçu le BE de Saint-Raymond. Des rainures sont intégrées dans les piliers qui permettraient l'insertion de poutres. Cet élément de conception a été conservé à Saint-Raymond, mais il semble qu'il n'a pas été cherché à l'exploiter dû à l'expérience apprise sur le fleuve entre 1967 et 1973. À la place, le rapport de GCL présente l'inclusion d'une estacade flottante qui serait à installer dans le réservoir (Carpentier, 1973). Toutefois, l'estacade flottante ne fut jamais installée à Saint-Raymond (Géniglance, 2014). Il est possible qu'elles ne fussent pas installées à cause, dans les mots de Carpentier « Disons cependant ce projet (pose d'estacade flottante) serait plus ou moins efficace si l'on se base sur les résultats obtenus à l'aide de l'estacade du site Drolet : cette dernière a été démolie quelques années plus tard; elle ne remplissait pas tout à fait son rôle. »

Lors de la construction du BE de Saint-Raymond, la conception des ICS était en évolution (et continue de l'être même aujourd'hui). Alors qu'il semble qu'il y ait eu l'intention de poser des estacades flottantes, le rapport laisse à l'interprétation, car l'objectif même de cet ICS n'est pas décrit et nous n'avons jamais vu de document qui précise les différents rôles qu'il devait jouer pour réduire les inondations. Aujourd'hui, sachant que le BE, tel que construit ne fonctionne pas, les auteurs du présent rapport ont évalué quels rôles le BE pourrait jouer pour protéger

Saint-Raymond contre les inondations par glace et identifier les modifications nécessaires pour remplir ces rôles.

5. Objectif des mesures à entreprendre

Les mesures à entreprendre sur le BE pour réduire les risques liés aux inondations ont pour objectif principal **la formation hâtive d'un couvert de glace à l'amont immédiat du BE** (Figure 2) permettant de :

- (1) diminuer la quantité de glace formée sur la rivière;
- (2) stocker un certain volume de frasil provenant des biefs à l'amont;
- (3) favoriser la formation d'un couvert de glace lisse sur la Ville qui pourrait être plus facilement affaibli en prévision de la débâcle;
- (4) mieux retarder et même retenir les trains de glace lors de débâcles.



Figure 2. Barrage Estacade avec couvert de glace hâtif formé le 21 décembre 2016 à la suite à la gestion active des poutrelles des pertuis nos 1 et 2 par une grue (vue de la rive droite, le courant allant de gauche à droite)

Un deuxième objectif aurait été de freiner les trains de glace lors de la débâcle, mais la problématique principale du dysfonctionnement du BE Saint-Raymond durant la débâcle est que l'eau continue à monter dans le réservoir lorsque le train de glaces se présente et l'eau et les glaces finissent par excéder les piliers, comme cela s'est notamment produit en 2012 et en

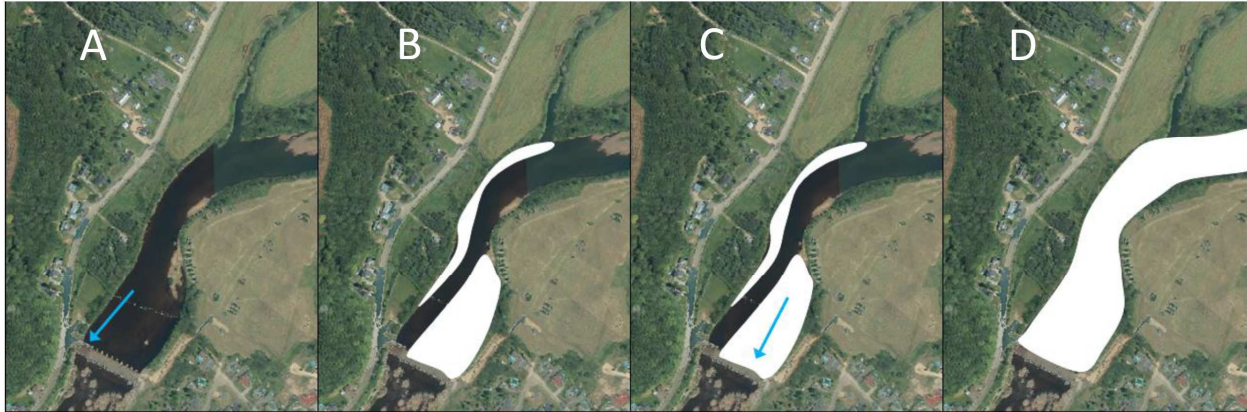
2018. En principe, la présence d'un chenal latéral permettrait de retenir le train de glaces en place dans le court réservoir du barrage. L'aménagement d'un chenal de débordement (porte de sortie) en rive ou à même le réservoir existant pourrait être envisagé. Toutefois, le site manque d'espace pour l'évacuation d'une quantité d'eau suffisante pour atténuer la force de poussée de l'amont et cet objectif, normalement associé à un BE, doit être abandonné.

6. Mesures nécessaires

Sans intervention active, un couvert de glace ne se forme dans le réservoir au début de l'hiver que lorsque la submersion du BE par le frazil accumulé en Ville est suffisante pour réduire les vitesses et donner ainsi un appui aux glaces provenant de l'amont. Entre-temps, le frazil déposé au centre-ville devient un blocage majeur et un problème de gestion majeur pour la Ville. Le statu quo est inacceptable et c'est pour cette raison qu'il faut trouver un autre moyen pour former le couvert. Le texte qui suit présente les mesures nécessaires à mettre en place.

1. Opérer des vannes de manière dynamique

La mesure proposée est d'installer des vannes-clapet téléguidées sur les pertuis 1 et 2 situés en rive droite : en ouvrant ces deux pertuis, le courant est attiré vers la rive droite et aucun courant ne passe par les pertuis 3 à 12 (figure A ci-dessous). Ainsi, un mince couvert de glace commence alors à s'y former dans la zone des eaux mortes vis-à-vis les pertuis 3 à 12 (figure B). Il s'agit ensuite de compléter la formation du couvert sur les pertuis 1 et 2 et, alors, par la suite, la fermeture rapide des pertuis 1 et 2 (figure C) permet la stagnation temporaire du courant et l'interception du frazil présent devant les pertuis 1 et 2. Par la suite, on cherche à maintenir un courant très faible devant les pertuis 1 et 2 en les gardant légèrement ouverts. Le couvert est capable de se former dans ce faible courant et le courant lui-même attire le frazil qui aide à la formation et à la complétion accélérée du couvert (figure D).



L'application de ce protocole l'année 2016-17 a démontré la faisabilité de la mesure pour former un couvert hâtif et son efficacité : le BE n'a plus été submergé (Figure 2) et le couvert de glace au centre-ville était bas et lisse, une première en presque 40 ans selon les résidents

En 2017-18 et en 2018-19, les débuts de l'hiver étaient accompagnés de plusieurs redoux et alors la gestion des vannes était difficile et délicate. Du fait que la grue a une flexibilité d'intervention limitée et que les effectifs n'étaient pas disponibles au bon moment (prévisions de températures incertaines, présence durant nuit et le weekend, etc.), la formation hâtive n'a pas réussie. Ces années démontrent la nécessité d'avoir des vannes mobiles téléguidées capables de réagir rapidement, efficacement et à tout moment du jour ou de la nuit.

Mise en œuvre : la pose de vannes clapet automatisées et leur opération avec un plan de gestion est la recommandation principale et prioritaire.

2. Draguer le réservoir du barrage

La deuxième mesure proposée est le dragage du réservoir sur sa largeur, environ 1 m de profond sur 200 m en longueur. La réduction des vitesses et la réduction du nombre de Froude augmentent la facilité pour former un couvert. Le volume additionnel de frasil pouvant être stocké augmentera d'environ 20 000 tonnes.

Mise en œuvre : nous croyons que le dragage du réservoir pourrait attendre l'installation des vannes mobiles afin de valider la nécessité du dragage pour la formation du couvert. Si le jeu de vannes n'est pas aussi concluant qu'espéré, il faudra absolument draguer le réservoir. Par contre, si le couvert se forme facilement, l'analyse bénéfice/coût du dragage devrait être reprise pour confirmer la durabilité de la mesure. Selon nos calculs des taux de sédimentation, le dragage devra se faire en moyenne une fois aux 30 ans.

Domage évité moyen annuel (DEMA)

Les modèles de l'Université Laval ont été utilisés pour simuler l'impact de la formation hâtive d'un couvert de glace sur les inondations. Il a été évalué que la formation hâtive du couvert de glace entraînera une réduction du DMA, soit un dommage évité moyen annuel (DEMA) de 280 000 \$/an.

Limite d'investissement rentable

La limite de rentabilité d'un investissement dans une mesure est celle pour laquelle les coûts initiaux C_{0max} sont égaux à la somme des gains annuels, valant les DEMA annuels moins les coûts annuels (entretien et opération des vannes) :

$$C_{0max} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i} (DEMA_i - C_i)$$

Avec :

C_{0max} : coûts initiaux maximaux de la mesure, \$

C_i : coûts annuels différés, \$

r : taux d'actualisation,

n : horizon temporel en années.

$DEMA_i$: DEMA à l'année i , \$

Ainsi, avec un DEMA de 280 000 \$/an et un taux d'actualisation de 4% (valeur utilisée par le MSP dans ses projets de prévention en inondations avec *le Cadre pour la prévention de sinistres*), il est rentable d'investir dans un BE qui réalise la formation hâtive d'un couvert de glace un montant initial maximal d'environ 5 M\$, en considérant des coûts annuels de l'ordre de 5-10 k\$.

7. Références

- Boisvert, René (1970a). Ministère des Richesses naturelles. Étude d'une solution locale en vue de l'atténuation des crues à Saint-Raymond de Portneuf.
- Boisvert, René (1970b). Ministère des Richesses naturelles. Étude de l'implantation d'une vanne supplémentaire au barrage de Chute-Panet.
- Carpentier, Jacques (1973). Ministère des Richesses naturelles. Note de service à J. Boily. 25.1.73.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), 2015. Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 81p.
- Génieglace (2014). Soumission à la Ville de Saint-Raymond pour la construction d'une estacade flottante en amont du barrage estacade Saint-Raymond.
- Laganière, Marcel (2006). Centre d'expertise hydrique du Québec. Étude de réévaluation de la sécurité de l'estacade de Saint-Raymond – MRC de Portneuf – Note complémentaire.
- Leclerc, André (1966). Cartier, Leclerc et associés. Rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond, Inondation des 21-22 décembre 1957, Étude hydrologique. Rapport No 2-8.
- Mercier, Jean-François, Verret, Daniel et Vittecoq, Sébastien (2005). Tecsalt Inc. Étude d'évaluation de la sécurité des barrages du bassin de la rivière Sainte-Anne, Barrage de Saint-Raymond no. X0001840. Projet 0335-P
- Morse, B., Turcotte, B., Simard-Robitaille, T., 2019. Techniques visant à gérer le couvert de glace à Saint-Raymond. Rapport final, présenté au ministère de la Sécurité publique. 18 février, 15 p.
- Piette, Guillaume, (1953). Étude hydrologique de la rivière Sainte-Anne-de-la-Pérade à Saint-Raymond entre la chute à Panet et les ponts Tessier et Noir.
- Turcotte, B., Morse, B., 2016. Turcotte, B., Morse, B., 2016. A simple 1-D river ice model to simulate frazil jam formation and mitigation strategies. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan, USA, 10 p.

- Turcotte, B., Morse, B., 2018. Sous-projet 4 : Techniques structurelles visant à inciter la formation d'un couvert de glace à l'amont de la ville, Rapport final sur les recommandations, présenté au ministère de la Sécurité publique. 12 mars. 14 p.
- Turcotte, B., Morse, B., 2019. Réduction du risque relié aux inondations à Saint-Raymond, phase II. Rapport d'avancement 1, présenté au ministère de Sécurité publique. 25 janvier, 10 p.
- Turcotte, B., Morse, B., Simard-Robitaille, T., 2019. Réduction du risque relié aux inondations dans la ville de Saint-Raymond, Sous-projet 1. Évaluation de l'aléa : Synthèse des phénomènes hydrologiques hivernaux de la rivière Sainte-Anne (2013-14 à 2018-19). Rapport technique soumis à au ministère de Sécurité publique. 2 avril. 27 p.
- Vergeynst, J., Morse, B., Turcotte, B., 2015. The nature and structure of a hanging dam in a gravel-bed river. Proc. 18th CGU-HS CRIPE Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Québec, Québec.