

Demande de soustraction de la procédure d'autorisation concernant le projet de dragage de la rivière Sainte-Anne en amont du barrage-estacade du MELCC à Saint-Raymond

Référence MELCC : 32-02-324

Réponses aux questions du 14 octobre 2021, de M. Jean-Pascal Fortin, géographe, M. Sc. Eau, chargé de projet, direction de l'évaluation environnementale des projets hydriques, MELCC

A) Dragage du réservoir du barrage-estacade de Saint-Raymond

Veillez fournir les informations/études/explications qui justifient l'urgence de draguer le réservoir du barrage estacade en 2022, ainsi que de la superficie proposée de 14 000 m², en répondant aux interrogations ci-dessous :

1) En quoi la situation est différente des autres années (nouveaux faits, nouvelles études, etc.)?

Un nouveau relevé bathymétrique et des observations détaillés ont été réalisés le 4 juin 2021 de même que le sondage des alluvions récentes, le 20 août 2021. Préalablement à cette acquisition de données, le niveau du réservoir avait été abaissé par l'ouverture des vannes.

Nous avons alors constaté que des volumes importants de sédiments grossiers s'étaient récemment accumulés dans le réservoir. La presqu'île en rive gauche s'est engraisée et a progressé vers l'aval (figures 1, 2 et 3). Des arbustes se sont aussi implantés sur les nouvelles surfaces disponibles et exondées (figure 3). Entre 2010 et 2021, de grandes surfaces de nouvelles accumulations de 1 m d'épaisseur ont été mesurées (figure 1).

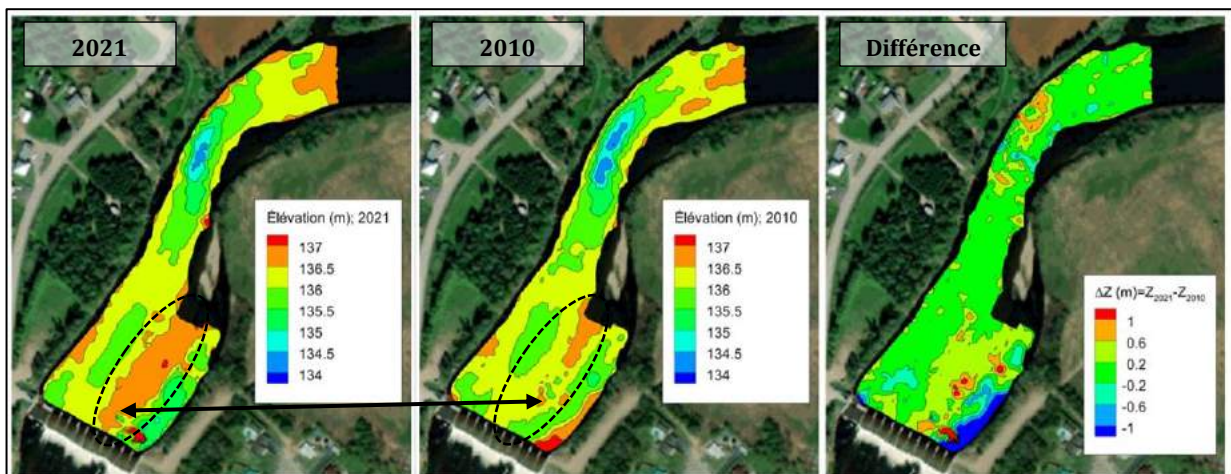


Figure 1: Bathymétries comparées montrant le remplissage du réservoir et prolongement de la presqu'île entre 2021 et 2010.



Figure 2: Remplissage récent du réservoir et prolongement de la presqu'île vers l'aval (photo du 20 août 2021). Les vannes étaient ouvertes.



Figure 3: Aggradation de la presqu'île vers l'aval, et implantation des arbustes, entre 2013 et 2018.

Les nouvelles cartes bathymétriques montrent de manière non équivoque que le réservoir se comble rapidement de sédiments grossiers, au point où celui-ci tend à disparaître.

Il convient de signaler que le barrage-estacade de Saint-Raymond a été construit en 1974. Selon des riverains, son réservoir aurait été dragué peu après sa mise en place, mais plus depuis ce temps. Constaté depuis 2014 et mis à l'évidence récemment en 2019 et 2021, l'équipe de Brian Morse de l'Université Laval et plusieurs spécialistes ont constaté que le barrage, et surtout son réservoir, ne remplissent plus leurs fonctions hydrauliques.

Cet ouvrage était à l'origine conçu pour contenir la glace lors de la débâcle; fonction qu'il ne remplit pas, car les blocs de glace passent entre ses piliers. De plus, **dans les conditions actuelles, le barrage et son réservoir nuisent à la formation d'un couvert de glace hâtif.** Le frasil se trouve

à remplir le bief au centre-ville avant de submerger le barrage et d'initier le couvert de glace en amont (figure 4, en annexe).

La formation précoce d'un couvert de glace permet de confiner le frasil en amont du barrage et évite que ce frasil vienne s'accumuler en masse dans le tronçon voisin et en aval du centre-ville. C'est à la suite de cette accumulation que la rivière est obstruée et que les citoyens doivent se tenir en alerte d'inondation à toutes hausses, même mineures du débit hivernal (Morse, 2019).

Depuis l'inondation majeure du printemps 2014, il s'en est fallu de peu pour que la ville de Saint-Raymond soit affectée par un autre événement de la même envergure. Lors de la débâcle printanière de 2019, la ville était en alerte pendant 6 journées consécutives. Les niveaux d'eau au centre-ville étaient à environ 10 cm sous la crête des digues, au seuil de débordement. Une augmentation de moins de 5 mm de la quantité de pluie ou une hausse de moins de 5°C de la température auraient été suffisantes pour dépasser un point de bascule qui aurait engendré des conséquences majeures.

2) Quelle est la séquence des interventions qui permet d'affirmer que le dragage est maintenant urgent?

Deux éléments nouveaux viennent supporter l'aspect urgent de la séquence des interventions :

1. Depuis 2016, le barrage de Saint-Raymond fait l'objet d'une gestion saisonnière des vannes afin de tenter de favoriser la formation d'un couvert de glace et la rétention du frasil. Afin de réduire le délai d'opération des vannes et d'améliorer leur efficacité, un système de levage mécanisé a été installé et mis en fonction en 2020.

Malgré l'amélioration du système en 2020, la formation du couvert de glace demeure difficile et lente. Le couvert formé est vulnérable compte tenu des vitesses d'écoulement élevées dans le réservoir.

2. La mise à jour du modèle d'évaluation du risque de l'Université Laval évalue que la formation d'un couvert de glace hâtif dans le réservoir du barrage-estacade engendrerait une **réduction du dommage moyen annuel (DMA)**. Selon l'analyse de M. Morse, qui travaille sur ce dossier depuis plusieurs années, on peut évaluer la réduction à **un peu plus du tiers** du DMA actuel pour tous types d'inondations (eau libre, embâcles et frasil) (Brian Morse, communication personnelle, octobre 2021). Sachant qu'aucune des mesures déjà mises en place à Saint-Raymond n'a généré une diminution aussi importante du DMA, c'est tout de même significatif.

Le succès de rétention de frasil au site du Km 24 (Morse et coll. 2021) démontre qu'un changement apparemment modeste des conditions d'écoulement peut avoir un effet positif majeur sur la rétention préventive du frasil. Dans le réservoir du barrage-estacade, le dragage des alluvions récentes produira lui aussi un effet positif majeur. La sécurité de milliers de personnes en dépend.

3) Qu'est-ce qui vient appuyer la superficie à draguer, notamment ce qui appuie l'augmentation de celle-ci par rapport à la recommandation de l'Université Laval?

La recommandation de l'Université Laval s'appuyait sur d'anciens relevés bathymétriques. La superficie de 10 000 m² représentait un ordre de grandeur (Brian Morse, communication personnelle, 5 octobre 2021).

La superficie de 14 000 m² était appuyée sur des données bathymétriques anciennes de 2010 et 2015 réalisées à l'aide d'un sonar installé sur une chaloupe. Les zones de faible profondeur ne peuvent pas être mesurées avec un tel équipement. Le relevé bathymétrique plus récent du 4 juin 2021 a été effectué principalement en marchant dans la rivière avec un vêtement isothermique, mais aussi avec une embarcation. Toutes les parties de la rivière et de sa plaine inondable étaient de ce fait accessibles, autant les zones profondes, peu profondes que celles qui étaient exondées. Le relevé du 4 juin 2021 est nettement plus exhaustif que les bathymétries précédentes.

Ainsi, l'arpentage de juin 2021 révèle que la superficie à draguer est maintenant de **10 470 m²**. Les plans d'arpentage ci-joints montrent tant la vue en plan que les vues en coupes du réservoir. La superficie draguée n'excèdera pas cette valeur. Le périmètre final sera déterminé en collaboration avec l'équipe de la Direction générale des barrages (DGB) du MELCC.

4) Est-il possible de prioriser différentes zones de dragage à l'intérieur du réservoir afin de réduire l'ampleur de l'intervention d'urgence? Veuillez expliquer votre réponse.

Non, ce n'est pas possible. Afin d'assurer des conditions hydrauliques adéquates pour emmagasiner le frasil sur toute la longueur du réservoir et initier rapidement le couvert de glace qui se propage vers l'amont, il est nécessaire de draguer en entier la partie du réservoir qui est remplie de sédiments.

- En confinant le frasil à l'amont du barrage-estacade dont le réservoir aurait été dragué, la masse de glace au centre-ville diminuerait en moyenne de 41%, soit de 93 000 tonnes (avec une médiane à 52%), selon la simulation des 44 derniers hivers.
- Il faut savoir qu'il existe un seuil critique au-delà duquel le frasil plonge sous le couvert de glace. Ce seuil est associé à une vitesse supérieure à 0,3 m/s et à un nombre de Froude supérieur à 0,08 (Beltaos, 2013). Ainsi, un dragage partiel qui ne répondrait pas à ces critères continuerait à favoriser le transport du frasil en aval et serait inutile.
- En se basant sur ces critères hydrauliques, l'aménagement du seuil rocheux et de l'estacade flottante munis de conifères au site du Km 24 a été un succès immédiat. Ce dispositif a permis de créer un couvert de glace hâtif et a retenu le frasil en amont de l'aménagement (Morse et coll. 2021).

B) Aménagement de la structure de ralentissement des glaces (SRG) au km 10,5

Veillez fournir les informations/études/explications qui justifient l'urgence de la mise en place du système de retenue des glaces en 2022.

L'aménagement d'un SRG au Km 10,5 est la deuxième intervention la plus efficace pour réduire le risque d'inondation à court terme (2022) et ce pour les raisons suivantes :

- Les critères de conception associés à la publication ci-jointe ainsi que l'étude de suivi sur le rendement de cette technique démontrent la grande efficacité de cette démarche (Lever et coll., 1997; Lever et Gooch, 2007). C'est exactement celle qui est proposée au site du Km 10,5. Le SRG permettra de retarder l'arrivée des trains de glace en débâcle tout en permettant à l'eau de circuler par la plaine inondable de 250 à 360 mètres de largeur limitant les dommages anticipés à quelques propriétés, conditions actuellement inexistantes sur le barrage-estacade localisé tout juste à l'amont du centre-ville. Lever et Gooch (2007) relatent que depuis l'aménagement du SRG dans la rivière Lamoille à Hardwick au Vermont, en plus de retenir les trains de glace à l'amont de la ville, la sévérité des événements survenant au centre-ville a diminué de manière notable.
- L'implantation du SRG en 2022 accentue la nécessité déjà existante de relocaliser la maison du [REDACTED] (Emond, 2021) et des interventions mineures sur un terrain voisin. Nous devons planifier et procéder à toutes ces activités dans les 6 prochains mois.

Les changements climatiques augmentent la fréquence des redoux hivernaux et la fréquence de redémarrage du cycle de formation du couvert de glace. En bref, la production non-souhaitable de frasil recommence à chaque débâcle partielle ou complète.

Les études disponibles justifient la rentabilité des mesures et démontrent la possibilité de diminuer le risque d'inondation en attendant la mise en œuvre des autres mesures complémentaires. Ces autres mesures sont :

- les réparations et la reconfiguration du barrage-estacade du MELCC;
- la reconfiguration du barrage de Chute-Panet;
- la réparation des murs et digues du centre-ville en disposant d'espace de liberté additionnel pour la rivière.

Le dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond (Km 6,1) et l'aménagement du SRG au site du Km 10,5 constituent les deux mesures les plus efficaces à court terme pour diminuer de manière significative les risques d'inondations au centre-ville de Saint-Raymond. Nous ne pouvons ignorer les impacts et les risques anticipés sur la sécurité de la population de Saint-Raymond.

Le risque d'inondation par embâcles est bien connu, des solutions partielles sont identifiées et peu d'impacts négatifs sur le milieu naturel existent. Chaque année compte et le plan d'interventions planifié en 2022 dans le cadre de présente demande de soustraction va dans la même direction et le

respect de nos obligations face à la *Loi sur les ingénieurs* comme le démontre le courriel de l'OIQ ci-joint. La modernisation récente de cette loi clarifie le rôle et les responsabilités de l'ingénieur face à son devoir d'exprimer un avis technique ou une opinion concernant la protection du public si l'environnement, la vie, la santé et la propriété de toute personne sont en danger.

Les habitats aquatiques ont été inventoriés et qualifiés en regard des risques pour la faune ichthyenne concernant la zone de travaux proposés en urgence pour 2022. L'avis professionnel des biologistes de SYNERGIS démontre que ces travaux de dragage ne viennent pas en conflit avec la présente proposition (Goulet, 2021). Soulignons par ailleurs que ces travaux demeurent assujettis à une demande de permis en vertu de l'article 22 et que toutes les mesures seront prises pour minimiser les impacts résiduels sur l'environnement. Nous planifions entre autres réaliser les travaux pendant l'étiage estival de 2022 en minimisant l'émission de sédiments par le rabaissement du plan d'eau amont par la gestion des vannes du barrage-estacade et en isolant les surfaces résiduelles par des techniques de confinement reconnues.

Soulignons en terminant que la Ville maintiendra la procédure d'évaluation environnementale initiée au printemps dernier en ce qui concerne le dragage d'un chenal d'évacuation du frasil entre les km 3,6 et 4,7.

Nous demeurons disponibles pour en discuter.

Cordialement,



Claude Beaulieu

Claude Beaulieu, ing. sr.
Hydraulique fluviale



Simon Bélanger

Simon Bélanger, T.P., M.A.
Géomorphologue

Thomas S-Robitaille

Thomas Simard-Robitaille,
M.Sc, ing. jr
Hydraulique fluviale et
Dynamique des glaces

Préparé le 30 novembre 2021

Références

- BELTAOS, S., 2013. River Ice Formation. Committee on River Ice Processes and the Environment, Canadian Geophysical Union – Hydrology Section, Spyros Beltaos Editor, Edmonton, Alberta, Canada. 552 p.
- EMOND, J. 2021. Transmission de l'avis hydraulique final relatif au risque de l'aléa d'inondation pour la résidence sise au [REDACTED], dans la municipalité de Saint-Raymond. Avis technique du dossier numéro MSP21018. 12 pages.
- GOULET, J. 2021. Avis technique – Potentiel d'utilisation par le poisson de la zone visée par les travaux projetés dans la demande de soustraction en amont du barrage-estacade de Saint-Raymond. 7 pages.
- LEVER, J. H., GOOCH, G., TUTHILL, A., CLARK, C. 1997. Low-Cost Ice Control Structure. Journal of Cold Regions Engineering. 1997, 11 (3): 198-220.
- LEVER, J. H., GOOCH, G. 2007. Assessing the Performance of a Sloped-Block Ice-Control Structure. Journal of Cold Regions Engineering. ASCE. 200, 21(1):19-39.
- 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. 1er août 2019. 14 p.
- MORSE, B., SIMARD-ROBITAILLE, T., TURCOTTE, B. 2021. Réduction du risque relié aux inondations à Saint-Raymond– Phase II; Bilan de l'estacade flottante et de son seuil rocheux aménagés au km 24 sur la rivière Sainte-Anne. Rapport présenté au ministère de la Sécurité publique dans le cadre du contrat CPS-18-19-02. Université Laval, Québec. 28 p.

Le registraire a supprimé certaines informations en vertu des articles 53 et 54 de la Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels (chapitre A-2.1).

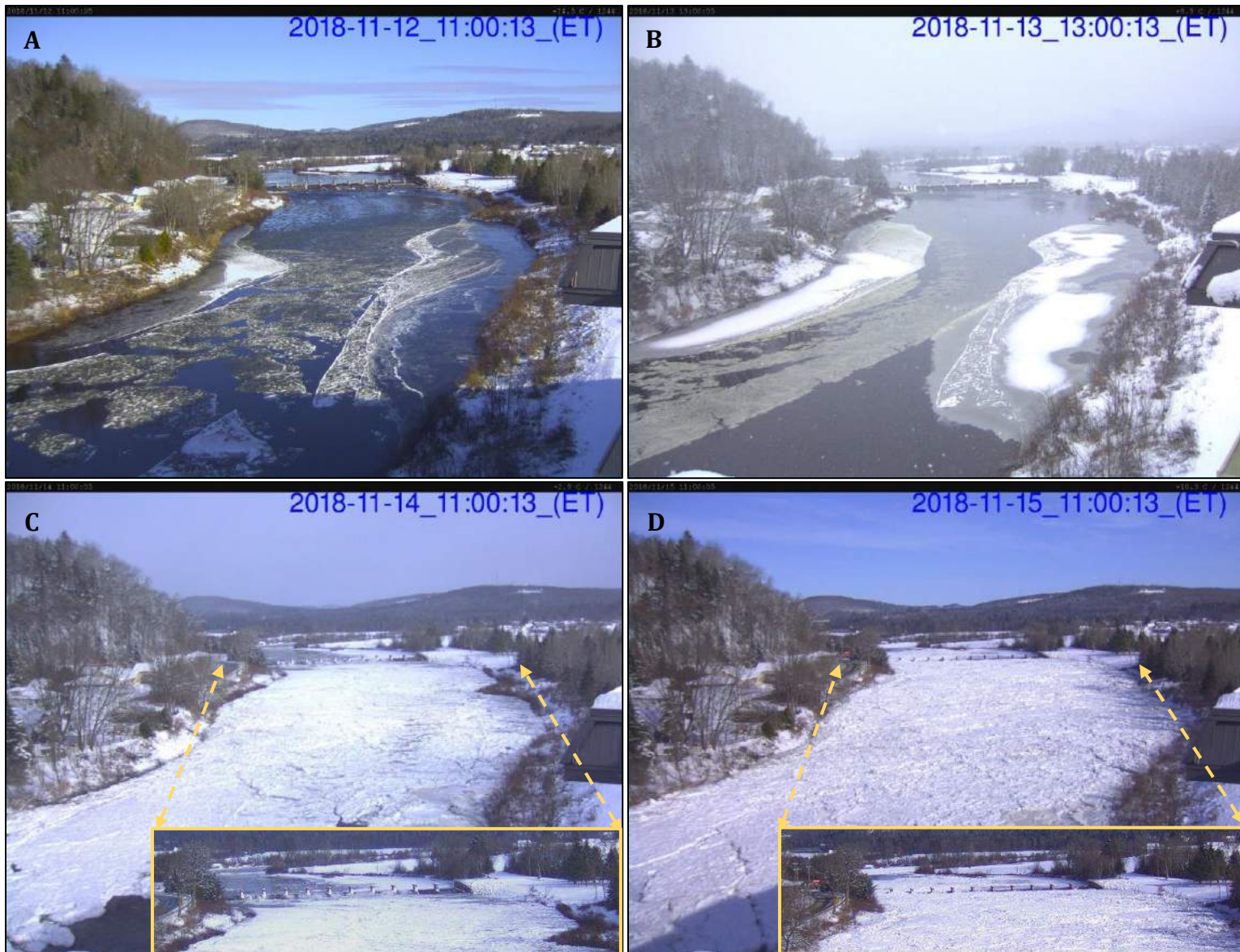
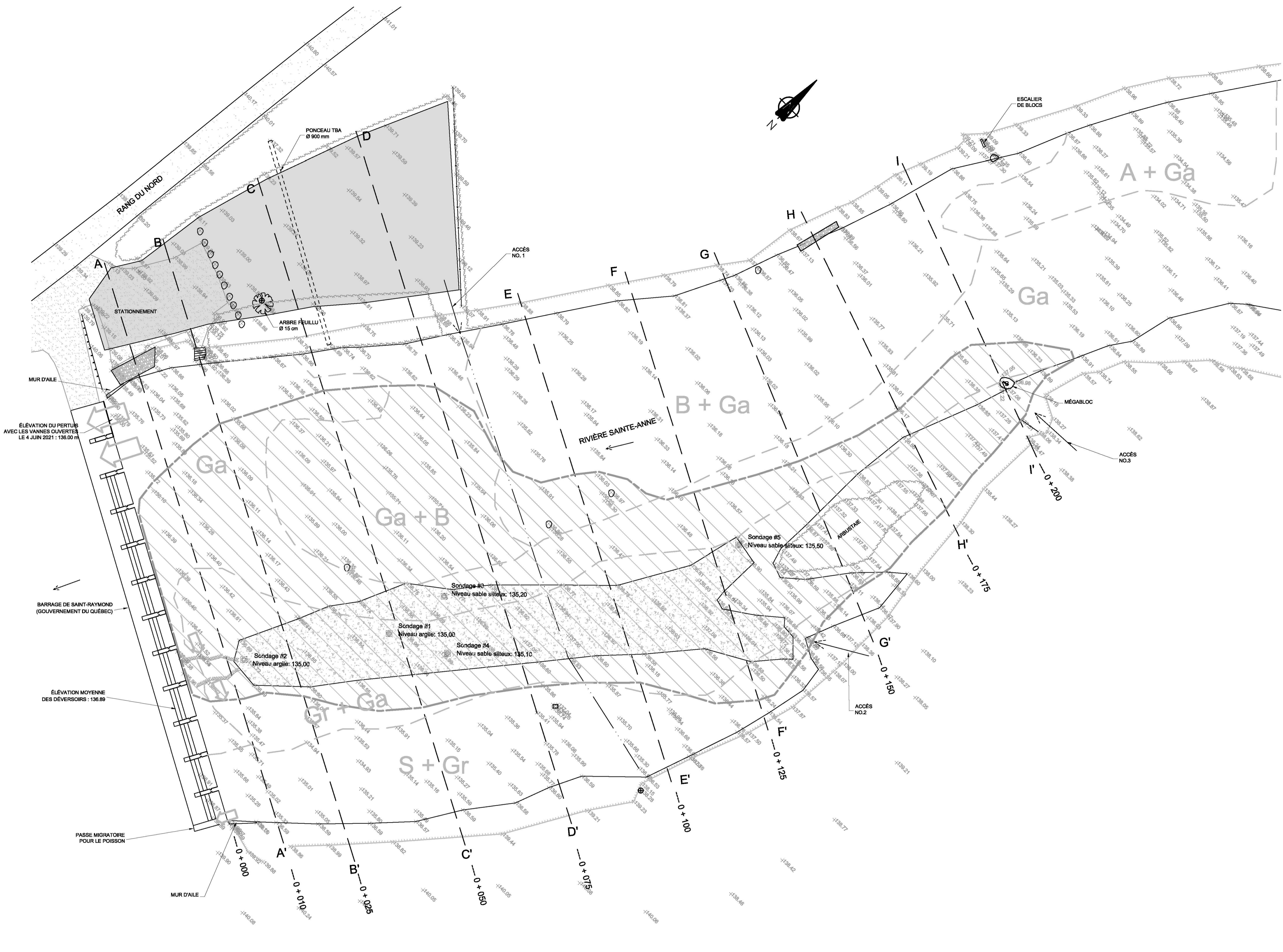
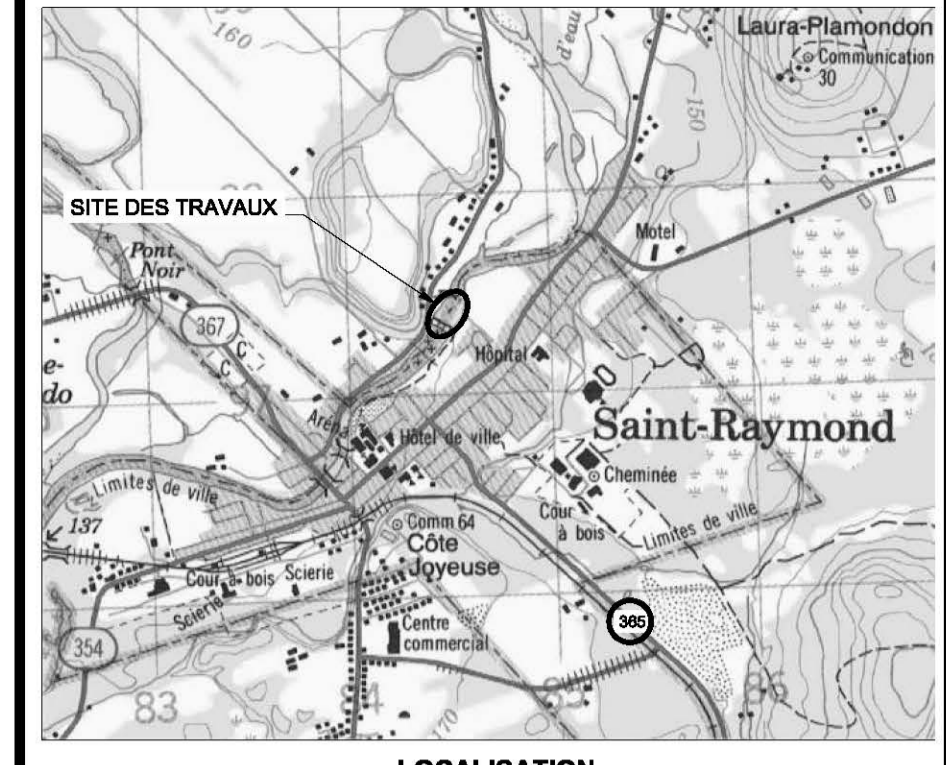


Figure 4. État du couvert de glace A) le 12, B) le 13, C) le 14 et D) le 15 novembre 2018, respectivement. Le barrage doit être submergé avant d’initier un couvert de glace en amont (voir agrandissements en C et D). Cela, malgré l’opération des vannes du barrage. Ce phénomène peut subvenir en une seule nuit.

ANNEXE A – Plans (*document de travail*) concernant le dragage
du réservoir du barrage-estacade de Saint-
Raymond



VUE EN PLAN
Ech. : 1:400



- LÉGENDE**
- Bord de feu à 29 m³/s avec les vannes ouvertes
 - Direction de l'écoulement
 - Ponçou
 - Stationnement
 - Enrochement en rive
 - Gravier et galets exondés avec vanne ouvertes à 29 m³/s
 - Bloc ou mégabloc rocheux
 - Bloc de béton
 - Sondage du substrat et des dépôts meubles
 - Escalier en pierre
 - Grille en acier
 - Clôture
 - Pancarte
 - Estacade flottante de sécurité (câble d'acier avec bouées jaunes)
 - Limite de bois
 - Petit rapide provoquant une différence de niveau d'eau entre les rives droite et gauche
 - Flèche de circulation des eaux lorsque les vannes sont ouvertes
 - Chaînage en mètres depuis la face amont du barrage

- TYPES DE SUBSTRATS**
- Limite de l'unité
 - A Argile silteuse ou silt argileux
 - S Sable
 - Gr Gravier
 - Ga Galets
 - B Blocs

- PROJETÉ**
- Surface du lit à draguer
Superficie : 10 470 m²
 - Surface à décapier puis à remblayer à l'élevation 140.00 m avec du sable grossier et du gravier récupéré sur le site, par dragage

DOCUMENT DE TRAVAIL

| REVISIONS | |
|-----------|-------------|
| DATE | DESCRIPTION |
| | |

CONSULTANT: **ENB** Environnement Nordique Inc.
250, rue des Comores, Lévis (Québec) G7A 3A1
cbeaulieu@enb.ca TEL: 418-836-8535 Cell: 418-829-4155

BCEAUX:

CLIENT: **Ville de Saint-Raymond**
LE DÉPARTEMENT DE L'AMÉNAGEMENT

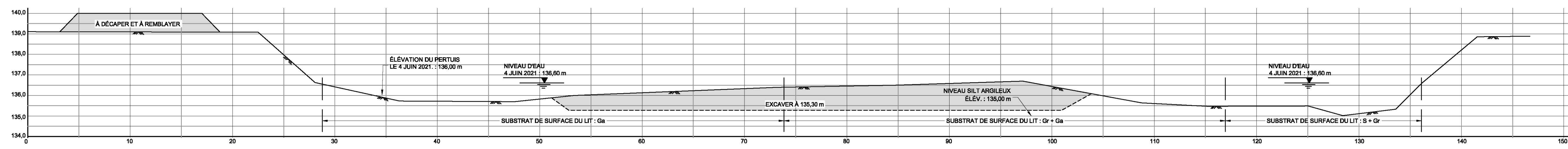
TITRE: Dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond

DESSIN: Vue en plan générale

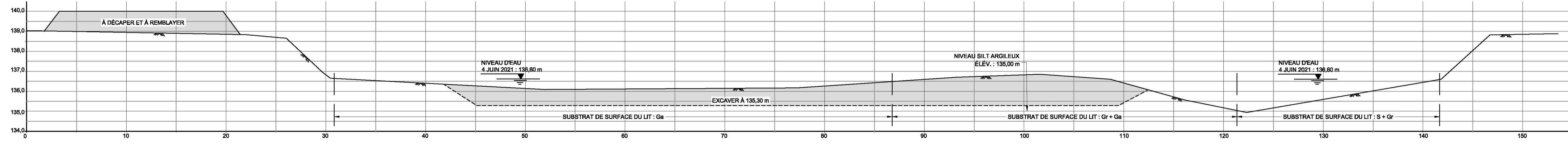
ÉCHELLE: 1:500

CONCEPTION: Claude Beaulieu, Ing
Simon Bélanger, T.P., géomorphologue

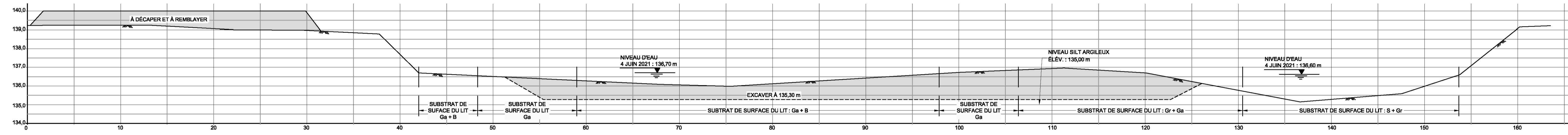
DESSINE: André Letellier, tech.
DATE: 29 novembre 2021
PROJET NO: 21-0561



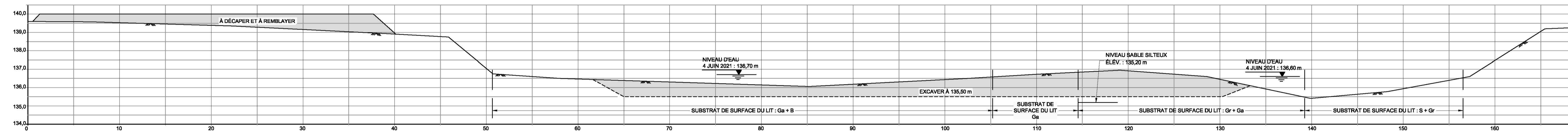
COUPE A-A' À 0+010 m
ECH. HOR. : 1 : 200
ECH. VER. : 1 : 100



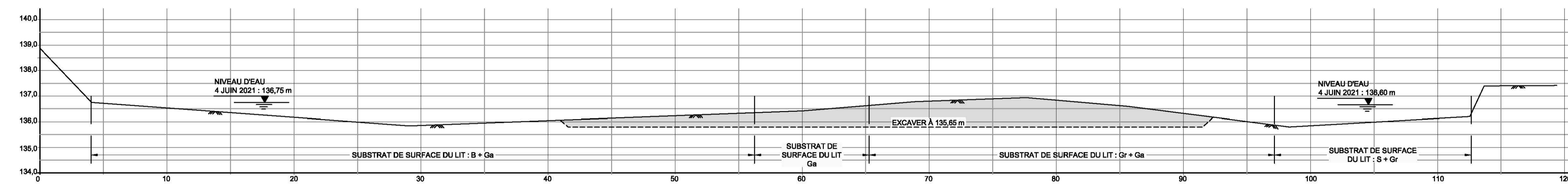
COUPE B-B' À 0+025 m
ECH. HOR. : 1 : 200
ECH. VER. : 1 : 100



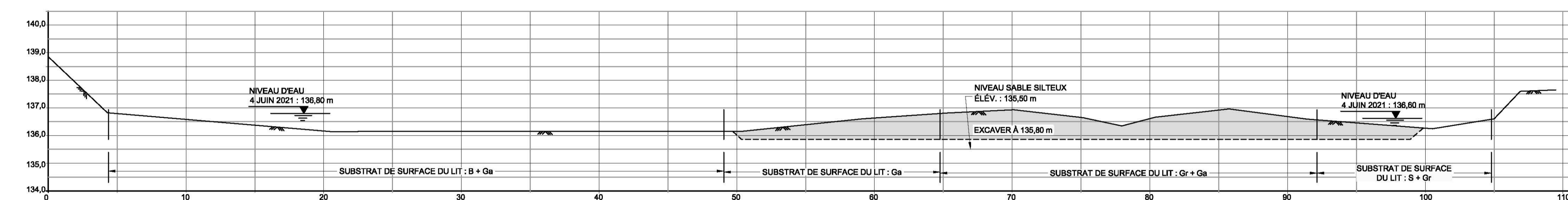
COUPE C-C' À 0+050 m
ECH. HOR. : 1 : 200
ECH. VER. : 1 : 100



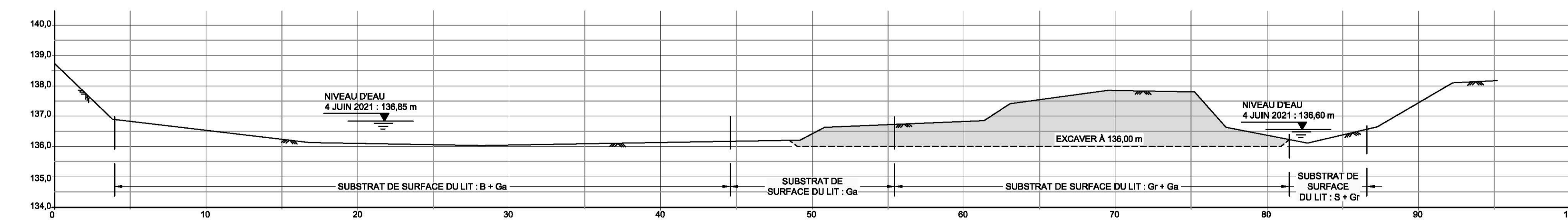
COUPE D-D' À 0+075 m
ECH. HOR. : 1 : 200
ECH. VER. : 1 : 100



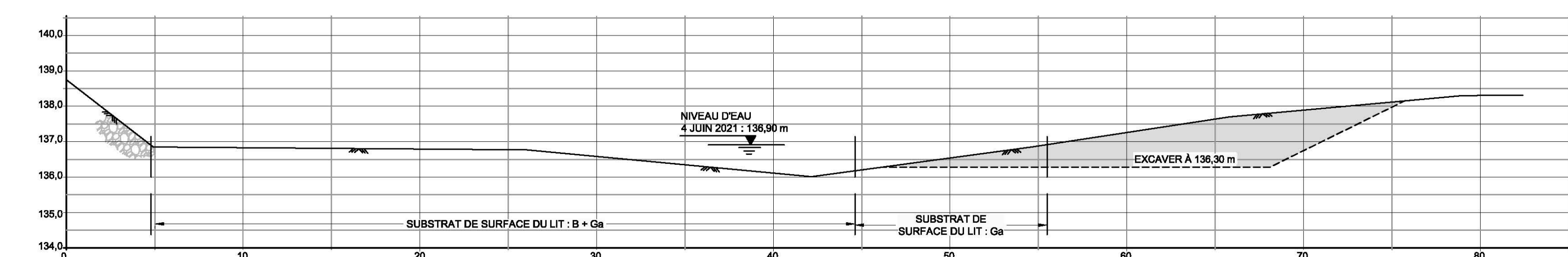
COUPE E-E' À 0+100 m
ECH. HOR. : 1 : 200
ECH. VER. : 1 : 100



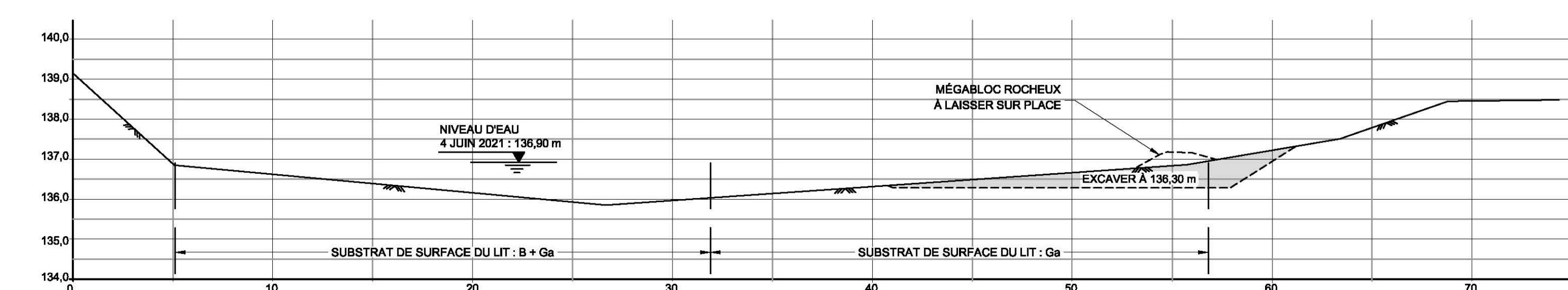
COUPE F-F' À 0+125 m
ECH. HOR. : 1 : 200
ECH. VER. : 1 : 100



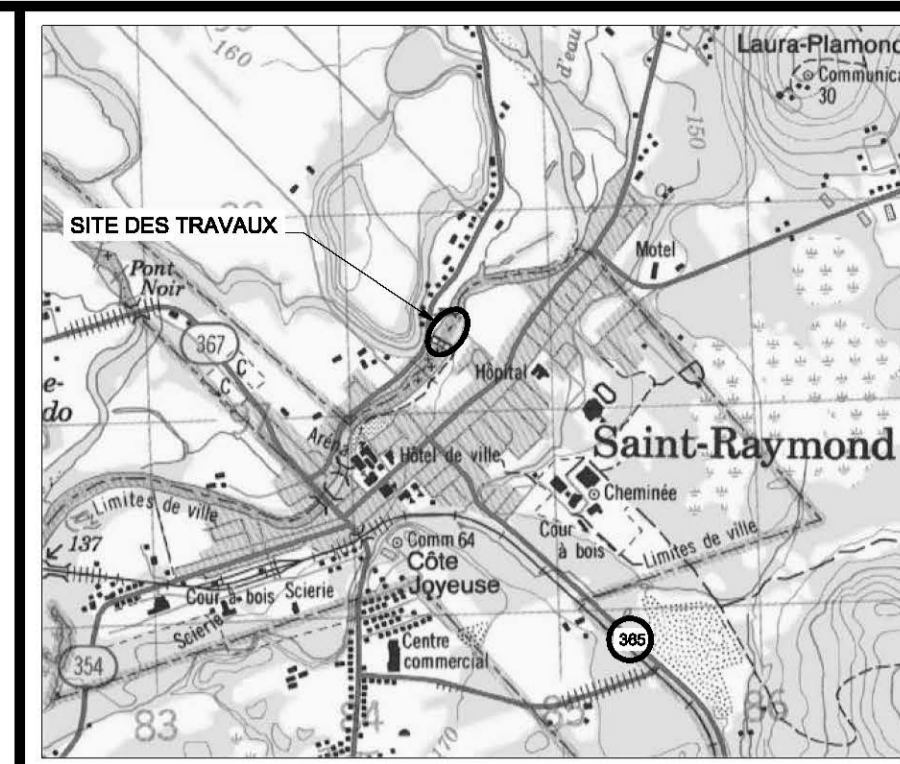
COUPE G-G' À 0+150 m
ECH. HOR. : 1 : 200
ECH. VER. : 1 : 100



COUPE H-H' À 0+175 m
ECH. HOR. : 1 : 200
ECH. VER. : 1 : 100



COUPE I-I' À 0+200 m
ECH. HOR. : 1 : 200
ECH. VER. : 1 : 100



LOCALISATION

LÉGENDE

- Surface du sol ou du lit en juin 2021
- À DÉCAPER ET À REMBLAYER

TYPES DE SUBSTRATS

- Limite de l'unité
- S** Sable
- Gr** Gravier
- Ga** Galets
- B** Blocs

DOCUMENT DE TRAVAIL

REVISIONS

| A | M | J | DESCRIPTION |
|---|---|---|-------------|
| | | | |

CONSULTANT: **ENI** Environnement Nordique Inc.
250, rue des Comarces, Lévis (Québec) G7A 3A1
cbeaulieu@enid.com
Tél.: 418-836-8535
Cell.: 418-829-4155

CLIENT: **Ville de Saint-Raymond**
LES SERVICES DÉVELOPPEMENT

TITRE: Dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond

DESSIN: Coupes transversales A-A' à I-I'

ÉCHELLE: Indiquée

CONCEPTION: Claude Beaulieu, Ing
Simon Bélanger, T.P., géomorphologue

DESSINÉ: André Letellier, tech.

DATE: 29 novembre 2021

PROJET NO: 21-0561

ANNEXE B – Avis faunique – Potentiel d'utilisation par le poisson de la zone visée par les travaux projetés en amont du barrage-estacade de Saint-Raymond

Le 24 novembre 2021

Monsieur François Dumont
Directeur général
Ville de Saint-Raymond
375, rue Saint-Joseph
Saint-Raymond (Québec) G3L1A1

Objet : Avis technique – Potentiel d'utilisation par le poisson de la zone visée par les travaux projetés dans la demande de soustraction en amont du barrage-estacade de Saint-Raymond
N/Dossier : 21-0294

Monsieur Dumont,

Cet avis est le résultat d'une analyse et d'une appréciation professionnelle sommaire de l'habitat du poisson dans la zone de dragage projetée, ainsi qu'une analyse préliminaire de la qualité des sédiments qui compose le littoral de la rivière.

Habitat du poisson

Le milieu aquatique du secteur visé par les travaux de dragages prévus dans la demande de soustraction a fait l'objet d'une caractérisation le 26 août 2021 par une équipe composée de techniciens de la faune. Lors de cette caractérisation, plusieurs paramètres ont été évalués et mesurés. Voici les principaux éléments qui en ressortent :

- La profondeur d'eau variait entre 0,6 et 1,3 mètre
- La vitesse du courant était d'environ 0,4 m/s
- Le substrat était constitué principalement de galets et de cailloux et en moindre mesure, de blocs et gravier
- Aucun herbier aquatique n'a été observé
- Aucun débris ligneux ou autre structure d'abris n'a été observé

Les espèces présentes dans le secteur visé par les travaux ne sont pas susceptibles de frayer dans le type de substrat présent ou d'y retrouver un habitat d'intérêt autre que celui du corridor de déplacement, qui est limité par la présence même du barrage estacade. De plus, le substrat dans cette section de la rivière est très mobile et subit un important raclage par les glaces durant l'hiver, ce qui aurait un effet très néfaste sur la survie des œufs, le cas échéant ¹.

Outre pour la fraie, l'habitat pourrait être utilisé pour l'alimentation de plusieurs espèces de poisson, cependant l'absence de végétation aquatique offre peu de support pour la chaîne alimentaire.

La profondeur d'eau, la rareté des abris et la vitesse du courant relativement élevé ne sont pas propices à l'alevinage des poissons.

Le potentiel d'utilisation du secteur à l'étude par les espèces répertoriées et inventoriées est donc de faible à nul.

Le tableau 1 présente les espèces répertoriées dans le secteur à l'étude de sur la rivière Sainte-Anne entre 1981 et 2002, tandis que le tableau 2 présente les espèces capturées lors de la pêche expérimentale réalisée en 2021 directement au niveau de l'aire d'étude de dragage proposée.

Tableau 1. Espèces de poissons répertoriés dans le secteur à l'étude de la rivière Sainte-Anne entre 1981 et 2002².

| Espèce | | Statut de protection | Type de reproduction ³ | Potentiel d'utilisation pour la fraie |
|-------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Nom commun | Nom latin | | | |
| Chabot visqueux | <i>Cottus cognatus</i> | Aucun | Spéléophile | Faible |
| Épinoche à trois épines | <i>Gasterosteus aculeatus</i> | Aucun | Phytolithophile | Nul |
| Méné à nageoires rouges | <i>Luxilus cornutus</i> | Aucun | Lithopélagophile | Nul |
| Meunier noir | <i>Catostomus commersonii</i> | Aucun | Lithopélagophile | Faible |
| Meunier rouge | <i>Catostomus catostomus</i> | Aucun | Lithophile | Faible |
| Mulet à cornes | <i>Semotilus atromaculatus</i> | Aucun | Lithopélagophile | Faible |
| Naseux des rapides | <i>Rhinichthys cataractae</i> | Aucun | Lithophile | Faible |
| Ombre de fontaine | <i>Salvelinus fontinalis</i> | Aucun | Lithophile | Faible |
| Omisco | <i>Percopsis omiscomaycus</i> | Aucun | Lithophile | Nul |

¹ 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. 1er août 2019. 14 p.

² CAPSA 2014. Plans directeurs de l'eau des secteurs d'intervention de la zone de gestion de la CAPSA. Organisme de bassin versant : rivière Sainte-Anne, Portneuf et secteur La Chevrotière. Québec. 621 p.

³ La Violette, N., D. Fournier, P. Dumont et Y. Mailhot, 2003. Caractérisation des communautés de poissons et développement d'un indice d'intégrité biotique pour le fleuve Saint-Laurent, 1995-1997. Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la recherche sur la faune, 237 p.

Tableau 2. Espèces capturées lors de la pêche expérimentale réalisée le 8 juillet 2021 en amont du barrage-estacade de Saint-Raymond

| Espèce | | Nombre d'individus | Type de reproduction ³ | Potentiel d'utilisation pour la fraie |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Nom commun | Nom latin | | | |
| Mené à nageoires rouges | <i>Luxilus cornutus</i> | 1 | Phytophile | Nul |
| Meunier noir | <i>Catostomus commersonii</i> | 10 | Lithopélagophile | Faible |
| Mulet à cornes | <i>Semotilus atromaculatus</i> | 5 | Lithopélagophile | Faible |
| Naseux des rapides | <i>Rhinichthys cataractae</i> | 14 | Lithophile | Faible |
| Omisco | <i>Percopsis omiscomaycus</i> | 1 | Lithophile | Nul |
| Ouitouche | <i>Semotilus corporalis</i> | 282 | Phytolithophile | Faible |

En effet, l'omble de fontaine fraie à l'automne, principalement sur un substrat de gravier et les œufs demeurent dans le substrat jusqu'au printemps⁴. Le substrat constitué principalement de galets est trop grossier pour l'omble de fontaine.

Le naseux des rapides fraie également sur du gravier et n'est donc pas susceptible d'utiliser l'aire d'étude pour la fraie⁴.

Les meuniers ne sont pas non plus susceptibles de frayer à cet endroit. Ces derniers pourraient possiblement utiliser le substrat en place, mais préfèrent tout de même un substrat moins grossier composé plutôt de cailloux et de gravier⁵. En outre, les meuniers remontent les rivières pour frayer au pied des rapides ou des obstacles infranchissables⁴. L'aire d'étude étant située directement en amont d'un obstacle qui, bien que doté d'une passe migratoire, est considéré comme étant infranchissable en raison de sa configuration et des vitesses d'écoulement peu favorables (le barrage-estacade). Il est peu probable qu'elle soit utilisée par ces poissons.

Le mené à nageoire rouge, la ouitouche et le mulet à cornes aménagent des nids sur le lit des cours d'eau en déplaçant le gravier. Le substrat en place est beaucoup trop grossier pour être déplacé par ces espèces et ne convient pas à la fraie de ces derniers.

L'omisco fraie sur un substrat de sable ou de gravier, dans les rivières profondes et lentes⁴. Ce type d'environnement ne correspond pas à la section à l'étude de la rivière.

⁴ Desroches, J.F. et I. Picard. 2013. Poissons d'eau douce du Québec et des maritimes, Éditions Michel Quintin. 470 pages

⁵ Langhorne, A.J., M. Neufeld, G. Hoar, V. Bourhis, D.A. Fernet et C.K. Minns. 2001. Life history characteristics of freshwater fishes occurring in Manitoba, Saskatchewan and Alberta, with major emphasis on lake habitat requirements. Can. Ms Rpt. Fish Aquat. Sci. 2579 : xii + 170 pages.

Le chabot visqueux fraie principalement dans les petites rivières, dans des cavités sous des blocs d'un diamètre supérieur à 35 cm⁶. Ce type de substrat n'a pas été observé lors de la caractérisation. L'habitat ne serait donc pas particulièrement propice à la fraie du chabot visqueux.

Finalement, l'épinoche à trois épinoches est un poisson qui dépose ses œufs dans la végétation aquatique⁴. L'absence de végétation n'est pas propice à la fraie de cette espèce.

Qualité des sédiments

Au cours de l'été 2021, les sédiments du lit de la rivière Sainte-Anne ont été échantillonnés directement au site prévu pour les travaux de dragage projetés. Les résultats de l'analyse pour les paramètres possédant un critère de qualité des sédiments défini sont présentés au tableau 3.

Tableau 3. Analyse de la qualité des sédiments

| Paramètre | Unités | LDR | Station à l'étude | Critères sédiments ⁷ | | |
|--|--------|------|-------------------|---------------------------------|-------|-------------------|
| | | | | CER* | CSE** | CEP**** |
| Métaux et métalloïdes | | | | | | |
| Arsenic (As) | mg/kg | 1,5 | 1,0 | 4,1 | 5,9 | 17 |
| Cadmium (Cd) | mg/kg | 0,3 | <0,30 | 0,33 | 0,6 | 3,5 |
| Chrome (Cr) | mg/kg | 2 | 3 | 25 | 37 | 90 |
| Cuivre (Cu) | mg/kg | 5 | 2 | 22 | 36 | 200 |
| Mercure (Hg) | mg/kg | 0,02 | <0,02 | 0,094 | 0,17 | 0,49 |
| Nickel (Ni) | mg/kg | 2 | 2 | N/D | N/D | N/D |
| Plomb (Pb) | mg/kg | 5 | 8 | 25 | 35 | 91 |
| Zinc (Zn) | mg/kg | 10 | 43 | 80 | 120 | 310 |
| Autres | | | | | | |
| Soufre (S) total | mg/kg | 100 | <100 | N/A | N/A | N/A |
| Carbone organique total | % | 0,05 | 0,07 | N/A | N/A | N/A |
| % d'humidité | % | 0,2 | 12,8 | N/A | N/A | N/A |
| Hydrocarbures pétroliers(C10-C50) | | | | Effet chronique | | Effet aigu |
| Hydrocarbures pétroliers C10-C50 | mg/kg | 100 | <100 | 164 | | 832 |

N/D = non disponible, N/A = non applicable

CER = Concentration seuil d'effet rare; CSE= concentration seuil produisant un effet; CEP = concentration produisant un effet probable

* = dépasse le critère CER; **dépasse le critère CSE; ****dépasse le critère CEP

⁶Majeski M. J. et P.A. Cochran. 2009. Spawning season and habitat use of slimy sculpin (*Cottus cognatus*) in southeastern Minnesota. *Journal of freshwater ecology*, 24 :2. 301-307.

⁷ Environnement Canada et Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2007. Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration. 39 pages.

On peut observer en analysant les résultats présentés au tableau 3 que les concentrations sont bien inférieures aux seuils désignés pour les critères sur la qualité des sédiments, et ce, pour tous les paramètres. En étant en deçà du seuil de concentration du critère des effets rares, le substrat est donc considéré comme n'étant pas contaminé et ne représentant pas de risque dans l'éventualité où des activités de dragage avaient lieu.

Au niveau des hydrocarbures pétroliers (C10-C50), la concentration est inférieure au seuil d'effet chronique ce qui signifie qu'aucun effet néfaste n'est anticipé en lien avec ce paramètre.

Les résultats d'analyse granulométrique et de la sédimentométrie, qui ne sont pas présentés ici afin d'alléger le document, indiquent que le substrat est pratiquement exempt de limon ou d'argile. Une granulométrie grossière comme celle constatée sur le site à l'étude est moins susceptible d'entraîner des matières en suspension dans la rivière lors des activités de dragage, par rapport à un substrat composé de limon par exemple. De plus, il est important de mentionner que le substrat analysé n'est pas représentatif du substrat généralement en place au site à l'étude et constitue plutôt un échantillon de la granulométrie la plus fine observé sur les lieux, la portion grossière du substrat ne pouvant pas être échantillonné.

Veillez agréer, Monsieur, l'expression de mes sentiments les meilleurs.



Jeff Goulet
Biologiste, B. Sc.

**ANNEXE C – Avis hydraulique final relatif au risque de l'aléa
d'inondation pour la résidence sise au [REDACTED]
[REDACTED], dans la municipalité de Saint-Raymond.**

Le 4 novembre 2021

Madame [REDACTED]
[REDACTED]
Saint-Raymond (Québec) [REDACTED]

Objet : Transmission de l'avis hydraulique final relatif au risque de l'aléa d'inondation pour la résidence sise au [REDACTED] dans la municipalité de Saint-Raymond
N/Dossier : MSP21018

Madame,

La présente fait suite à la demande de soutien technique adressée à la Direction de l'hydraulique du ministère des Transports du Québec (MTQ).

Vous trouverez donc ci-joint l'avis hydraulique qui concerne votre propriété, réalisé par l'ingénieure du MTQ, M^{me} Josée Émond et celui-ci est accompagné également de l'annexe d'Environnement Nordique Inc.

Pour toute demande de renseignements supplémentaires, n'hésitez pas à communiquer avec M. Jean-François Lavoie responsable de ce dossier. Vous pouvez le rejoindre par téléphone au 418 643-3244, poste 42330 ou par courriel à jean-francois.lavoie@msp.gouv.qc.ca.

Nous vous prions de recevoir, Madame, nos salutations distinguées.

Le directeur régional,



Éric Drolet

ED/jo

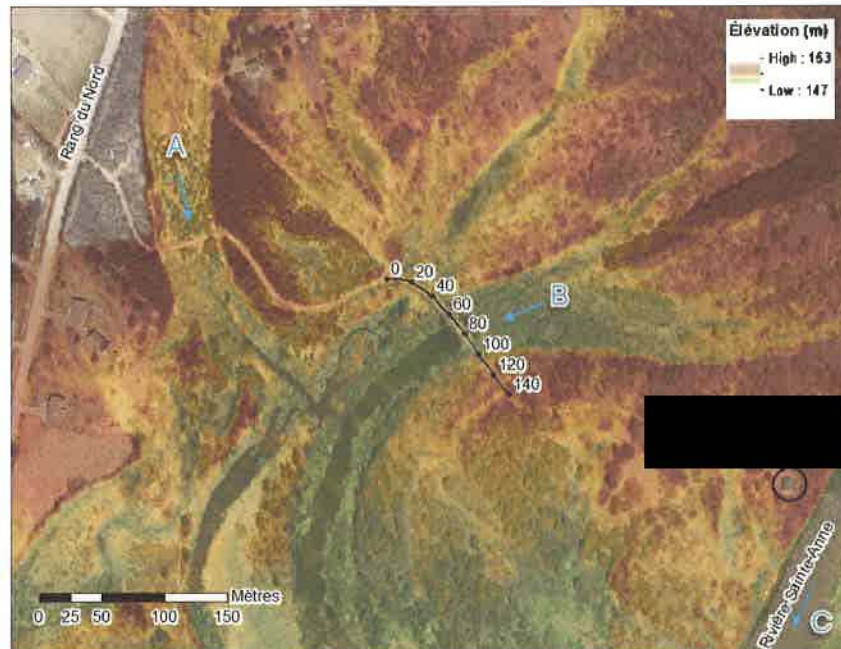
p. j. (2)

c. c. M. François Dumont, municipalité de Saint-Raymond
M. Jean-François Lavoie, MSP

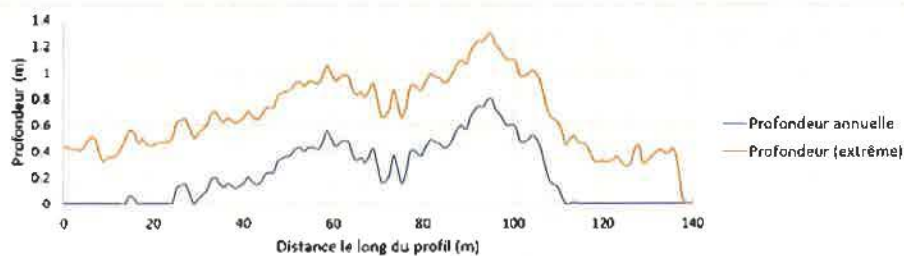
AVIS TECHNIQUE

| IDENTIFICATION | |
|--|--|
| Dossier n° : | MSP21018 |
| Route : | [REDACTED] |
| Ministère de la Sécurité publique – Direction générale adjointe du rétablissement | |
| Demandeur : | Obstacle : Rivière Sainte-Anne |
| Municipalité : | Saint-Raymond |
| Coordonnées : | Longitude : [REDACTED] Latitude : [REDACTED] |
| Préparé par : | Josée Emond, ing., M. Sc. |
| Signature : | [Signature] |
| Date : | 2021/10/21 |
| AAAA / MM / JJ | |
| OBJET | |
| Avis technique concernant l'analyse de risque de l'aléa d'inondation | |
| NOTES | |
| <p>À la suite d'un événement de crue du 25 et 26 décembre 2020, le ministère de la Sécurité publique (MSP) a mandaté le ministère des Transports (MTQ) afin d'analyser le risque d'inondation pour la résidence sise au 1194, rang du Nord, à Saint-Raymond. Cette demande a été faite par Mme Gilla Huet, en date du 28 juin 2020.</p> <p>Une visite sur le terrain a été effectuée le 20 juillet 2021 en présence de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Josée Emond, Pierre Gaudreau et Bastien Wipliez, ingénieurs à la Direction de l'hydraulique du MTQ; • Julie Bilodeau, conseillère en sécurité civile à la Direction régionale de la sécurité civile et de la sécurité incendie de la Capitale-Nationale, de la Chaudière-Appalaches et du Nunavik du MSP; • [REDACTED] <p>À partir des observations et des indices des eaux hautes recueillis sur le terrain lors de la visite (par ex. débris et marques de glace), du témoignage de Mme [REDACTED] lors de cette même visite, des différentes informations et photographies fournies par M. [REDACTED] le MSP, ainsi que du relevé LIDAR du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) datant de 2012 et ayant une résolution de 1 m, les conclusions suivantes sont tirées :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'élévation du dessus du plancher du rez-de-chaussée de la résidence est à l'élévation 151,5 m selon le plan d'arpentage fourni par M. [REDACTED] • Les niveaux d'eau suivants ont été déterminés (en référence au CGVD28) : <ul style="list-style-type: none"> ○ le niveau moyen annuel atteint en moyenne aux différents points de mesures sur la propriété par les crues près de la résidence est à l'élévation approximative de 149,7 m; ○ le niveau atteint en avril 2019 sur le chemin près de la maison est estimé, à partir de photographies, à environ 150,1 m; ○ le niveau atteint en moyenne aux différents points de mesures sur la propriété, lors de la crue de décembre 2020, est approximativement de 150,2 m selon les différents indices relevés et les photos reçues. • La figure 1 présente plusieurs éléments d'intérêt pour l'analyse du dossier du [REDACTED] notamment : <ul style="list-style-type: none"> ○ le relevé LIDAR de 2012 a été superposé à l'orthophotographie de 2018 en (a) : l'élévation du terrain va du vert (le plus bas) au jaune puis au brun (le plus haut). Les flèches bleues mettent l'accent sur les chenaux d'écoulement préférentiels lorsque la rivière est en crue, où peuvent se produire des débordements sur le chemin d'accès. Des ponceaux de faibles dimensions (diamètres) sont actuellement présents à ces deux sites; | |

- o le chenal A est généralement peu ou pas inondé, alors que le chenal B est davantage exposé aux inondations et est inondé chaque année. Madan [redacted] souligné qu'on lui avait déjà mentionné que le chenal B aurait été autrefois le lit d'écoulement principal de la rivière. Celui-ci aurait été désaffecté à la suite de travaux visant à faciliter le transport du bois et au cours desquels un nouveau lit principal d'écoulement a été créé à l'endroit où on peut le voir aujourd'hui (chenal C). Les photographies aériennes de 1965 ont été consultées : déjà, à cette époque, l'écoulement s'effectuait principalement via le bras principal actuel, mais il a évolué depuis.
- o Le profil de la profondeur d'eau associée à des niveaux d'eau annuel (149,7 m) et extrême (150,2 m), pour le chenal B, a été tracé en (b). La profondeur a été déterminée à partir de l'élévation du chemin tirée du relevé LiDAR. Il faut souligner que puisque le chemin est régulièrement endommagé par les crues dans ce secteur et ensuite réparé, l'élévation réelle actuelle peut être différente. Il n'en demeure pas moins que cela donne une bonne appréciation de la situation. La profondeur d'eau à cet endroit est élevée lors de crues.



(a)



(b)

Figure 1 : Éléments d'intérêt au [redacted] (a) LiDAR superposé à l'orthophotographie de 2018 et identification du tronçon le plus touché du chemin d'accès et (b) profil de la profondeur d'eau le long de ce tronçon

- À l'endroit des deux chenaux, le gravier (0-3/4 po) et certains cailloux de près de 100 mm de diamètre, constituant les matériaux de la route, sont emportés par les eaux. Plusieurs cailloux de 100 mm de diamètre ne sont toutefois pas mobilisés. La figure 2 présente en (a) une partie du tronçon identifié à la figure 1, soit le tronçon le plus susceptible aux inondations (chenal B). À la figure 2 (b), l'écoulement observé en avril 2019 est présenté pour le même secteur. À partir de ces observations, il est estimé que la vitesse d'écoulement sur le chemin atteint de 1 à 1,5 m/s. Cette vitesse se produit à un endroit où la profondeur est d'environ 0,4 à 0,6 m en crue annuelle et 0,9 à 1,2 m en crue extrême. Madan [redacted] a mentionné que **les services d'urgence ne pouvaient pas accéder à sa propriété en tout temps**. La résidence se retrouve donc isolée. De plus, le chemin d'accès à la résidence a une longueur d'environ 700 m et il est étroit, donc impossible d'y faire demi-tour.



(a)



Source : M [REDACTED]

(b)

Figure 2 : Photographies du chemin inondé : (a) état lors de la visite en juillet 2021 et (b) conditions lors de la crue d'avril 2019

- Des photos et informations ont été obtenues pour les événements du 22 décembre 2018, 20 avril 2019 et 25 décembre 2020, qui ont inondé le chemin d'accès de M [REDACTED]. La figure 1 présente aussi une profondeur d'eau importante sur le chemin d'accès pour des événements annuels. Ainsi, la fréquence des événements pour lesquels l'accès à la résidence est limité ou même impossible est importante. Par ailleurs, il est conclu, à partir des renseignements obtenus et des données hydrométriques, que ces événements ont généralement une durée allant de quelques heures à un ou deux jours.
- Des marques de glaces sur des arbres ont aussi été observées dans ce secteur, ce qui témoigne d'un transport possible de morceaux de glace à cet endroit. La figure 3 présente aussi un bloc de glace de taille importante, sur le chemin d'accès, en décembre 2018.



Source : Mme [REDACTED]

Figure 3 : Bloc de glace près du chenal B de la figure 1, en décembre 2018

- Lors de crues, le sous-sol de M [REDACTED] est inondé et l'utilisation de pompes est requise, qui ont d'ailleurs eu des défaillances lors de l'événement de décembre 2020. La toilette est également non fonctionnelle, sans doute car le niveau d'eau est trop haut dans la fosse septique.
- Lors de la visite sur le terrain, M [REDACTED] a aussi exprimé son inquiétude par rapport à l'érosion de la rive. La figure 4 présente que la rive est effectivement en érosion et qu'il y a des dépôts visibles sur la rive opposée, ce qui témoigne de processus sédimentaires et érosifs actifs. Lors de l'enquête sur le terrain, une distance de 16,6 m entre le haut du talus et la résidence a été mesurée, alors que le haut du talus était 2,5 m au-dessus du niveau des eaux du jour. Un avis (par courriel) concernant le risque lié à l'érosion a toutefois déjà été réalisé par Mme Marie-Noëlle Juneau du MSP, le 23 juin 2021, concluant que la résidence n'était pas menacée par l'érosion, bien que des reculs soient susceptibles de survenir. La visite démontre qu'actuellement, il n'y a pas lieu de revoir cette conclusion.



Figure 4 : État de la berge en juillet 2021

- La ville de Saint-Raymond étudie la possibilité de construire une structure de retenue des glaces d'environ 1,2 km en aval de la résidence et la rivière a déjà été modélisée par un mandataire. Quelques informations liées au projet de même qu'en ce qui concerne les niveaux atteints en crue nous ont été transmises et sont annexées à cet avis. De cette annexe, il ressort que :
 - le niveau d'une période de retour de 2 ans a été déterminé à l'élévation 149,6 m alors que le niveau d'une période de retour de 100 ans serait de 150,2 m;
 - il a été estimé que l'événement de décembre 2020 avait une récurrence de 55 ans (ceci fera toutefois l'objet d'une réanalyse)
 - en cas de construction de cet ouvrage, la fréquence des inondations en présence de glaces pourrait augmenter, de même que leur durée, qui pourrait atteindre une période prolongée. Il n'est pas anticipé que les niveaux atteints par l'eau augmentent.
 - l'augmentation de la fréquence des événements d'embâcles pourrait entraîner l'accélération des processus d'érosion.

Dans le cadre de ce projet, l'étude de solutions (comme le déplacement de la maison) a déjà été amorcée.

En conclusion :

- Considérant l'élévation du rez-de-chaussée et des crues, la résidence n'est pas en danger imminent d'inondation.
- Toutefois, il ressort de l'analyse que l'accès routier à la propriété peut, par moment, présenter des **conditions hydrauliques difficiles et dangereuses, voire impraticables, et ce, en moyenne chaque année. La maison est alors isolée.** Des vitesses d'écoulement estimées de 1 à 1,5 m/s se produisent sur une profondeur pouvant atteindre environ 0,4 à 0,6 m en moyenne à chaque année, et davantage pour des crues plus importantes. Le passage de blocs de glace de taille importante est également possible dans certains tronçons de cet accès. Il y a donc lieu que le MSP fasse une analyse complémentaire en regard d'aspects autres, relatifs à la sécurité civile et à l'administration des programmes d'aides aux sinistrés.
- Le besoin de pompes de même que la non-fonctionnalité de la toilette lors de crues sont également soulignés.
- La possibilité de la construction de l'ouvrage de retenue des glaces doit aussi être considérée dans l'analyse du MSP, puisqu'il est anticipé que les inondations du chemin d'accès seront plus fréquentes et longues.

Les conclusions de cet avis sont basées sur les informations disponibles au moment sa réalisation, dont les principaux points d'intérêts sont présentés dans cet avis. Il permet de statuer sur des problématiques apparentes de nature hydraulique uniquement. Il ne tient pas en compte des problématiques potentielles pouvant survenir à long terme. Si de nouvelles informations sont ajoutées ou si une dégradation du site est observée à la suite de la visite sur le terrain, le responsable du MSP doit être mis au fait. Les conclusions du présent avis pourraient devoir être revues.

ANNEXE 1

Réponses aux questions sur
le [REDACTED] à Saint-Raymond

Lévis, le 16 août 2021

Madame Josée Emond, ing., M. Sc.
Direction de l'hydraulique | Direction générale des structures
Ministère des Transports
800 Place D'Youville, 6^e étage
Québec (Québec) G1R 3P4
josee.emond@transport.gouv.qc.ca

Objet : Réponses aux questions sur le [REDACTED] Saint-Raymond
Référence ENVIRONNEMENT NORDIQUE. 21-0403

Madame Emond,

Voici des réponses aux questions que vous nous avez transmises par courriel le 26 juillet dernier.

1. a) *Avez-vous les élévations d'eau/vitesses à la hauteur de [REDACTED] pour les différentes périodes de retour à l'état actuel?*
b) *Avez-vous les niveaux en eau libre seulement, ou avez-vous aussi évalué des niveaux en présence de glaces/embâcles?*

Le modèle hydraulique HEC-RAS 1D a été construit sur environ 8 kilomètres entre les points kilométriques (PK) 8.4 et 13.5. La résidence du [REDACTED] se situe près du PK 11.7 (figure 1, en annexe). Le modèle a été calé en eau libre et validé en présence d'un embâcle dans le bief (à l'hiver 2019-2020) selon plusieurs périodes de récurrence et selon différents scénarios de glace. Deux sections transversales se trouvent à environ 40 m en amont et en aval de la résidence concernée. Le tableau 1 indique les élévations et les vitesses moyennes à ces sections transversales.

Le modèle unidimensionnel ne permet pas d'obtenir des vitesses d'écoulement fiables dans les chenaux de débordement en rive gauche. Nous avons également constaté l'érosion du chemin d'accès.

- c) *Avez-vous les niveaux prévus avec l'ouvrage?*

L'ouvrage envisagé au PK 10.5 ne changerait pas l'élévation du lit actuel. Sa structure serait formée de 2 ou 3 rangées de blocs de roche taillés et disposés en alternance sur un lit armé. La structure a été simulée dans HEC-RAS 1D par des obstructions qui restreignent la section d'écoulement (figure 2). Les niveaux d'eau demeurent inchangés. Seule la fréquence des embâcles et la durée des événements dans ce secteur seraient augmentées.

2. *Je crois que vous aviez mentionné avoir le débit à Chute-Panet corrigé pour l'événement de décembre 2020, ainsi que sa récurrence.*

L'événement du 25 décembre 2020 a libéré les glaces de la rivière. Cependant, le taux de refoulement causé par le couvert de glace n'était pas ajusté en temps réel. Ainsi, selon notre hypothèse, la valeur maximale instantanée enregistrée à 969 m³/s était légèrement sous-estimée. En utilisant un effet de glace

1 de 5

à 5% (ce qui est tout à fait raisonnable), cela correspond à un débit de 1020 m³/s en eau libre. La récurrence associée à ce débit instantané est d'environ 55 ans. Notons que la Direction de l'expertise hydrique fera une réanalyse de cet événement à l'automne 2021.

3. *J'ai noté que l'ouvrage de retenue des glaces n'augmenterait pas les niveaux d'inondation, mais que la fréquence et la durée des inondations à la débâcle serait augmentée. Pouvez-vous me confirmer que c'est bien le cas et me résumer les impacts hydrauliques prévus à la résidence?*

Effectivement, seule la fréquence et la durée des événements seront augmentées. En présence d'embâcle dans le chenal principal, l'eau et la glace pourrait isoler et rendre inaccessible pour une période prolongée la résidence de la route. L'ouverture la plus basse de la résidence se trouve à une élévation de 150,86 m, soit environ 70 cm au-dessus du niveau de la crue centennale. Actuellement, l'érosion du talus riverain ne met pas la résidence à risque, cependant l'augmentation de la fréquence des événements d'embâcle va entraîner l'accélération des processus d'érosion. Notons que les vitesses moyennes présentées au tableau 1, ne représentent pas les vitesses maximales localisées.

4. *Le secteur du [REDACTED] n'est habituellement pas sujet aux embâcles? Subit-il des refoulements dus aux embâcles? Il y a un historique d'embâcle principalement au centre-ville et un peu aux alentours du km 9.5, mais il ne semble y avoir rien de plus près de la résidence. En présence de la structure de retenue des glaces, je comprends donc que le risque d'embâcle sera donc plus élevé près de la résidence.*

Ce secteur (km 6.1 à km 13.5) est déjà affecté par des embâcles sur une base annuelle. Les trains de glaces viennent s'échoir dans le barrage de frasil qui est présent entre le PK 2.0 et le PK 13.5. L'eau fait alors son chemin sur toute l'étendue de la large plaine inondable. Une structure de freinage des glaces, 1,2 km en aval de la résidence, viendrait aider les processus naturels déjà en place afin de retarder le transport des glaces au centre-ville de Saint-Raymond.

Prenons exemple de l'embâcle formé au km 10,4 en décembre 2019 (figure 3). Le refoulement de l'embâcle remontait environ au km 13.4, soit 1,7 kilomètres en amont de la résidence.

Si vous avez des questions, n'hésitez pas à nous contacter au 418-654-8173. Veuillez recevoir, Madame Emond, nos meilleures salutations.



Claude Beaulieu

Claude Beaulieu, ing.

Hydraulique fluviale

cbeaulieu@enord.ca

Thomas S. Robitaille

Thomas Simard-Robitaille, ing. jr, M. Sc.

Hydraulique fluviale

Dynamique des glaces

tsrobitaille@enord.ca



c.c. Jean-François Lavoie, ministère de la Sécurité publique
Josée Desgagné, ministère de la Sécurité publique
Pierre Gaudreau, ministère des Transports
François Dumont, directeur général de la Ville de Saint-Raymond

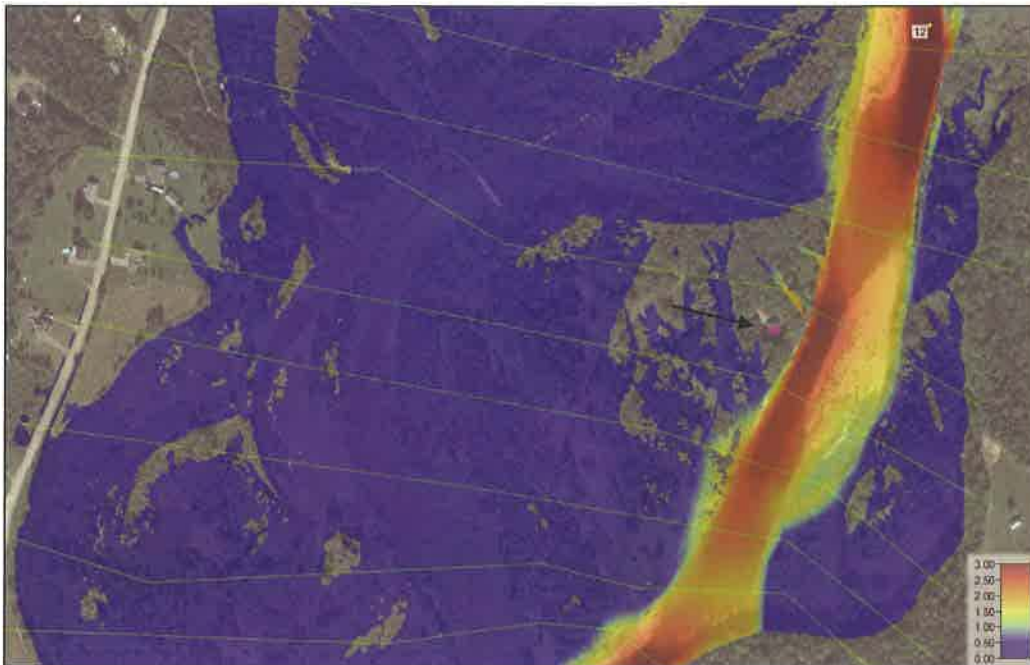


Figure 1. Section du modèle hydraulique (simulation des vitesses moyennes d'écoulement) aux alentours de la résidence du [redacted] carré rose, indiqué par une flèche) pour une période de retour de 10 ans en eau libre. Deux sections transversales du modèle unidimensionnel se trouvent à environ 40 m en amont et en aval de la résidence.

Tableau 1. Élévations et vitesses moyennes de l'eau dans le chenal principal à l'état actuel selon différentes périodes de retour près de la résidence du [redacted]

| Périodes de retour | Amont [redacted] | | Aval [redacted] | |
|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| | Élévation (m) | Vitesse moy. (m/s) | Élévation (m) | Vitesse moy. (m/s) |
| 2 ans | 149,6 | 2,04 | 149,4 | 2,07 |
| 5 ans | 149,8 | 2,30 | 149,6 | 2,29 |
| 10 ans | 149,9 | 2,52 | 149,7 | 2,25 |
| 20 ans | 150,0 | 2,63 | 149,8 | 2,31 |
| 50 ans | 150,1 | 2,74 | 149,9 | 2,38 |
| 100 ans | 150,2 | 2,81 | 150,0 | 2,43 |

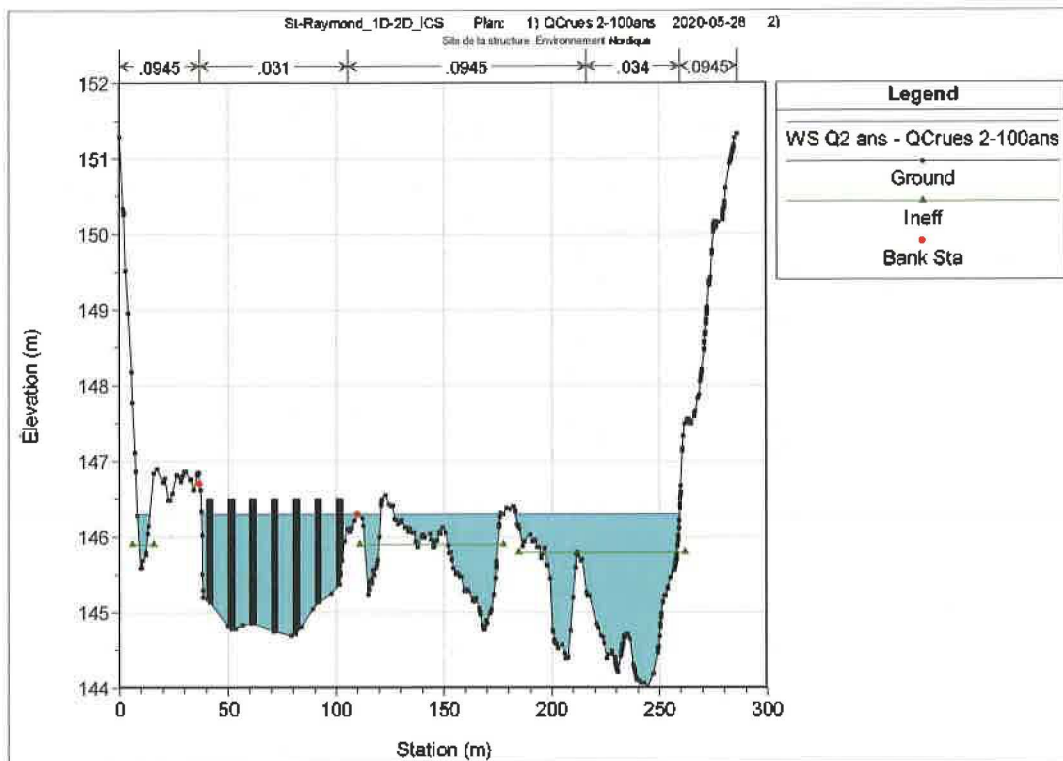


Figure 2. Section transversale de la structure de retenue des glaces au PK 10.5 selon un débit de récurrence de 2 ans en eau libre. Les élévations d'eau sont inchangées par rapport à la situation actuelle.

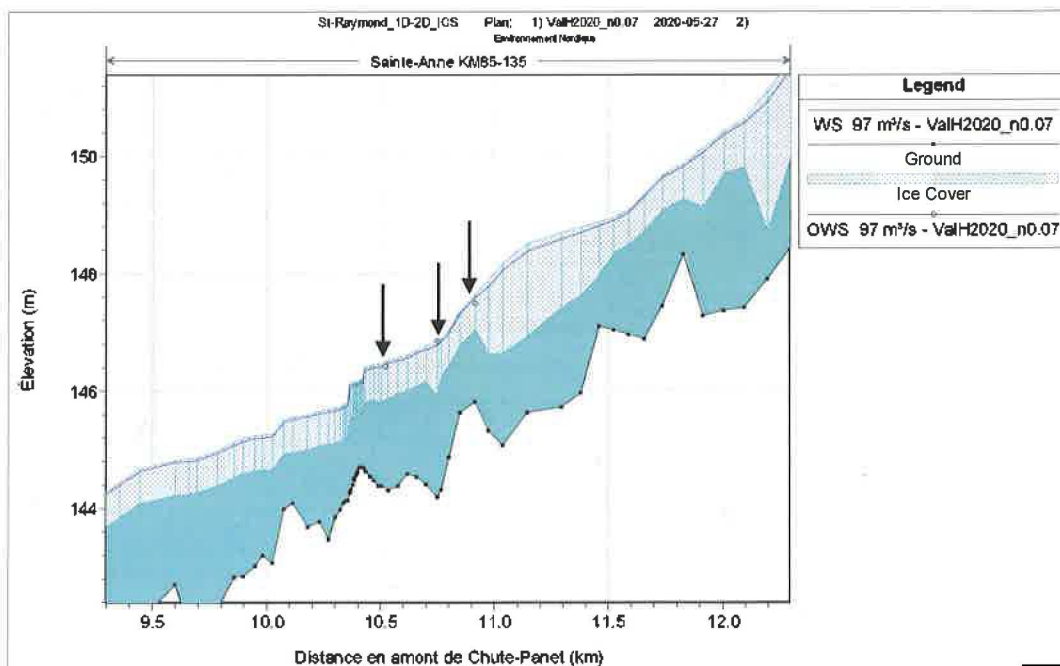


Figure 3. Simulation de l'embâcle du km 10,4 à l'hiver 2019-2020. Au niveau de la résidence du [redacted] (km 11,7), l'eau atteint une élévation de 149,7 m. Les points, montrés par des flèches, entre les km 10,5 et 11 indiquent les niveaux mesurés sur le terrain à la suite de cet événement.

ANNEXE D – LEVER, J. H., GOOCH, G., TUTHILL, A., CLARK, C.
1997. Low-Cost Ice Control Structure. Journal of
Cold Regions Engineering. 1997, 11 (3): 198-220.

LOW-COST ICE-CONTROL STRUCTURE

By J. H. Lever,¹ G. Gooch,² A. Tuthill,³ and C. Clark⁴

ABSTRACT: Communities located on small, northern rivers can experience severe breakup ice jams. While flood damages may be significant locally, they are often insufficient to justify the cost of conventional flood-control structures. Environmental concerns also tend to render these structures unattractive. A new, low-cost structure appears to be well suited to control breakup ice jams on small rivers. It consists of massive sloped blocks, partially buried in riprap, placed across the river adjacent to a natural floodplain. The blocks will arrest a breakup ice run and form a stable, partially grounded ice jam. Trees or boulders on the floodplain retain ice pieces in the river channel while allowing flow to bypass the structure. Large gaps between blocks allow easy fish and canoe passage. Refrigerated hydraulic model tests indicate that the structure should perform well even during severe breakup events. A prototype built in Hardwick, Vt., has performed well during the four mild breakup events experienced to date. Its cost of \$3,600/m of river width represents about an order-of-magnitude reduction compared with previous ice-control structures.

INTRODUCTION

Small, unregulated northern rivers can generate impressive breakup ice jams. During prolonged cold periods, steep sections produce frazil ice that accumulates into thick deposits in slower areas. Ice buildup can continue throughout winter, and 1-m-thick ice covers are not uncommon by early spring. Rapid snowmelt or heavy rains can subsequently initiate ice breakup, energetic ice runs, and formation of ice jams at river constrictions, sharp bends, or intact ice sheets on flatter reaches (Michel 1971; Ashton 1986; Beltaos 1995). Serious flooding can quickly follow.

Flood damages from breakup ice jams often exceed hundreds of thousands of dollars in towns consisting of a few thousand residents. Furthermore, a jam's sudden appearance and its uncertain consequences severely strain local flood-fighting resources. Consequently, the Corps of Engineers is frequently asked to assist small communities with ice-jam flood fighting and long-term prevention. Commonly, however, losses are insufficient to justify the cost of conventional flood-control structures, such as dams and levees, or existing ice-control structures (ICSs).

Few structures exist specifically to control breakup ice jams (Tuthill 1995). The Corps of Engineers constructed a low-head weir on Oil Creek to control ice-jam flooding in Oil City, Pa. The structure primarily acts to reduce frazil ice accumulation at the confluence with the Allegheny River. However, it also delays breakup on Oil Creek until ice on the Allegheny has moved out.

¹Mech. Engr., U.S. Army Cold Regions Res. and Engr. Lab., 72 Lyme Rd., Hanover, NH 03755.

²Civ. Engr. Technician, U.S. Army Cold Regions Res. and Engr. Lab., 72 Lyme Rd., Hanover, NH.

³Res. Hydr. Engr., U.S. Army Cold Regions Res. and Engr. Lab., 72 Lyme Rd., Hanover, NH.

⁴Electronics Technician, U.S. Army Cold Regions Res. and Engr. Lab., 72 Lyme Rd., Hanover, NH.

Note. Editor: John P. Dempsey. Discussion open until February 1, 1998. To extend the closing date one month, a written request must be filed with the ASCE Manager of Journals. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 27, 1996. This paper is part of the *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 11, No. 3, September, 1997. ©ASCE, ISSN 0887-381X/97/0003-0198-0220/\$4.00 + \$.25 per page. Paper No. 14295.

The structure cost \$24,000/m-width (1994 dollars), and Oil City has not experienced major flooding since its construction in 1988.

The Corps of Engineers designed a low-head weir with ice-retaining piers to control breakup on the 46-m-wide Cazenovia Creek in West Seneca, N.Y. (Gooch and Deck 1990). Similar in design to an ICS on the Ste. Anne River in St. Raymond, Quebec, Canada, it was estimated to cost about \$56,000/m-width of river (1994 dollars). The structure was not built because the community could not provide its portion of the project cost.

An ICS on the Credit River in Mississauga, Ontario, Canada, controls ice breakup without use of a weir. The structure consists of concrete piers spaced at 2-m intervals across a 27-m-wide channel adjacent to a natural floodplain (Belore et al. 1990). The piers arrest a breakup ice run to form an ice jam. Large boulders extend across the floodplain to restrain ice pieces as flow bypasses the structure. The structure cost \$23,000/m-width of river (1994 dollars), and no flood damages have occurred downstream since its construction in 1987.

Flood damages in a small community are often too small to justify an ICS costing \$20,000–\$30,000/m-width. Even when a project meets benefit/cost requirements, small communities can have difficulty raising their cost share. Additionally, weirs impede fish migration and may degrade fish habitat; weirs and closely spaced piers also prevent canoe passage. These environmental and recreational impacts can reduce community support for a structure or prevent attainment of the necessary construction permits.

Recognizing these problems, the writers sought to develop a low-cost structure to control breakup ice jams in small rivers (say, 20–60 m channel width). Our design goals were the following:

- Construction cost of \$3,000/m-width of river (roughly an order-of-magnitude reduction compared with "proven" structures)
- Safe and reliable ice-jam control
- Low environmental and recreational impacts
- Robust performance (i.e., insensitive to construction tolerances and variations in breakup conditions)
- Low maintenance requirements

The present paper describes the hydraulic model tests used to develop a candidate ICS and summarizes the field performance of the resulting prototype structure.

CONCEPT TESTS

Ice breakup on a small river can generate hydrodynamic forces comparable to the failure of a low-head dam. Therefore, modeling began with concept tests to find low-cost ways to control these forces. In the Cold Regions Research and Engineering Laboratory's (CRREL) refrigerated hydraulic laboratory, we built a 1:10-scale model of a 30-m-wide river of trapezoidal cross section with three constant-slope reaches. These tests used plastic and wooden blocks or unscaled, freshwater ice as model ice materials. Concepts tested included a wire mesh strung across the channel, closely spaced steel trusses, and widely spaced massive boulders. These concepts all displayed similar ice-control behavior: arrest of the leading edge of an ice run and formation of a thick, grounded jam adjacent to the structure. This grounded section performs the critical function of reducing structural loads during ice-jam formation.



FIG. 1. Schematic of Sloped-Block Ice-Control Structure

Other criteria influenced refinement of the ICS concept. The structure must be rugged enough to resist large inertial loads while it initiates a grounded jam. It must also possess a "safety valve" to prevent structural overload if the jam toe becomes free floating. A few sloped-face massive blocks spaced widely across the river meet these requirements. Ice ride up during jam initiation provides a download on the blocks to help hold them in place. Also, if the toe becomes free floating, ice pieces can slide over the blocks without causing structural failure. The blocks are simple to make of quarried stone or formed concrete, and the wide spaces between them allow for easy fish and canoe passage.

Proper site selection is also part of the concept. The structure requires a flow-bypass channel to limit stage rise, so that the jam toe remains grounded. An adjoining natural floodplain will meet this requirement at low cost. The floodplain, in turn, requires trees or small boulders to prevent floating ice from moving around the blocks. Fig. 1 shows the layout of this new ice-control concept.

DETAILED MODEL TESTS

Detailed tests determined whether the sloped-block ICS could reliably control ice breakup. These tests included variations in ICS configuration and ice-hydraulic conditions. Because the Lamoille River in Hardwick, Vt., offered a promising field site, we built a 1:10-scale model based on its principal hydraulic characteristics (Fig. 2). However, it was not an exact replica of the site in order to allow extension of the results to small, steep rivers, in general. Note that all dimensions presented here are equivalent full-scale ones unless otherwise noted.

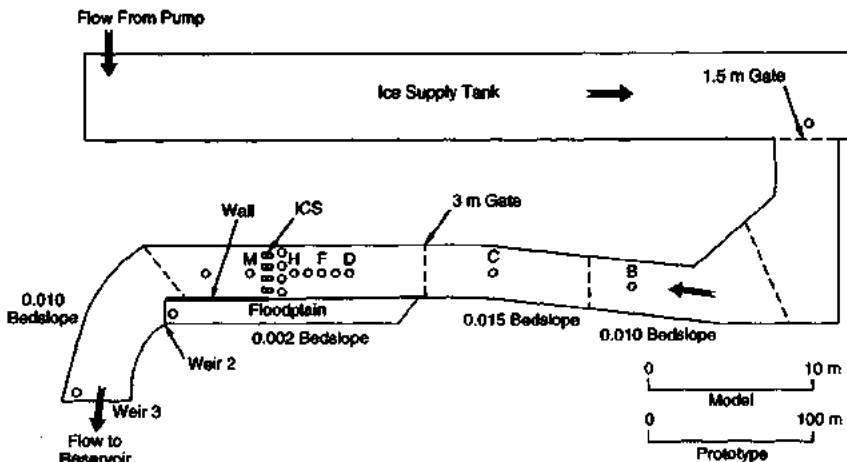


FIG. 2. Layout of Refrigerated Hydraulic Model Used for Detailed Tests (Circles Show Approximate Locations of Pressure Transducers)

Model Features

The model consisted of constant-slope reaches of trapezoidal cross section with one-on-two side slopes and top widths of about 30 m. The ICS was located in a channel section 1.5 m deep, adjacent to a 15-m-wide floodplain. The blocks were contained in a movable bed region 2 m deep \times 20 m long. The slope of the 140-m-long ICS reach was 0.002; the immediate upstream and downstream bed slopes were 0.015 and 0.010, respectively. Bed and bank surface materials consisted of crushed stone (10–15 cm diameter) to develop appropriate roughness. Inflow to the model was through a large, rectangular tank that also supplied additional ice.

Flowmeters on the pumps measured model inflow, and sharp-crested weirs measured floodplain flow and model outflow ($\pm 10\%$ uncertainties). A wall along the floodplain downstream from the ICS prevented flow from returning to the main channel. This allowed calculation of the flow through the ICS as the difference between model outflow and floodplain flow.

Sixteen pressure transducers measured water levels (± 3 cm prototype) in the model and at the two sharp-crested weirs. A data logger recorded the transducer readings at 1 Hz, and two video cameras documented the tests. A standard survey level was sufficiently accurate to measure ice-jam elevations (± 3 cm prototype), and we usually averaged two measurements at each cross section to account for jam roughness.

Froude scaling is adequate to scale between model and prototype because gravity and inertial forces predominate the unsteady ice-jam process of interest. Table 1 lists the scaling parameters relevant to our tests. Although the model did not replicate channel geometry, water-surface elevations compared well with prototype values at the single, open-water discharge checked (3.94 m³/s). Also, water depths at the ICS during ice runs were within a realistic range of 0.7–1.5 m (half- to bank-full conditions).

Ice Characteristics

An ice sheet should be present at the prototype ICS during initial breakup to interact with a run of broken ice. In the absence of such a sheet, the ICS must arrest the ice run by causing pieces to arch between blocks. This is a

TABLE 1. Scaling Expressions Based on Froude Scaling between Model (*m*) and Prototype (*p*)

| Parameter (1) | Scaling expression (2) | Equation number (3) |
|------------------|---------------------------|------------------------|
| Length | $L_p/L_m = 10$ | 1 |
| Velocity | $V_p/V_m = 10^{1/2}$ | 2 |
| Time | $T_p/T_m = 10^{1/2}$ | 3 |
| Flow rate | $Q_p/Q_m = 10^{5/2}$ | 4 |
| Mass | $M_p/M_m = 10^3$ | 5 |
| Force | $F_p/F_m = 10^3$ | 6 |
| Ice strength | $\sigma_p/\sigma_m = 10$ | 7 |

more demanding case and represents the field condition after release of a jam at the ICS and the subsequent arrival of a second ice run. We therefore tested with and without an ice sheet upstream of the structure.

Cooling the laboratory to about -10°C for 12–20 h allowed formation of ice covers on pools through the model and the ice-supply tank. Ice thickness near the ICS and at the exit of the ice-supply tank averaged 0.30–0.48 m, and the ice covers thinned toward their upstream ends. Prior to testing, we broke up the ice in the ice-supply tank and slowly fed it into the model. When testing with an ice sheet present, we measured its flexural strength; otherwise, we measured sizes of a sample of ice pieces.

The target range of prototype flexural strength was 300–900 kPa based on data available for columnar lake ice near 0°C (Frankenstein 1966; Gow et al. 1978; Prowse et al. 1990). Urea-doped water yielded the required reduced-strength model ice (equation 7, Table 1). Because river ice consists of frazil, columnar, and snow ice and probably shows considerable strength variation prior to breakup, we also conducted tests with higher and lower ice strengths than the target range.

Field measurements conducted by Wuebben and Stewart (1978) and the writers showed average piece sizes near the toes of breakup ice jams to be three to four times the average ice thickness. To achieve similar size ratios, we mechanically broke the ice cover prior to testing. The mean length/thickness ratio (excluding brash ice with lengths smaller than average thickness) varied between 2.5 and 4.1, and averaged 3.4 for all tests.

Test Conditions

We conducted 24 detailed tests over a six-month period, varying the ICS configuration, the ice conditions, and the jam-initiation process (Table 2). ICS configurations combined two block shapes, two block spacings, and two riprap-blanket elevations (Fig. 3). All blocks measured 1.4 m wide \times 3.0 m long (prototype), and were buried 0.9 m deep in a riprap blanket with an average rock size of about 0.4 m. Each “45° block” had 45° upstream and downstream sloped faces, protruded 1.5 m above the riprap, and weighed 14 t. Each “60° block” had a 60° upstream face, protruded 2.1 m above the riprap, and weighed 18 t. Groups of three blocks had gaps of 5.6 m, and groups of four blocks had gaps of 4.3 m. For the first 12 tests, the riprap blanket elevation established the tops of the 45° blocks at the same elevation as the floodplain (3 \times 45° and 4 \times 45° configurations). Later tests with the riprap blanket raised 0.3 m had 45° blocks protruding 0.3 m above the floodplain or 60° blocks protruding 0.9 m above floodplain (4 \times 45° R and 4 \times 60° R configurations, respectively).

TABLE 2. Summary of Test Conditions

| Date (1994) (1) | Blocks (2) | Ice conditions (3) | Jam initiation (4) | Consequence (5) |
|--------------------|---------------|--------------------------|-----------------------|---|
| January 19 | 3 × 45° | Pieces $G/L = 6.4$ | Base flow increase | Initial run passes through |
| January 20 | 3 × 45° | Pieces $G/L > 6$ | 1.5 m gate | Arrests run, releases at 15 m ³ /s |
| January 26 | 3 × 45° | Pieces $G/L = 4.6$ | 1.5 m gate | Arrests run, floodplain release |
| February 2 | 3 × 45° | Pieces $G/L = 5.4$ | Base flow increase | Arrests run, releases at 45 m ³ /s |
| February 4 | 3 × 45° | Pieces $G/L = 4.5$ | Base flow increase | Arrests run, releases at 36 m ³ /s |
| February 8 | 3 × 45° | Pieces $G/L = 4.0$ | Base flow increase | Arrests run, no release |
| February 15 | 3 × 45° | Pieces $G/L = 4.4$ | Base flow increase | Arrests run, no release |
| March 3 | 3 × 45° | Sheet $\sigma = 330$ kPa | 1.5 m gate | Arrests run, no release |
| March 9 | 3 × 45° | Sheet $\sigma = 460$ kPa | 1.5 m gate used twice | Arrests initial run, releases jam during second 1.5 m surge |
| March 16 | 4 × 45° | Sheet $\sigma = 260$ kPa | 1.5 m gate | Arrests run, no release |
| March 22 | 4 × 45° | Sheet $\sigma = 280$ kPa | 1.5 m gate | Arrests run, no release, but sheet slightly moves a block |
| March 24 | 4 × 45° | Sheet $\sigma = 1.4$ MPa | 1.5 m gate | Arrests run, mechanical release |
| March 29 | 4 × 45° R | Sheet $\sigma = 700$ kPa | 1.5 m gate | Arrests run, releases at 48 m ³ /s |
| April 13 | 4 × 60° R | Pieces $G/L = 5.6$ | 1.5 m gate | Arrests run, no release |
| April 19 | 4 × 60° R | Sheet $\sigma = 240$ kPa | 1.5 m gate | Arrests run, no release, but sheet moves a block 0.3–0.6 m |
| April 22 | 4 × 60° R | Sheet $\sigma = 680$ kPa | 1.5 m gate | Arrests run, no release |
| May 4 | 4 × 60° R | Sheet $\sigma = 1.9$ MPa | 1.5 m gate | Arrests run, no release |
| May 12 | 4 × 45° R | Sheet $\sigma = 1.2$ MPa | 1.5 m gate | Arrests run, no release, but sheet slightly rotates blocks |
| May 20 | 4 × 45° R | Pieces $G/L = 3.4$ | 3 m gate | Arrests run, no release |
| June 3 | 4 × 45° R | Sheet $\sigma = 820$ kPa | 3 m gate | Arrests run, rearches after brief release at 36 m ³ /s |
| June 10 | 4 × 45° R | Sheet $\sigma = 2.0$ MPa | 3 m gate | Arrests run, no release |
| June 16 | 4 × 45° R | Pieces | 3 m gate | Arrests run, no release |
| June 23 | 4 × 45° R | Broken sheet | 3 m gate | Arrests run, no release |
| June 29 | 4 × 45° R | Sheet $\sigma = 740$ kPa | 3 m gate | Arrests run, no release |

Note: R = raised riprap blanket; G/L = average gap/ice-length ratio; σ = average flexural strength of ice sheet; release-at number = base flow (prototype m³/s) at time of jam release.

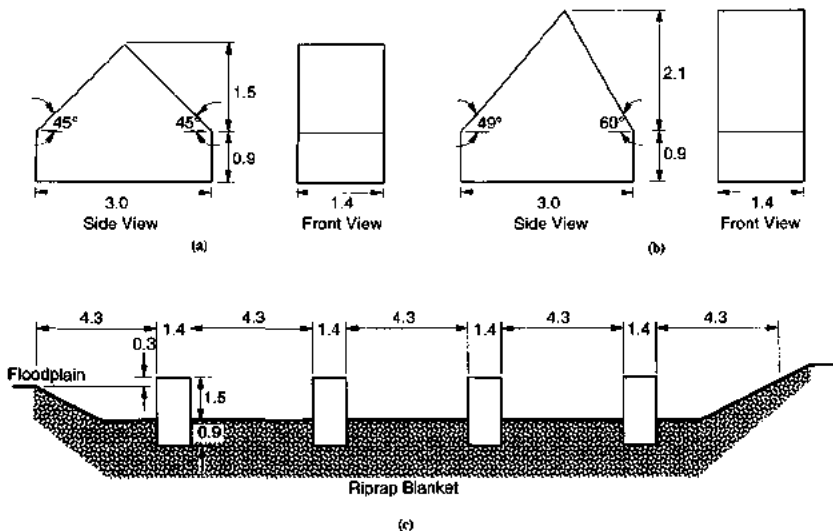


FIG. 3. ICS Blocks and $4 \times 45^\circ R$ Configuration (Dimensions Are Prototype Meters): (a) 45° Block (14 t); (b) 60° Block (18 t); (c) Cross Section of $4 \times 45^\circ R$ Configuration

In most early tests, ice runs resulted from small, stepwise increases in the base (pump) flow. Later, we initiated abrupt surges over moderate base flows (10–14 m^3/s prototype) by releasing a 1.5-m-high \times 15-m-wide (prototype) gate on the exit of the ice-supply tank. For the last six tests, a barrier upstream of the floodplain created the equivalent of a 3-m-deep ice jam, and its sudden release developed the most severe ice runs.

Normally, all tests continued until the base flow reached the pump capacity (about 48 m^3/s prototype) or until the ice jam released. This exposed the ICS to several ice shoves as the jam collapsed and thickened. In most cases, jams at the ICS did not release by increasing base flow. We often tried releasing jams mechanically by dislodging ice pieces or breaking the ice sheets at the blocks. In most cases, the ICS arrested the released ice and reformed a stable jam (exceptions are noted in Table 2).

Early tests revealed that jammed ice pieces could bypass the ICS once flooding occurred on the floodplain. We subsequently installed pipes (1.5-m spacing) along the floodplain bank to mimic the restraining function of trees or large boulders.

Summary of Test Results

The model sloped-block ICS arrested breakup ice runs and initiated stable, partially grounded ice jams. It arrested runs of broken pieces even in cases where average gap/ice-length ratios (G/L) exceeded 5. An ice sheet upstream of the ICS virtually ensured ice-run arrest (Fig. 4). The ICS worked best when ice conditions were most severe: thick ice (large L), high ice concentrations, and large amplitude surges. These conditions led to formation of very stable ice jams that were grounded for at least a river width upstream of the ICS. Thin, weak ice at low concentration more easily passed through the ICS or formed a less stable ice jam. However, these conditions pose little threat of ice-jam flooding downstream of the ICS.



FIG. 4. Ice Jam Formed by ICS during April 22, 1994 Test (Ice Run Interacting with Ice Sheet)

A grounded jam at the ICS brings an important structural benefit: it transfers to the riverbed most of the hydraulic force of the impounded water. Following ice-jam formation, removing blocks or dislodging the arched ice pieces did not release the ice jams. Natural release of an ice jam generally occurred only if the base flow increased sufficiently to float most of the grounded toe. The sloped faces allowed these jams to release without causing block movement.

The tests did reveal a few areas of concern. Minor scour of the riprap blanket occurred during some jam releases, suggesting the need for larger riprap. Also, a test involving 60° blocks (April 19) showed that an ice sheet could transfer sufficient load to rotate a block before the sheet slipped and failed. The greater ice-holding capability of 60° blocks appears to require an attendant increase in overturning resistance (and therefore cost) compared with 45° blocks. Also of concern, given uncertainty in field conditions, is the ability of the ICS to retain an ice jam upon arrival of a major surge from upstream. Protrusion of the blocks above the floodplain appeared to help under these conditions.

Results for Severe Ice Run

The test on May 20 illustrates the good performance of the sloped-block ICS under a severe ice run. Jam initiation was by release of a 3-m-thick ice jam behind the barrier (ice thickness $t = 0.30$ m, $L/t = 3.9$, and $G/L = 3.4$) and no ice sheet was present upstream of the ICS. The structure arrested the run and formed a stable jam with a grounded section almost 3 m thick and 45 m long (1.5 river widths). This section remained well grounded as base flow increased.

Figs. 5(a) and 5(b) present time-series records of water elevations and flow rates during ice-run arrest. The water wave outran the ice pieces so that the river was nearly bank-full (1.2 m above the riprap blanket) when the structure

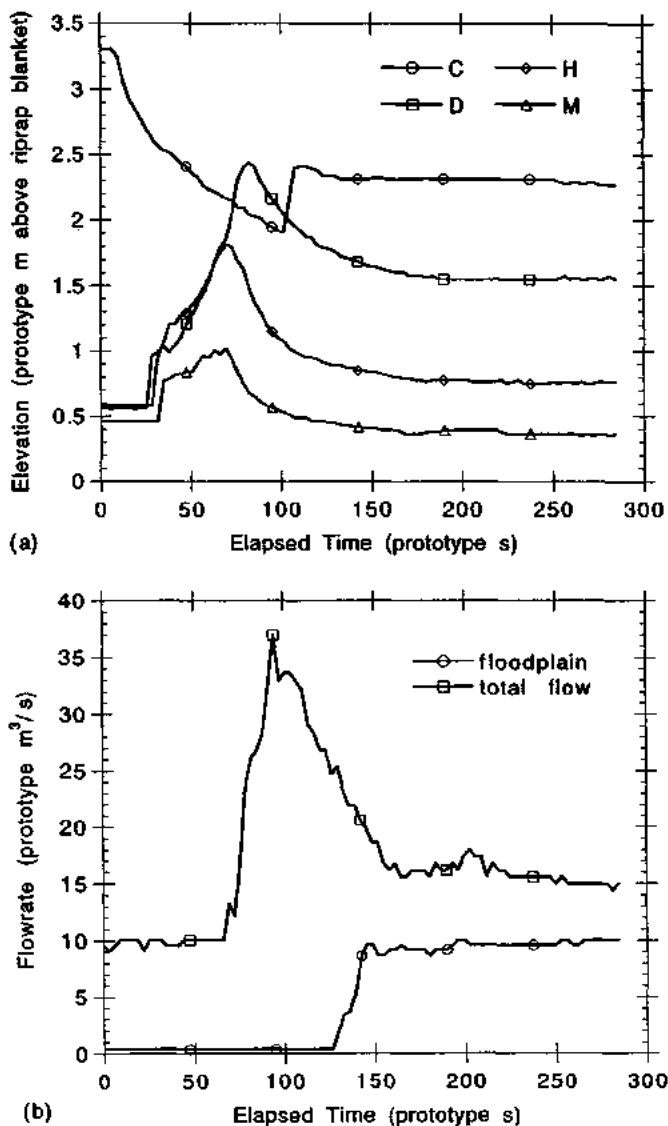


FIG. 5. (a) Water Elevations Measured during Ice-Run Arrest on May 20, 1994; Fig. 2 Shows Locations of Transducers B-M and Weirs 2-3; (b) Flow Rates Measured during Ice-Run Arrest on May 20, 1994

arrested the ice run. The resulting jam diverted water onto the floodplain, and water levels in the channel quickly receded to reflect the underlying base flow. Fig. 6 shows steady-state water-surface profiles before and after jam initiation. Also shown is the ice-jam elevation through the grounded section (elevations of the upstream floating section are slightly above the water levels shown).

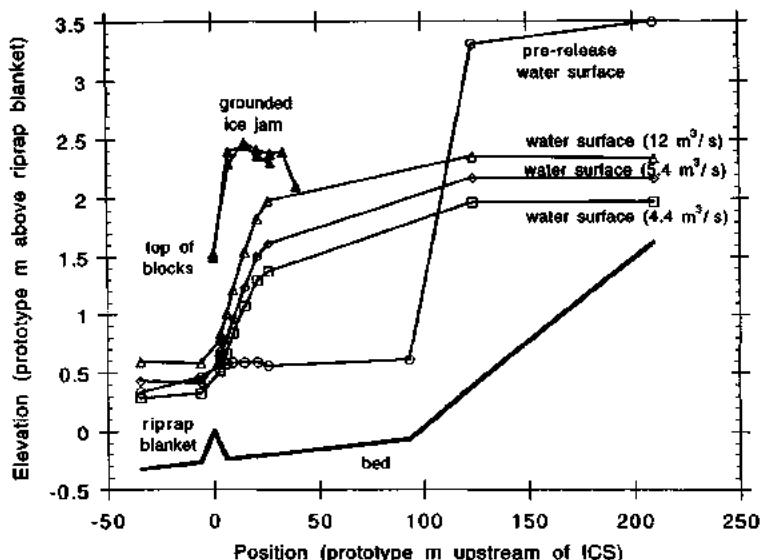


FIG. 6. Steady-State Water-Surface Profiles and Ice Elevations Before and After Jam Initiation on May 20, 1994 (Through-Jam Flow Rates are Prototype Values)

PROTOTYPE DESIGN CONDITIONS

Detailed tests showed the $4 \times 45^\circ R$ configuration to be a promising low-cost ICS: it can arrest severe breakup ice runs and hold the resulting ice jams. The decision to build a prototype in Hardwick required an estimate of the full-scale discharge that would cause jam release and its associated probability. Also required was an estimate of the maximum expected ice forces to establish a final block design.

Design Discharge

The simplified model floodplain was smaller than the prototype one; it therefore had a different stage-discharge relationship. To determine design discharge, we used average model water depth at ice-jam release and a numerical hydraulic model based on prototype topography.

Releases from high base flow occurred during tests on February 2, February 4, and March 29. Water depths upstream of the grounded sections averaged 2.3 m prior to jam release (0.8 m water depth on the floodplain near the ICS). We used HEC-2, a gradually varied flow model (U.S. Army 1990), to calculate a discharge rating curve for the treed floodplain based on surveyed topography and a Manning's roughness value of 0.1. This calculation included the conservative assumption of zero flow through the jam, although flow through the jam averaged 63% of total model flow prior to the three jam releases. The numerical model yielded an estimated floodplain discharge of $62 \text{ m}^3/\text{s}$ at 0.8 m depth. This value nearly equals the 0.02 annual probability (50-year) ice-jam discharge expected at the site (Federal 1987), and through-jam flow would raise it substantially. Also, discharge was less than $40 \text{ m}^3/\text{s}$ during each of the three worst ice-jam floods in Hardwick since 1960.

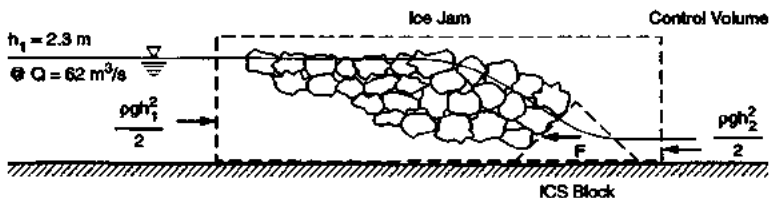


FIG. 7. Control Volume Analysis to Calculate Force Acting on ICE Block at Instant of Jam Release

Design Loads

Movement of the model 45° ICS blocks occurred only twice (see Table 2). In both cases, an ice sheet transferred to the blocks the forces developed during arrest of the initial ice run. However, the block movements were small and would not have constituted structural failure (i.e., large, permanent misalignment). Also, the ice sheets were completely free of the banks before testing. In the field, frozen or interlocking attachment to the banks should significantly reduce the force acting on the ICS during ice-run arrest. Block movement did not occur when ice pieces interacted directly with the ICS or for the severe cases of jam initiation by release of the 3-m gate (even with an ice sheet present). We therefore expected that the 45° ICS blocks as tested would survive ice-run arrest. These blocks each have an equivalent full-scale mass of 14 t and a submerged overturning resistance of $1.1 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$.

For the 45° blocks, the design load should result from release of an ice jam held to the design discharge, rather than during ice-run arrest. A stage rise of 2.3 m will occur behind an ice jam at the ICS for the design discharge of $62 \text{ m}^3/\text{s}$ (neglecting flow through the jam). When this jam releases, ice pieces should slip over the ICS blocks. However, the blocks might momentarily experience the entire hydrostatic force developed across the jam just prior to slippage (Fig. 7). Assuming that each block supports a width of 5.7 m, the resulting design horizontal force, F_d , is $1.5 \times 10^5 \text{ N}$. This value neglects ice friction along the channel boundaries and force reductions due to downstream water level and change in flow momentum. Assuming further that no ice is piled over the blocks to provide download, and that F_d acts 0.6 m below the top of the blocks, the design overturning moment, M_d , is $2.7 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$. We designed the full-scale ICS blocks to resist this moment. This is equivalent to applying a factor of safety of 2.5 to the overturning resistance of the 45° blocks that performed satisfactorily in the model.

SITE SELECTION FOR FIELD DEMONSTRATION

The Town of Hardwick (population 3,000) is located in north-central Vermont. From 1964 to 1994, ice jams on the Lamoille River have caused 10 floods in the town's main commercial and residential district, Hardwick Village, and have threatened flooding on 20 other occasions. The worst three floods (1964, 1976, and 1981) caused damages totaling \$2,700,000 (1994 dollars), and costs to dislodge or remove other ice jams have often exceeded \$10,000 per event. Nevertheless, analyses conducted by the Corps of Engineers (1976) and updates in 1980 and 1982 have shown that conventional flood-control options (ice-retaining weirs, levees and floodwalls, channel modifications, buyouts, and floodproofing) do not achieve benefit/cost ratios over unity and thus would not qualify for federal cost sharing.

A prototype demonstration project in Hardwick was attractive because the

community's need matched our research objective: a low-cost structure to control breakup ice jams on small rivers. In addition, the Vermont permitting process provides a test for environmental, recreational, and aesthetic acceptability. Hardwick is close to CRREL, it has been very active in ice-jam mitigation, and it has a good site that meets the requirements of the new structure. Finally, despite uncertainties associated with physical modeling, a slope-block ICS appeared capable of controlling ice breakup on the Lamoille River for quite severe breakup events.

Ice-Hydraulic Conditions

Reports by Calkins (1985) and the Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1987) provide detailed descriptions of the ice-hydraulic characteristics of the Lamoille River through Hardwick. Briefly, breakup ice jams form in Hardwick Village between Hardwick Lake and Cooper Brook (Fig. 8). Above Hardwick Lake, the Lamoille's drainage area is 277 km², and its mean annual discharge is about 6.3 m³/s (Calkins 1985). The average bed slope is 0.001 from Hardwick Lake to Cooper Brook. This increases to 0.009 through the 4.8-km-long reach upstream from Cooper Brook to a set of S-bends above Haynesville Brook. The main channel is about 20 m wide through Hardwick Village and is generally 25–30 m wide upstream. A low floodplain along the right bank of the river, downstream of Cottage St., has been set aside to store ice and bypass flow during ice jams. FEMA (1987) found ice-jam flood discharges upstream of Hardwick Lake to be 52, 80, 94, and 128 m³/s for events with annual probabilities of 0.1, 0.02, 0.01, and 0.002, respectively.

Steep reaches above Cooper Brook produce frazil ice during freezeup (usually in early December). The resulting ice floes collect along the flatter section entering Hardwick Lake and on small pools upstream. During prolonged cold periods, frazil deposits can develop into solid ice covers approaching 1 m thick. At breakup, the steep, 1-km-long reach above Cooper Brook often runs first to form an ice jam in Hardwick Village. If it looks threatening, the town

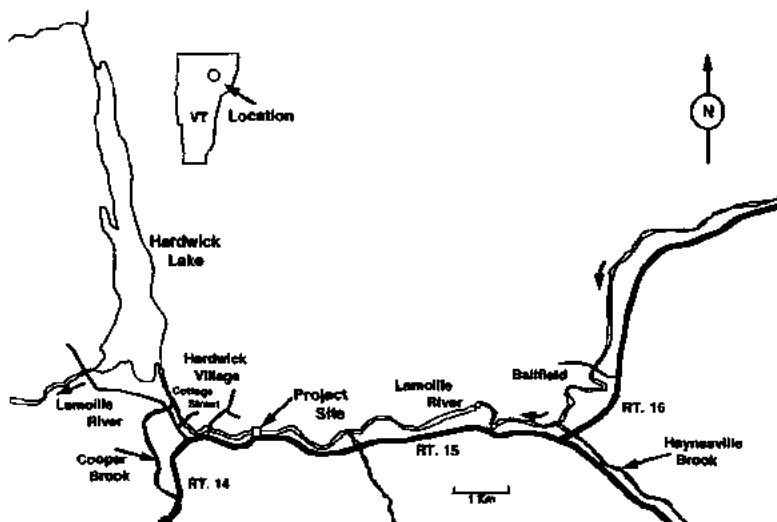


FIG. 8. Map of Lamoille River through Hardwick, Vt.

will mobilize equipment to try to release the jam or clear a bypass channel along the right-bank floodplain. Sudden arrival of the remaining 3.8 km of ice below Haynesville Brook usually leads to flooding in the village. A breakup ice jam will also usually form above Haynesville Brook, flooding a ballpark and sections of State Route 16. Fortunately, the village jam usually releases prior to release of this upstream jam.

Project Preparation

The Town of Hardwick, FEMA, and CRREL cooperated to implement the demonstration project. Hardwick purchased the land and arranged for a local quarry to donate all granite used for ICS blocks and riprap. FEMA provided funds matching these local contributions (via its Hazard Mitigation Grant Program). CRREL conducted all engineering analyses, prepared construction documents, and supervised construction.

The Corps of Engineers, FEMA, and the Vermont Agency of Natural Resources issue permits for construction in a river. These agencies seek input from groups with environmental, recreation, or regulatory interest in the project. This permitting process raised several issues.

The ICS is designed to form an ice jam during severe breakup events. To determine whether this jam would increase 100-year flood levels upstream, we used a gradually varied flow model, HEC-2 (U.S. Army 1990), coupled with an ice utility program based on equilibrium ice-jam theory, ICETHK, developed at CRREL (Tuthill et al. 1996). Results indicated that maximum water levels upstream of the structure would occur for a discharge of about 60 m³/s (above this value the jam collapses) and that these were below the flood elevations predicted by FEMA (1987) for the expected 100-year-open-water discharge (286 m³/s).

Canoeists were concerned that debris would block passage through the ICS between breakup and high spring flows, when debris removal would be difficult. We conducted model tests at bank-full flow and found that 50% of logs 7–9 m long would pass through the structure if they arrived individually (smaller logs would pass through more easily). Thus, unless the debris load was high, most gaps should be open for canoe passage after breakup. These results, together with Hardwick's agreement to remove debris promptly when possible, satisfied the canoeists' concern.

Vermont's water-quality permit requires strict sediment control for all construction work in a river to prevent fish loss. This dictated use of a sheet-pile cofferdam during construction. Fisheries' interests also raised concern about the impact of the ICS on fish habitat. A review of the literature revealed little data on the effects on fish of uncontrolled ice breakup, but suggested that the ICS could reduce adverse impacts and hence potentially improve overall fish habitat (Lever and Nislow 1995). Although this satisfied permit requirements, we initiated a field program to assess the structure's impact on fish habitat and populations (Lever and Nislow 1995). Hardwick secured all required permits by early August 1994.

CONSTRUCTION

The ICS is located about 1.4 km upstream of Cooper Brook. Fig. 9 shows the site plan, and Fig. 10 shows a transverse cross section through the structure. We selected the site because of its moderate channel slope (0.002), adjoining treed floodplain, proximity to Hardwick Village, and good access. The river also has good capacity for ice storage upstream of this site.

The town preferred granite for the ICS blocks, citing its durability, histor-

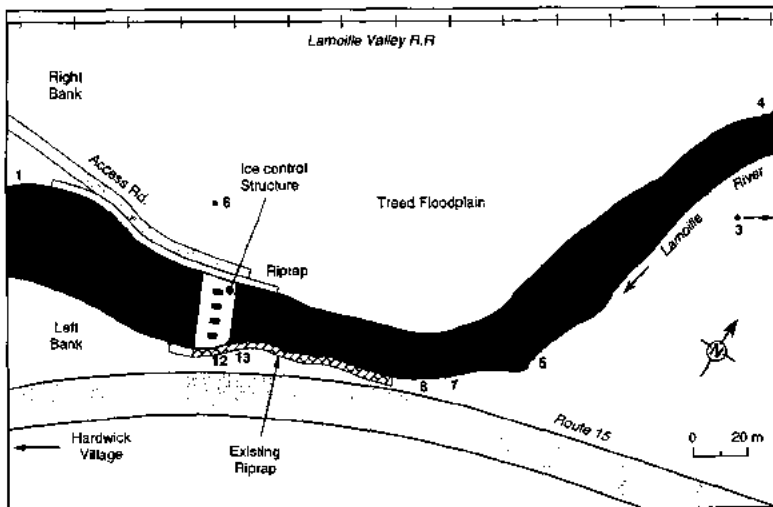


FIG. 9. Site Plan for ICS [Numbers Indicate Locations of Pressure Transducers Active in 1995–96 (Transducers 2, 6, 7, 9, 10, 11, 12, and 14 Active in 1994–95)]

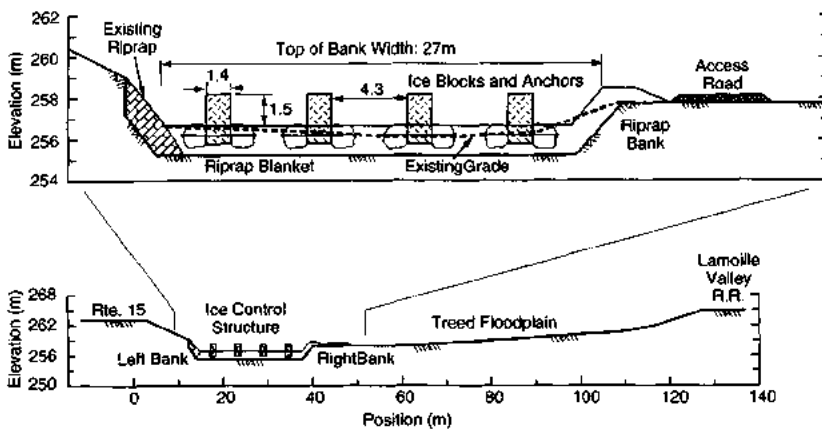


FIG. 10. Transverse Cross Section through ICS (Dimensions in Meters)

ical importance, and local availability. This imposed limits on the size, shape, and weight of the main blocks. Each ICS block consists of rough-quarried granite with 45° upstream and downstream faces and an average weight of 24 t (Figs. 11 and 12). Two 7-t anchor blocks, bolted to each ICS block after placement, increase the submerged overturning resistance to $3.7 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$. This represents a factor of safety of 3.4 compared with the equivalent model blocks, or a factor of safety of 1.4 compared with the design overturning resistance.

The four ICS blocks were buried 0.9 m deep in a 1.5-m-deep \times 12-m-long riprap blanket consisting of granite pieces with $D_{50} = 0.53 \text{ m}$. The finished grade of the riprap blanket was 0.3 m above the average bed elevation at the cross section (1.2 m below the adjacent floodplain elevation of 257.9

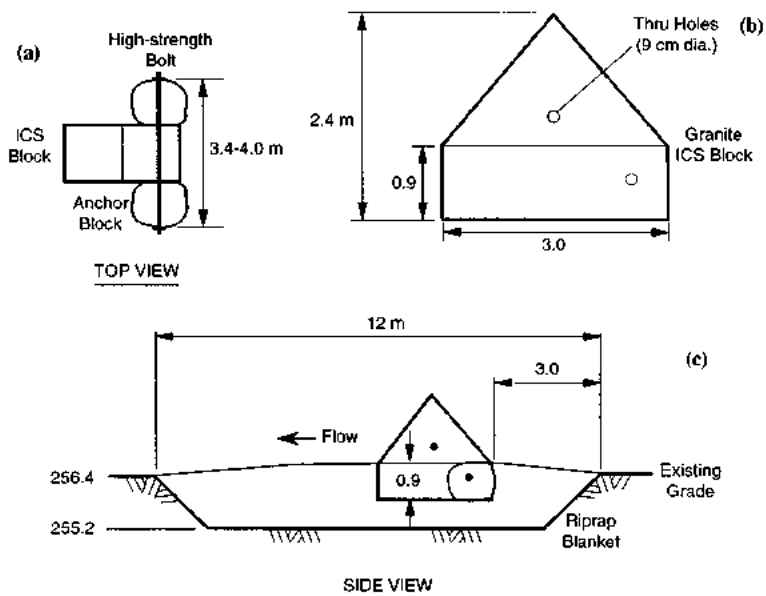


FIG. 11. ICS Block, Anchor, and Riprap Blanket Dimensions (in Meters): (a) Top View; (b) ICS Block; (c) Side View

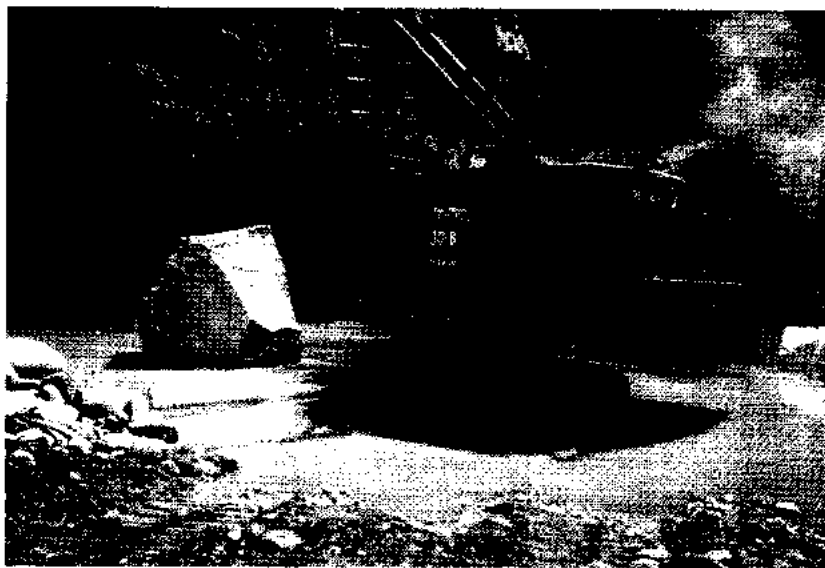


FIG. 12. Placement of Main ICS Block

m). The block tops averaged 0.3 m above the floodplain elevation. Anchor blocks were bolted below grade and were surrounded by riprap. This yielded clear gaps between blocks of about 4.3 m. For scour protection, the same riprap was installed on the right bank for distances of 20 m upstream and 75 m downstream of the ICS. The upstream riprap was placed 0.6 m above the

floodplain elevation to prevent floodplain flow from eroding ice pieces jammed at the ICS. The downstream riprap was graded to provide a relatively uniform spillway crest of 257.9 m. A short section of riprap was placed downstream of the ICS on the left bank to tie into existing riprap protecting Rt. 15.

Construction required four weeks, in September 1994, and followed the subsequent steps.

1. Preparation of access road
2. Placement of cofferdam to close off right 3/4 of channel
3. Excavation of riprap trench
4. Placement of filter fabric in trench; partial backfill with riprap
5. Placement of 4 cm crushed stone to level bases for ICS blocks
6. Sequential placement by crane of each of three ICS blocks and three pairs of anchor blocks; bolting of anchor blocks to ICS blocks
7. Backfill of riprap to finished grade
8. Partial removal of cofferdam, placement in left 1/4 of channel
9. Sequence repeated for left 1/4 of riprap blanket and fourth ICS block and anchors
10. Removal of cofferdam
11. Placement of bank riprap
12. Seeding of disturbed area of floodplain

Figs. 13(a) and 13(b) show the completed ICS. It develops a shallow upstream pool due to the raised riprap blanket. Table 3 shows a cost breakdown for the ICS as built. These costs do not include engineering, site surveys, or construction supervision, but they do include the market value of the donated granite (ICS blocks, anchors, and riprap). Note that the structural elements (ICS blocks and bolted anchors) could be made from reinforced concrete for similar cost.

INSTRUMENTATION AND MONITORING

We installed pressure transducers at the ICS site to compare model and prototype performance (Fig. 9). The transducers have 0–4 m ranges and measurement errors of less than ± 3 cm. Rising water at the onset of breakup triggers a datalogger to store about 40 min of pretrigger data and 30 h of posttrigger data recorded at 0.5 Hz. The datalogger also latches a relay to turn on floodlights, video recorders, and a telephone dialer to notify us of the event. During the winter, we monitor freezeup and breakup conditions along the study reach and conduct ice-thickness surveys. The nearest stream gauge, 32 km downstream from Hardwick at Johnson, Vt., allows estimates of discharge at the ICS using a correction area ratio (Dunne and Leopold 1978).

FIELD PERFORMANCE

The prototype ICS experienced two breakup events during each of the two years since its construction (Table 4). All four events were quite mild. The structure formed and held ice jams during three of these events (ice was too thin and weak during the March 1995 event to arch at the ICS). Release of the jams held at the structure caused relatively minor water-level rises downstream, and no flooding occurred in Hardwick Village during any of these events.

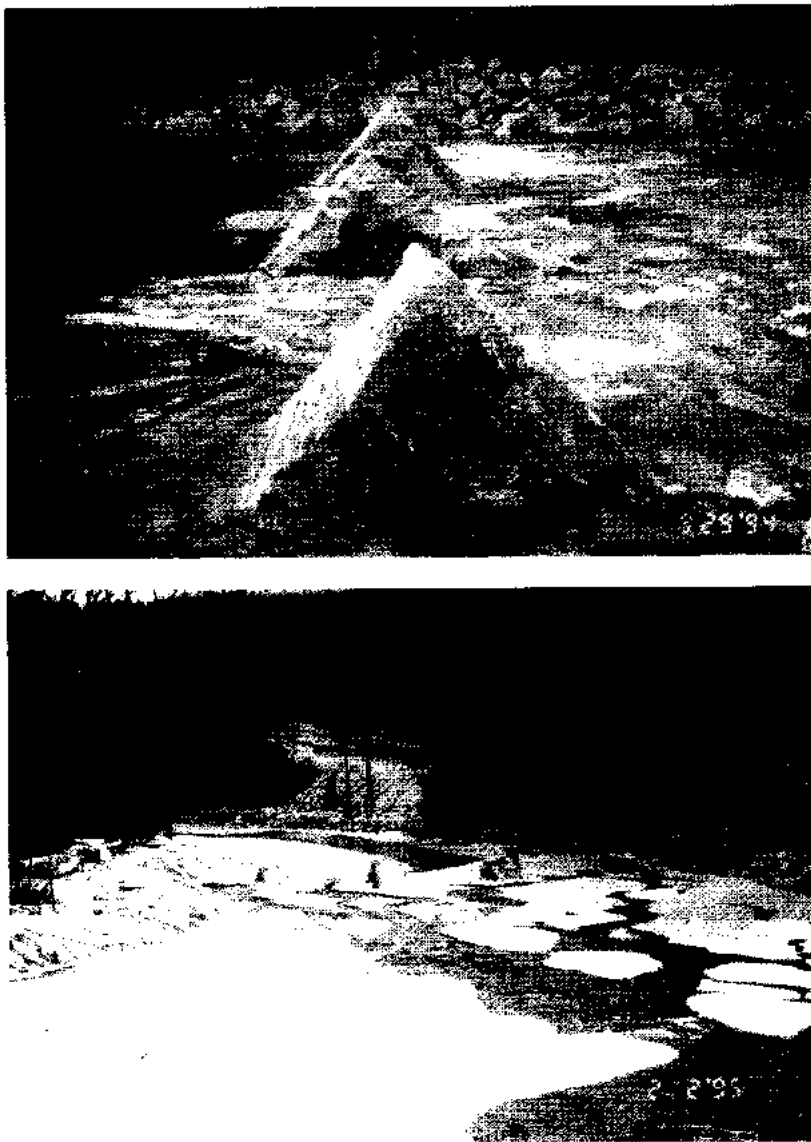


FIG. 13. (a) Completed ICS: (a) Looking Across; (b) Looking Upstream during Freezeup

January 1995 Breakup

Freezeup began in early December 1994. By January 13, 1995, the ice cover upstream of the ICS averaged 28 cm thick. Two days of temperatures over 10°C and a day of light drizzle caused rapid snowmelt and subsequent ice breakup on January 15, 1995. The structure formed an ice jam and held it for 7 h. During this time, a natural ice jam formed at the upstream ballfield and threatened flooding of a home and part of Rt. 16. No ice jam formed in

TABLE 3. Cost Breakdown for ICS (1994 Dollars)

| Item (1) | Subtotal (2) | Total (3) |
|---------------------------------|-----------------|--------------|
| Land | — | \$8,400 |
| ICS blocks | — | — |
| Granite at \$250/m ³ | \$8,200 | — |
| Placement | 4,000 | 12,200 |
| Anchors | — | — |
| Granite at \$180/m ³ | 4,000 | — |
| Placement | 5,400 | — |
| Bolts | 1,600 | 11,000 |
| Riprap | — | — |
| Granite at \$6.4/t | 13,200 | — |
| Placement | 24,600 | 37,800 |
| Filter fabric | — | 3,600 |
| Mobilization/demobilization | — | 12,000 |
| Cofferdam | — | 16,600 |
| Excavation | — | 4,700 |
| Miscellaneous materials | — | 1,400 |
| [Total] | — | \$108,000 |
| [Cost/m-width (excluding land)] | — | \$3,600 |

Hardwick Village (no shear walls). Water levels at the ICS rose to bank-full, but the small ice volume permitted all flow to pass through the jam. A later surge from upstream caused ice to release over the ICS. Released ice passed through the village without jamming and caused a minor water-level rise (about 0.6 m). Later release of the ballfield jam caused an ice run that slowed but did not stop at the ICS. A log blocked two of the five gaps through the ICS following this breakup sequence.

Fig. 14 shows water elevations recorded by the pressure transducers at key periods during this event. Data at 0.5 Hz show the arrival of a surge that initially formed the jam and the arrival of a second surge that triggered its release.

March 1995 Breakup

Below-freezing temperatures returned in late January 1995. By early March, ice covers upstream of the ICS and near Cottage St. were about 30 cm thick. However, 10 days of near-freezing temperatures and little rainfall caused significant deterioration of the ice and opened channels 30%–50% the river width along the study reach. A gradual breakup resulted on March 16. Ice shoved several feet above the ICS blocks (Fig. 15), yet the thin, weak ice pieces slowly passed through one gap without forming a stable jam. A small jam again formed at the ballfield, with no flooding. No ice jam formed in Hardwick Village, and ice moving through the structure passed harmlessly through town with only a minor water-level rise (about 1 m). The upstream ice jam also released harmlessly over the course of a couple of days.

This breakup scoured 1–2 m³ of riprap from between the two blocks where the ice run passed through. This was also the location of the sheet-pile cofferdam during construction, and we were unable to backfill along it properly. An improvement would be to excavate a narrow trench after removal of the cofferdam and backfill with riprap. Nevertheless, the small scour hole did not affect structural integrity, and the town filled it with riprap in July 1996.

TABLE 4. Summary of 1995 and 1996 Breakup Events

| Item (1) | January 15, 1995 (2) | March 16, 1995 (3) | January 19, 1996 (4) | February 21, 1996 (5) |
|--|--|---|---|--|
| Ice thickness (cm) upstream of ICS | — | — | — | — |
| Prebreakup sheet | 28 ± 2 | 30 ± 8 | Late freezeup | Late freezeup |
| Breakup pieces | 20 ± 5 | 15 ± 5 | 18 ± 8 | 15 ± 13 |
| Ice thickness (cm) in Hardwick Village | — | — | — | — |
| Prebreakup sheet | — | 30 ± 3 | — | — |
| Breakup pieces | 10 ± 5 | 10 ± 5 | 23 ± 3 | 20 ± 10 |
| Breakup weather | Temperature > 10°C, drizzle, snowmelt | 10 days of deterioration, temperature > 5°C, drizzle | Temperature > 10 °C, rapid snowmelt | Temperature ~ 5°C, rain |
| ICS behavior | Jam formed and held for 7.0 h | No jam, slowed run | Jam formed and held for 2.8 h | Jam formed and held for 2.8 h |
| Village water level (versus low flood- plain) | 0.6–1.0 m below | 0.3–0.6 m below | 0.3–0.6 m below | 0–0.3 m above |
| Estimated peak event discharge (m ³ /s) | 35 | 16 | 84 | 9.6 |
| Village flooding | None | None | None | None |
| Debris on ICS | One log, two gaps | None | None | None |
| [Comments] | — | Deteriorated ice at breakup, minor scour (later repaired) | \$2,500,000 ice jam damages in Vermont | Excavators used to clear a channel in village jam |

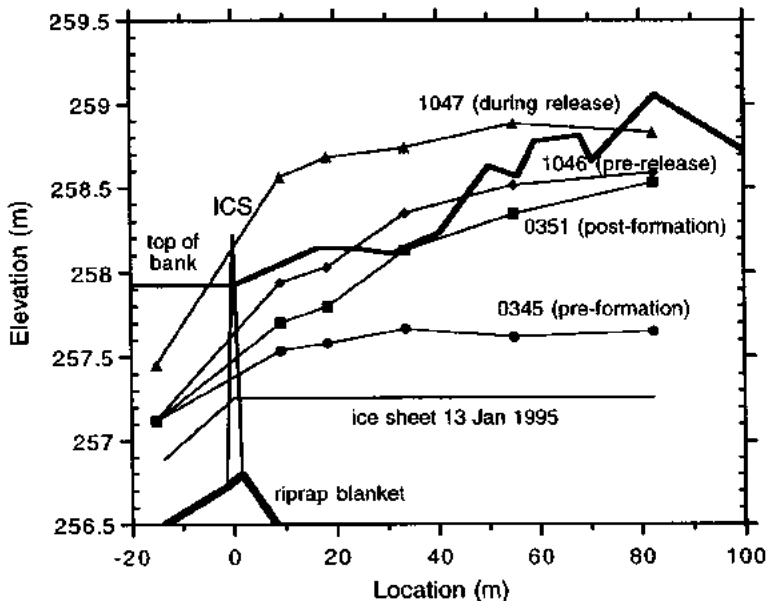


FIG. 14. Water Elevations during January 15, 1995 Breakup Event



FIG. 15. Ice Pieces Shoved above ICS Blocks during Breakup on March 16, 1995

January 1996 Breakup

Heavy autumn rains resulted in relatively high base flow during freezeup in December 1995. Thus, despite colder temperatures than the previous year, complete freezeup was later in January 1996, and we were unable to measure prebreakup ice thickness. Two days of temperatures above 10°C and strong



FIG. 16. Ice Jams Formed at ICS during Breakup on January 19, 1996

winds caused rapid snowmelt to initiate breakup on January 19, 1996. Short sections of the study reach appeared to break up independently. The structure formed an ice jam and held it for about 3 h (Fig. 16). All flow passed through this jam. A small ice jam again formed at the ballfield, with no flooding. Another small jam formed in Hardwick Village, but water levels remained below the low, right-bank floodplain. Ice eventually released at the structure through several gaps simultaneously. The released ice cleared out the village jam without raising water levels above the right bank. Ice pieces measured after breakup averaged about 20 cm thick. Estimated peak discharge during this event ($84 \text{ m}^3/\text{s}$) exceeded the expected 0.02 annual probability ice-jam discharge (FEMA 1987). Note that breakup during this period caused an estimated \$2,500,000 damages to public infrastructure elsewhere in Vermont (FEMA 1996).

February 1996 Breakup

Below-freezing temperatures returned in late January 1996. However, complete freezeup did not occur until mid February, and we again were unable to measure prebreakup ice thickness. Above-freezing temperatures and rain initiated breakup on February 21, 1996. The structure formed an ice jam and held it for about 3 h; all flow passed through this jam. An ice jam also formed through Hardwick Village, raising water levels to the level of the right-bank floodplain (about 1.5 m rise). Ice eventually released at the structure through several gaps simultaneously. However, the released ice did not push the jam downstream completely through Hardwick Village. Water levels during the next couple of days were just above the top of the right bank, causing minor floodplain flooding. Although no property appeared to be threatened, Hardwick mobilized two excavators to clear a channel along the jammed section as a contingency operation.

Ice pieces measured after breakup averaged 15 cm just upstream of the ICS and 20 cm along the village jam. The short freezing period apparently

caused proportionally thicker ice to form along the slow reach through Hardwick Village. The surge of water and the ice released at the ICS were unable to push the jam through this stronger cover. Because of the low ice volumes involved, it seems unlikely that flooding would have occurred in Hardwick Village in the absence of ice-clearing operations (or indeed in the absence of the ICS).

ANALYSIS AND CONCLUSIONS

We developed, through a series of physical model tests, a low-cost structure to control ice breakup on small rivers. It consists of a few massive, slope-faced blocks spaced widely across a river section adjacent to a natural floodplain. The blocks are partially buried in a riprap blanket to prevent scour and block sliding. The structure works by arresting a breakup ice run and forming a partially grounded ice jam that transfers subsequent hydraulic loads to the riverbed. The adjacent floodplain bypasses the flood flow, while trees retain ice pieces in the main channel.

This structure meets most of our original design goals (see introduction). Its construction cost was about \$3,600/m-width (exclusive of land and engineering costs), which compares favorably with the cost of conventional ICSs (\$20,000–\$30,000/m exclusive of land). The structure met all applicable federal and Vermont permit requirements for construction in a river. It does not impede fish or canoe passage, does not easily collect debris, and its maintenance requirements should be modest (e.g., minor riprap repair and debris removal).

The structure performed well during the four breakup events of its first two field seasons. These events all involved relatively thin ice for Hardwick, although the January 1996 event caused widespread flood damages elsewhere in Vermont. During three events, the structure arrested an ice run, formed an ice jam, and held it for several hours. This ice was unavailable for jamming in Hardwick Village, and the subsequent releases caused only minor water-level rises downstream. All events were similar to model tests conducted with thin, weak ice. Essentially, the structure will not form an ice jam, or will not hold it for long, under conditions too mild to pose a natural ice-jam threat.

Field tests have identified an additional design consideration: ice releases during mild events must be acceptable to communities downstream. Hardwick has conducted ice-clearing operations during major ice-jam floods, and did not mind conducting these operations as a contingency. However, in a community where ice releases would not be acceptable, the ICS should be designed with narrower gaps and steeper block faces. The influence on design loads of the increased ice-holding capacity should then be evaluated.

Assessment of whether the sloped-block-ICS meets the critical design goal of safe and reliable ice-jam control must await a more severe breakup season. Nevertheless, model and field results both suggest that ice-retention performance improves with increasing ice thickness and surge amplitude. These are also the conditions that increase the threat of serious ice-jams flooding in communities on small rivers.

ACKNOWLEDGMENTS

The writers gratefully acknowledge the invaluable assistance provided by Barry Cahoon of the Vermont Agency of Natural Resources, and Steve Colman and Mike Goetz of FEMA. We thank Charles Safford, Town Manager, the Selectboard, and the residents of Hardwick, Vermont, for their commitment to this project. Thanks are also extended to Bert Gherardi and Lawson

Granite Co. for their generosity. This work was funded under work unit #32755, "Low Cost Solutions to Ice Problems in Small Non-Navigable Streams," of the Ice Engineering Research Program.

APPENDIX. REFERENCES

- Ashton, G. D., ed. (1986). *River and lake ice engineering*. Water Resources Publications, Littleton, Colo.
- Belore, H. S., Burrell, B. C., and Beltaos, S. (1990). "Ice jam mitigation." *Can. J. Civ. Engrg.*, 17(5), 675-685.
- Beltaos, S., ed. (1995). *River ice jams*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colo.
- Calkins, D. J. (1985). "Ice jam prevention measures: Lamoille River at Hardwick, Vermont, U.S.A." *2nd Int. Conf. on Hydr. of Floods and Flood Control*, Paper C3, BHRA, Cranfield, Beaford, U.K., 149-168.
- Dunne, T., and Leopold, L. B. (1978). *Water in environmental planning*. W. H. Freeman and Co., New York, N.Y.
- Federal Emergency Management Agency. (1987). "Flood insurance study, Town and Village of Hardwick, Vermont, Caledonia County." FEMA community number 500027, Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency. (1996). "Mitigation strategy report." *Rep. FEMA-1101-DR-VT Prepared for the State of Vermont in Response to February 13, 1996 Disaster Declaration for the State of Vermont*, Region-Interagency Hazard Mitigation Team, Washington, D.C.
- Frankenstein, G. (1966). "Strength of ice sheets." *Proc., Conf. on Ice Pressures Against Struct.*, Nat. Res. Council, Canada, 79-87.
- Gooch, G. E., and Deck, D. S. (1990). "Model study of the Cazenovia Creek ice control structure." *Spec. Rep. 90-29*, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), Hanover, N.H.
- Gow, A. J., Ueda, H. T., and Ricard, J. A. (1978). "Flexural strength of ice on temperate lakes." *CRREL Rep. 78-9*, CRREL, Hanover, N.H.
- Lever, J. H., and Nislow, K. (1995). "River ice control and fish habitat restoration: mutual interests and benefits." M. R. Albert and S. Taylor, eds. *Proc., 52nd Eastern Snow Conf.*, 151-158.
- Michel, B. (1971). "Winter regime of rivers and lakes." *Cold Regions Sci. and Engrg. Monograph III-B1a*, CRREL, Hanover, N.H.
- Prowse, T. D., Demuth, M. N., and Chew, H. A. M. (1990). "Changes in the flexural strength of ice under radiation decay." *Nordic Hydro.*, 21(4-5), 341-354.
- Tuthill, A. M. (1995). "Structural ice control: review of existing methods." *Spec. Rep. 779*, CRREL, Hanover, N.H.
- Tuthill, A. M., Wuebben, J. L., Daly, S. F., and White, K. D. (1996). "Probability distributions for peak stage on rivers affected by ice jams." *J. Cold Reg. Engrg.*, ASCE, 10(1), 36-57.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1976). "Detailed project report for the Lamoille River at the Town of Hardwick, Vermont." New York District Corps of Engineers, New York, N.Y.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1990). "HEC-2 water surface profiles." Hydro. Engrg. Ctr., Davis, Calif.
- Wuebben, J. L., and Stewart, D. M. (1978). "Physical measurement of ice jams, 1976-77 field sensor." *Spec. Rep. 78-3*, CRREL, Hanover, N.H.

ANNEXE E – LEVER, J. H., GOOCH, G. 2007. Assessing the Performance of a Sloped-Block Ice-Control Structure. *Journal of Cold Regions Engineering*. ASCE. 200, 21(1):19-39.



Assessing the Performance of a Sloped-Block Ice-Control Structure

J. H. Lever¹ and G. Gooch²

Abstract: Hardwick, Vt., having experienced 10 ice-jam floods in 30 years, has not experienced one since construction of a sloped-block ice-control structure (ICS) in 1994. This innovative structure consists of four sloped granite blocks spaced across the Lamoille River upstream of the village and adjacent to a treed floodplain. It arrests ice runs, forms partially grounded jams, and retains these jams for hours to days. The measured ice-hydraulic characteristics of the breakup runs and resulting ice jams (e.g., wave celerities and amplitudes, porous-flow seepage coefficients) are similar to characteristics obtained from the 1:10-scale model tests used to develop the structure. Seepage coefficients, and hence jam porosities, generally increase with increasing discharge, and only two breakup events have caused floodplain flow. Water temperatures of 0.1–0.3 °C measured during a breakup event confirm that ice melting can account for the rate of porosity increase. Field and model data indicate that ice-jam holding time and jam-release discharge increase with increasing ice-piece thickness to a threshold of 6–7% of ICS gap width, beyond which no releases occur. Consistency between prototype and model ice-hydraulic characteristics and ice-holding capacity reinforce the conclusion that the sloped-block ICS can reliably retain ice jams during breakup events that pose the greatest flood threat: thick, strong ice, and large breakup waves. This ice-retention behavior can account for the observed reduction in ice-jam flooding in Hardwick during the past 11 seasons.

DOI: 10.1061/(ASCE)0887-381X(2007)21:1(19)

CE Database subject headings: Ice jams; Porous flow; Seepage; Hydraulics.

¹Mechanical Engineer, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), 72 Lyme Rd., Hanover, NH 03755 (corresponding author). E-mail: james.h.lever@erdc.usace.army.mil

²Civil Engineering Technician, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), 72 Lyme Rd., Hanover, NH 03755.

Note. Discussion open until August 1, 2007. Separate discussions must be submitted for individual papers. To extend the closing date by one month, a written request must be filed with the ASCE Managing Editor. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on January 11, 2006; approved on March 20, 2006. This paper is part of the *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 21, No. 1, March 1, 2007. ©ASCE, ISSN 0887-381X/2007/1-19-39/\$25.00.

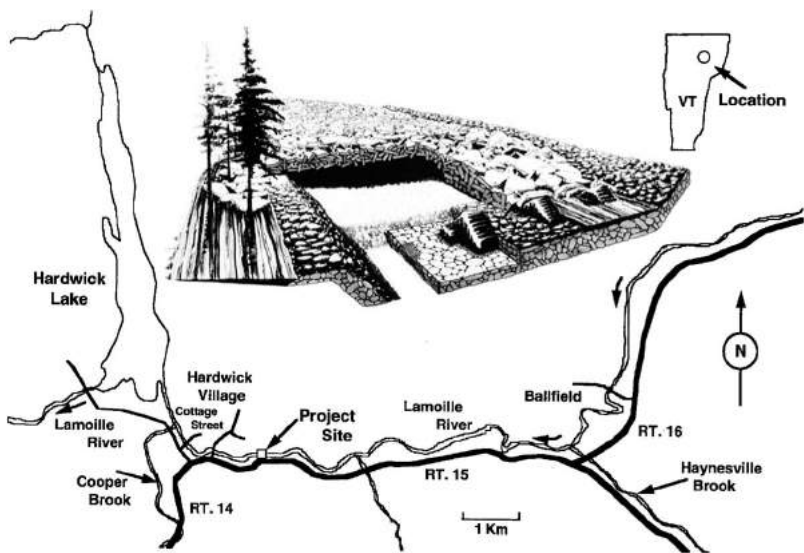


Fig. 1. Map of Lamoille River through Hardwick, Vt.; inset shows cut-away schematic of sloped-block ICS

Introduction

Controlling ice breakup on small rivers poses difficult problems. The rivers are usually steep (slope >0.001), and consequently, produce thick frazil ice deposits and large-amplitude breakup waves of water and ice. This combination can cause severe ice-jam flooding. However, the communities affected often cannot afford conventional flood-control structures such as dams and levees. Also, the desired goals of low-cost and low-environmental impact conflict with the need to arrest dynamic breakup waves and hold the resulting ice jams reliably.

We developed a low-cost structure to control breakup ice jams in small rivers (Lever et al. 1997). It consists of a few massive, sloped blocks spaced across the river adjacent to a natural floodplain. The blocks will arrest a breakup ice run and form a stable, partially grounded ice jam. Trees or boulders on the floodplain retain ice pieces in the channel while allowing flow to bypass the structure. Large gaps between blocks allow easy fish and canoe passage. We optimized this ice-control structure (ICS) using a 1:10-scale model in the U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory refrigerated hydraulic laboratory. Based on encouraging model results, the prototype was installed in the Lamoille River upstream of the village of Hardwick, Vt., in 1994 (Fig. 1). The previously flood-prone village has not experienced an ice-jam flood during the subsequent 11 seasons.

The field site is instrumented to record water levels and to collect video images during breakup. We also measure the thicknesses of ice pieces stranded near the ICS. These data are similar to those obtained in the model and allow us

to compare field and model ice-hydraulic characteristics. Here, we describe effects of the ICS on ice-jam flooding in Hardwick, compare ice-hydraulic characteristics of field and model breakup ice runs and the resulting jams, and compare performance measures of the prototype ICS with those of the model structure. Our goals are to understand and assess the ice-control performance of the ICS.

Ice-Control Structure

Lever et al. (1997) presented details of model testing and prototype construction of the sloped-block ICS. Model tests focused on whether this innovative structure could reliably form and retain ice jams during breakup events that pose the greatest flood risk: large ice thickness and volume and severe breakup waves. Note that here we use the term “wave” as suggested by Beltaos (2005) rather than “surge” to describe coupled water–ice waves that result from ice-cover breakup or release of ice jams.

The 1:10-scale model was not an exact replica of the Hardwick field site but approximated its major characteristics, such as river width, depth, and bed slope. Model ice strength and piece sizes were scaled to mimic expected field values, and severe ice runs were initiated by releasing ice and water stored behind a gate. Variations included the number, slope, and elevation of the blocks, and open-water or ice-covered conditions immediately upstream of the structure. The structure nearly always arrested the ice runs, with larger waves causing well-grounded jam toes and more stable jams that remained in place at the maximum available discharge (about 48 m³/s prototype). Floodplain flow occurred during essentially all tests. Of the five jam releases that did occur, four occurred for the three-block structure, and this directed installation of a four-block prototype ICS.

The Lamoille River through the prototype ICS site is 24–30 m wide and has an average bed slope of 0.009. Each of the four granite ICS blocks weighs about 38×10^3 kg, protrudes 1.5 m above a riprap blanket, and is about 1.4 m wide. The gaps between each block are 4.3 m wide. Construction cost was about \$3,600/m of river width (1994 U.S. dollars). Initial assessment indicates little adverse ecological impact of the ICS (Nislow and Lever 1998).

The sloped-block ICS has several characteristics that contribute to its low cost. First, as the ice run arrives from upstream, the blocks trigger formation of a grounded ice-jam toe. Friction between this grounded ice and the riverbed, rather than resistance by the structure, provides most of the force needed to retain the jam. Second, the adjacent treed floodplain acts as a water-only bypass channel without the cost of a prepared floodway. Third, if stage rise eventually floats the grounded toe, ice can slip over the sloped blocks without causing structural failure. The wave amplitude, rise time, and transported ice volume appear to govern the extent of the grounded toe formed by the structure. Through-jam and floodplain conveyance then determine the discharge at which the toe floats and slips over the blocks.

Hardwick Ice-Jam Flooding

Fig. 1 shows a map of the Lamoille River through Hardwick, Vt. The river drains 277 km² above Hardwick Lake. The steep reach (0.009 slope) above the village

produces frazil ice throughout the early winter. This frazil forms a thick ice cover along the flatter reach from Hardwick Lake to Cooper Brook. Before ICS construction, breakup ice jams formed most years in the vicinity of the Cottage Street Bridge as the breakup ice run encountered the frazil deposits.

Information about the formation and consequences of ice jams in Hardwick are available from Calkins (1985), FEMA (1987), and the *Hardwick Gazette* newspaper, whose offices abut the river. We summarized the available information and ranked the events in terms of severity.

Fairly complete records exist after 1964 when an ice jam destroyed the Cottage Street Bridge. Two other ice jams, a freezeup jam in 1976 and a breakup jam in 1981, resulted in more than 1 m of water in the subdivisions and businesses adjacent to the bridge. Extensive property damage, evacuations, road closures, and personal injuries resulted during these events, which we rank as Category 4.

Category 3 events produced minor flooding (0.3 m or less) but resulted in significant operational effort such as excavation or blasting of the jam. These occurred on seven occasions, the last on March 11, 1992, during a severe breakup event that caused extensive flood damages in nearby Montpelier, Vt. During that event, emergency excavation work in Hardwick released the jam while flooding was still minor.

Category 2 events produced threatening ice jams but no flooding in the village. However, they usually provoked an emergency response to mobilize excavation equipment and occupied attention of town officials for several days at a time. These consisted of both freezeup and breakup jams and occurred on 20 occasions from 1964 to 1990, with some multiple events during the same season.

Category 1 events produced minor ice jams that may or may not have provoked an emergency response. These occurred on 38 occasions since 1965, again with some multiple events during the same season. Four Category 1 events have occurred since construction of the ICS, including two events during which the ICS held ice without releasing it.

Category 0 events produced no ice jams owing to thermal breakup or ice runs that passed through the village without jamming. During the 30 years prior to ICS construction, only six Category 0 events occurred, including a thermal breakup at the end of the 1993–1994 season. Since then, 12 Category 0 events have occurred, including nine releases from the ICS that passed cleanly through the village and three thermal breakups.

Fig. 2 compiles the event categories by year, beginning in 1964. In an effort to reduce flooding, the pool in Hardwick Lake was lowered at the start of each winter beginning in 1984. This had the beneficial effect of moving the location of the frazil deposits about 1 km downstream. Fig. 2 suggests that this may have reduced event severities, although the 1992 event had the potential to be Category 4 if the emergency excavation effort had not been successful. No events more severe than Category 1 have occurred since ICS construction.

The ICS has experienced 16 breakup events during 11 seasons. Table 1 provides a summary of conditions and the ICS behavior during these events. In all cases, no flooding occurred in Hardwick. The ICS held ice throughout the event on three occasions and released ice held for several hours on six occasions. It did not form a jam during seven breakup events: three thermal breakups and four

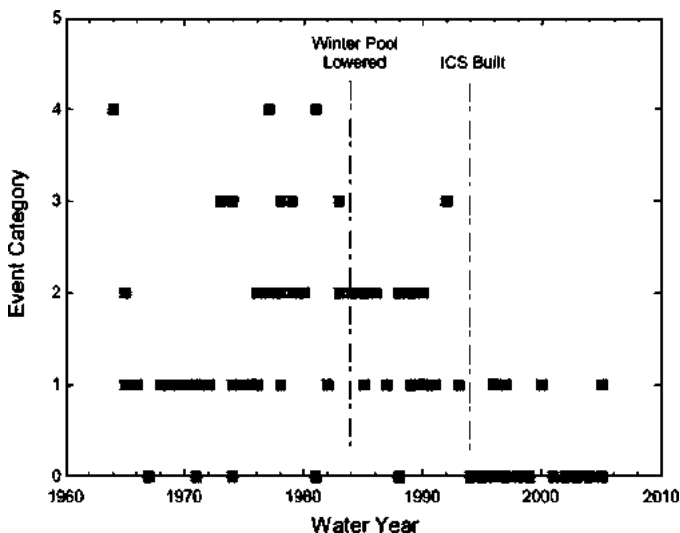


Fig. 2. Ice-jam event categories for Hardwick 1964–2005

cases of thin ice. In these latter cases, the ice runs passed harmlessly through the village.

Ice-Hydraulic Characteristics of Specific Events

The ICS site has been instrumented each winter since 1994 to measure water levels (± 0.03 m accuracy) and video breakup events (Fig. 3). Until 2004, a datalogger recorded these readings at 0.5 Hz after being triggered by rising water; since 2004, data were recorded at 15-min intervals throughout the winter. We used HEC-RAS (USACE 1998), a river-hydraulics analysis package, to develop discharge rating curves for the main channel and the floodplain. These analyses assumed open-water conditions, which always prevail on the floodplain and prevail downstream of the ICS after the initial ice run and upstream of the ICS if it releases a jam. Personnel from the U.S. Geological Survey conducted two discharge measurements downstream of the ICS (at 13.4 m³/s and 47.9 m³/s), which we used to calibrate the HEC-RAS model against surveyed water elevations. The rating curves for the main channel (Transducers 1 and 2) agree well for open-water events, and we estimate their uncertainties as $\pm 5\%$ over the discharges of interest (10 – 50 m³/s). Because no floodplain flow occurred during either discharge measurement, we estimate that the rating curve for Transducer 6 predicts floodplain flow within $\pm 30\%$.

Missed triggers; damage by fallen trees, animals, or ice runs; electrical noise; and budget constraints often reduced data quality. For example, we do not have local discharge measurements for all events. Nevertheless, sufficient data exist to

Table 1. Summary of Breakup Conditions and ICS Behavior

| Breakup date | AFDD (°C) | ICS ice thickness | | Breakup weather | ICS behavior | Released ice | Event category |
|-------------------|-----------|-------------------|------------|--|-------------------------|-------------------------------|----------------|
| | | Sheet (m) | Pieces (m) | | | | |
| January 15, 1995 | 194 | 0.28±0.02 | 0.20±0.05 | $T > 10^{\circ}\text{C}$, drizzle, snowmelt | Jam at ICS, 7.0 h | Ran through village | 0 |
| March 16, 1995 | 344 | 0.30±0.08 | 0.15±0.05 | $T > 4^{\circ}\text{C}$, drizzle | No jam, slowed run | Ran through village | 0 |
| January 19, 1996 | 444 | — | 0.18±0.08 | $T > 10^{\circ}\text{C}$, rapid snowmelt | Jam at ICS, 2.8 h | Ran through village | 0 |
| February 21, 1996 | 278 | — | 0.15±0.13 | $T \sim 4^{\circ}\text{C}$, rain | Jam at ICS, 2.8 h | Pushed village jam downstream | 1 |
| February 22, 1997 | 518 | 0.41±0.08 | 0.30±0.08 | $T > 4^{\circ}\text{C}$, gradual snowmelt | Jam in pool, no release | No release | 1 |
| March 29, 1997 | 144 | — | — | $T \sim 4^{\circ}\text{C}$, gradual snowmelt drizzle | Jam at ICS, 4.8 h | Ran through village | 0 |
| January 7, 1998 | 227 | — | 0.15±0.08 | $T < 4^{\circ}\text{C}$, rain, drizzle | Jam in pool, 1.5 h | Ran through village | 0 |
| February 12, 1998 | 204 | 0.30±0.15 | 0.18±0.05 | $T < 4^{\circ}\text{C}$, gradual snowmelt rain | Jam in pool, no release | No release | 0 |
| January 24, 1999 | 250 | — | 0.20±0.08 | $T \sim 4^{\circ}\text{C}$, rain | No jam, slowed run | Ran through village | 0 |
| February 28, 2000 | 453 | 0.33±0.05 | 0.38±0.13 | $T \sim 4^{\circ}\text{C}$, rain | Jam at ICS, no release | No release | 1 |
| March–April 2001 | 840 | 0.36±0.03 | — | $T \sim 0^{\circ}\text{C}$, dry | No jam, thermal breakup | Thermal breakup | 0 |
| March 10, 2002 | 320 | — | 0.08±0.03 | $T \sim 10^{\circ}\text{C}$, rain | No jam, slowed run | Ran through village | 0 |
| March 21, 2003 | 914 | — | 0.15±0.05 | $T \sim 0^{\circ}\text{C}$, dry | No jam, thermal breakup | Thermal breakup | 0 |
| March–April 2004 | 836 | — | — | $T \sim 0^{\circ}\text{C}$, dry | No jam, thermal breakup | Thermal breakup | 0 |
| January 14, 2005 | 200 | — | 0.15±0.05 | $T \sim 4^{\circ}\text{C}$, rain | No jam, slowed run | Ran through village | 0 |
| April 2, 2005 | 487 | — | 0.28±0.08 | $T \sim 5^{\circ}\text{C}$, snowmelt | Jam at ICS, 17 h | Ran through village | 1 |

Note: Detailed observations date from ICS construction in 1994.

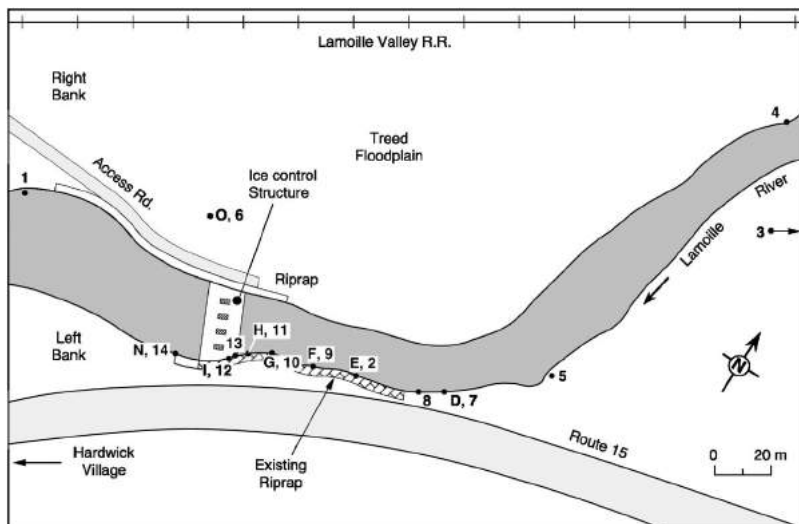


Fig. 3. ICS site plan showing locations of pressure transducers (letters: active in 1994–1995; numbers active 1995–2004)

determine ice-hydraulic characteristics for major breakup waves and the resulting ice jams at the ICS. We focus here on two breakup events for which we have fairly complete data records, January 19, 1996 and February 28, 2000, and also the April 2, 2005 event, for which we have less data but measured the highest discharge to date.

Breakup on January 19, 1996 caused ice-jam flooding throughout the northeast United States, including Vermont. A breakup ice run on the Lamoille jammed at the ICS at about 5:30 a.m. A smaller run at 6:30 a.m. thickened the jam, and a run arriving at 8:15 a.m. caused it to release through the gaps. During this period, all flow passed through the jam. The released ice cleared out a small jam in Hardwick village, yet water levels remained well below flood stage throughout the event. Ice pieces stranded near the ICS measured 0.18 ± 0.08 m thick.

Above-freezing air temperatures and rain initiated region-wide ice breakup on February 28, 2000. The ICS arrested the ice run and formed a jam at 10:30 a.m. [Fig. 4(a)]. Concurrently, ice below the ICS jammed about 60 m downstream of the Cottage Street Bridge in Hardwick village. Ice pieces at the ICS averaged 0.38 ± 0.05 m thick, and several pieces spilled over and grounded downstream of the structure. Floodplain flow began at 11:15 a.m. and continued for several hours. Although water levels remained 1–1.5 m below flood stage in Hardwick, by midafternoon two excavators were working to remove ice from the toe of the village jam. Clearing skies and colder temperatures limited peak discharge to 26 ± 1 m³/s. The ICS held its jam throughout the event, and water flow eroded a channel through the jam over the next several days.

Breakup on April 2, 2005 occurred at noon following five days of warm

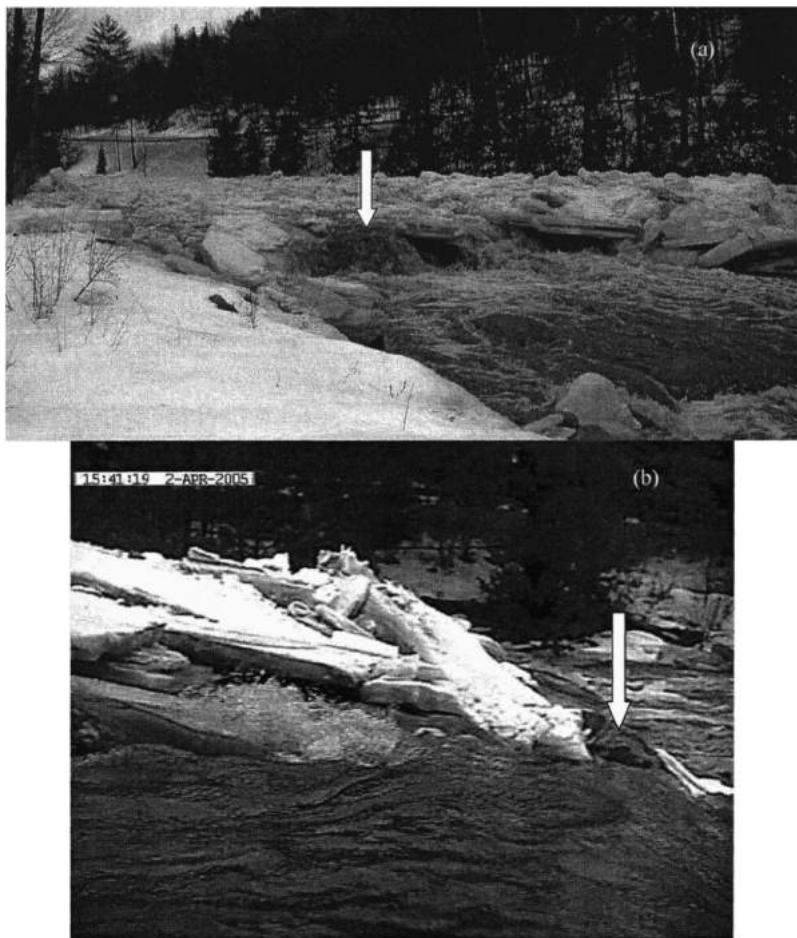


Fig. 4. Ice jams at the ICS: (a) looking upstream on February 28, 2000 of jam held throughout event; (b) looking across flooded floodplain on April 2, 2005 to ice piled ~ 1 m above ICS blocks. Arrows points to top of nearest ICS block in both photographs.

weather and two days of rain. Floodplain flow began almost immediately [Fig. 4(b)] and continued until the jam released at 5 a.m. the next morning. Discharge immediately after jam release and pool drain down was 42 ± 2 m³/s, peak floodplain flow was 10 ± 3 m³/s, and ice pieces at the ICS averaged 0.28 ± 0.08 m thick. The released ice passed uneventfully through Hardwick village.

Fig. 5 shows the arrival from upstream of the wave that initiated the jam at the ICS on February 28, 2000. Release of about 1 km of ice cover caused this wave. Upstream of the ICS pool, wave celerity was about 4.4 m/s and its amplitude was

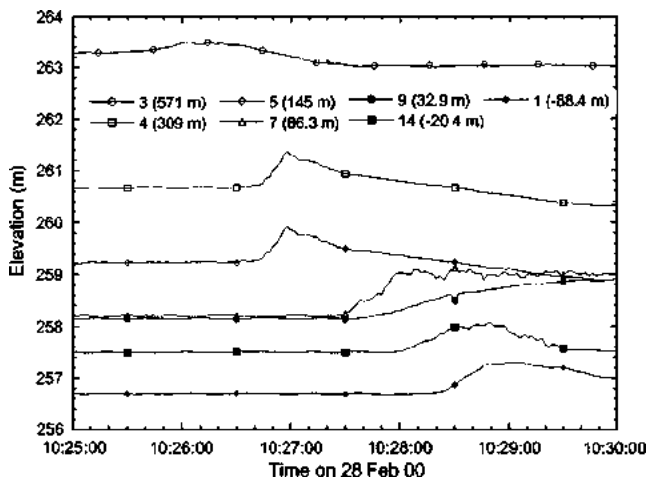


Fig. 5. Time series of water elevations measured during jam initiation at ICS on February 28, 2000. Values in brackets are distances from the transducer to the ICS (positive upstream).

0.80 m with a rise time of 30 s (average rise of 1.6 m/min). This wave had higher celerity and a faster rate of rise than ice-jam release waves reported by Beltaos (2005) for larger Canadian rivers with lower bed slopes. While ice was jamming at the ICS, the water wave passed through and cleared out the downstream ice cover. Extrapolating from quasi-steady conditions after jam formation, the breakup base flow was $17 \pm 1 \text{ m}^3/\text{s}$. It took about 45 min after jam initiation for the discharge measured at Transducer 1 to stabilize; during this time flow went into storage or onto the floodplain. By comparison, breakup during the January 19, 1996 event began at $10 \pm 1 \text{ m}^3/\text{s}$ and produced a smaller wave, no floodplain flow, and jam release at $16 \pm 1 \text{ m}^3/\text{s}$. Fig. 6(a) shows water-surface profiles under quasi-steady conditions just prior to and after breakup on February 28, 2000. Data from these and similar profiles allow calculation of hydraulic properties of the through-jam flow. Table 2 summarizes ice-hydraulic parameters measured for these two breakup events. Although we did not track ice-jam length during these events, photographs and video records indicate that these jams extended about 100–150 m upstream of the ICS.

Lever et al. (1997) measured comparable ice-hydraulic data during simulated breakup events in the 1:10-scale model used to develop the ICS. Table 2 includes results for two tests that approximate conditions observed during the February 28, 2000 field event. Note that all model data reported here are equivalent prototype values, converted using Froude scaling (Lever et al. 1997). Conditions during both model tests were more severe than the January 19, 1996 field event in terms of ice thickness, wave celerity, and amplitude. Jam lengths ranged from 100 to 200 m. The model ICS held the ice jams either to the maximum test flow (March 22, 1994 test) or released it at very high flow (March 29, 1994 test). Fig.

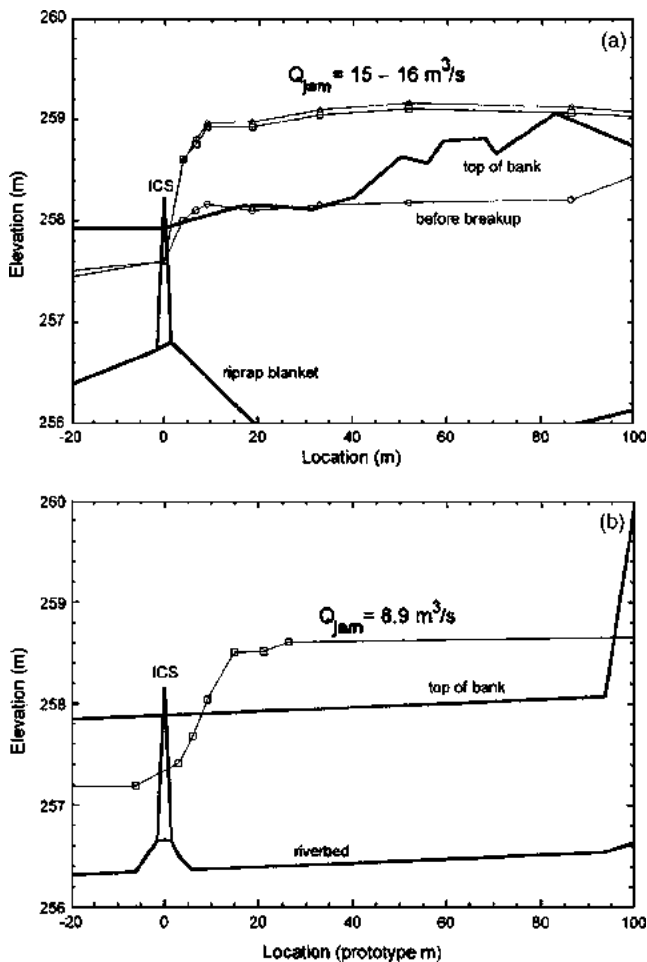


Fig. 6. Quasi-steady (1-min average) water-surface profiles measured (a) during the February 28, 2000 field event; (b) during the March 29, 1994 model test (in prototype units).

6(b) shows a water-surface profile from the March 29, 1994 test that is quite similar to ones obtained from the February 28, 2000 field event.

Through-Jam Flow

Water flows through the grounded toe of an ice jam in the voids between ice pieces. The Reynolds number of this flow is sufficiently high that a nonlinear relation exists between hydraulic gradient and specific discharge (Bear 1972)

Table 2. Comparison of Field and Model Parameters

| Parameter | Field events | | Model tests | |
|---|------------------|-------------------|----------------|----------------|
| | January 19, 1996 | February 28, 2000 | March 22, 1994 | March 29, 1994 |
| Ice sheet upstream ICS | Yes | Yes | Yes | Yes |
| Ice thickness (m) | 0.18±0.08 | 0.38±0.13 | 0.49±0.19 | 0.28±0.01 |
| Ice strength (kPa) | — | — | 300±200 | 700±70 |
| Jam initiation flow (m ³ /s) | 10±1 | 17±1 | 10±1 | 10±1 |
| Wave celerity (m/s) | 2.8±0.4 | 4.4±0.4 | 4.3±0.5 | 3.9±0.4 |
| Wave amplitude (m) | 0.31±0.03 | 0.80±0.08 | 0.60±0.06 | 0.70±0.07 |
| Rise time (s) | 40±4 | 30±2 | 20±2 | 35±4 |
| Average seepage coefficient λ (m/s) | 1.4±0.1 | 1.2±0.1 | 0.9±0.1 | 0.6±0.1 |
| Q for seepage calculation (m ³ /s) | 10–17 | 13–20 | 7.8–8.4 | 8.9 |
| Average jam porosity | 0.67±0.05 | 0.53±0.03 | 0.41±0.03 | 0.40±0.03 |
| Peak flow event (m ³ /s) | 48±5 | 26±1 | 30±3 | 48±5 |
| Maximum floodplain flow (m ³ /s) | 0 | 2.0±0.6 | 12±1 | 26±3 |
| Release | Yes | No | No | Yes |
| Release flow (m ³ /s) | 16±1 | — | — | 48±5 |

Note: Model values are in prototype units. Wave celerity is average value for peak stage.

$$J = aq + bq^2 \quad (1)$$

where J =hydraulic gradient; q =specific discharge ($=Q/A$ =discharge per unit cross-sectional area); and a and b =coefficients determined by the properties of the fluid and of the porous medium. Wong et al. (1985) and Beltaos (1993, 1999) argued that the first term in Eq. (1) is negligible for piece sizes and porosities characteristic of breakup ice jams. In our case, it is two orders of magnitude smaller than the second term for typical model jams and decreases in importance for prototype jams. Retaining only the nonlinear term and following Beltaos (1993), Eq. (1) integrates to yield an expression for the energy loss across the grounded toe of a jam

$$h(x) - h_0 = \left(\frac{Q}{\lambda B}\right)^2 \int_0^x \frac{dx}{[h(x) - z(x)]^2} = \left(\frac{Q}{\lambda B}\right)^2 F(x) \quad (2)$$

where $h(x)$ =water surface elevation; $z(x)$ =channel bed elevation; and B =channel width (assumed constant). The seepage coefficient $\lambda = 1/\sqrt{b}$ has units of velocity. A plot of $h(x)$ versus $F(x)$ yields a straight line with slope $(Q/\lambda B)^2$ in the region where Eq. (2) applies.

Quasi-steady water-surface profiles (e.g., Fig. 6) permit calculation of λ for flow through the grounded toes of ICS jams. Fig. 7 shows the values obtained for

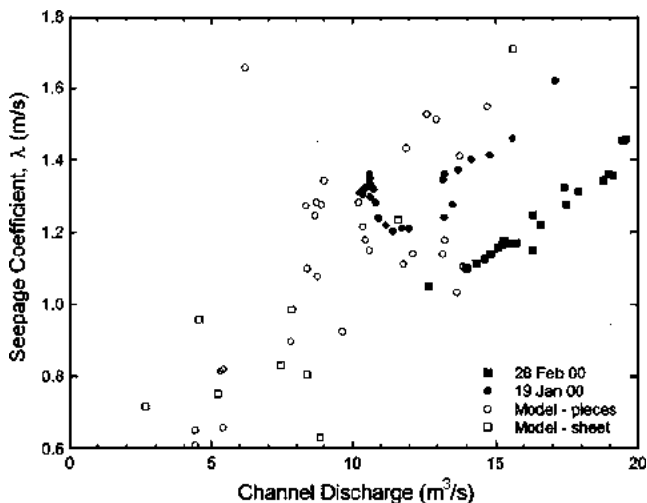


Fig. 7. Seepage coefficients versus channel (through-jam) discharge measured for jams grounded at the ICS during two field events and 15 model tests (in prototype units)

the January 19, 1996 and February 28, 2000 field events as functions of through-jam discharge. In both cases, three transducers were located in the toe region, and we calculated 1-min average values at 5–30 min intervals beginning shortly after jam formation as discharge slowly increased. We estimate $\pm 10\%$ uncertainty in the calculated coefficients. Two key points are worth noting. First, except for the effect of an early collapse during the January 19, 1996 event, the seepage coefficients generally increased with discharge during both events. This is consistent with increasing jam porosity via melting or mechanical erosion of smaller pieces. Second, the coefficients for the February 28, 2000 event were lower than those for the January 19, 1996 event. This is consistent with lower jam porosity caused by the latter event's more severe breakup wave.

Fig. 7 also shows seepage coefficients, in prototype units, obtained for 15 model tests. The two sets of results correspond to tests where the initial ice run interacted directly with the model structure (pieces) or with an intact ice sheet immediately upstream of the structure (sheet). The former tended to produce thick grounded jams with fairly consistent λ values, whereas seepage coefficients for the latter case varied abruptly when the sheet fractured and collapsed onto the blocks. It is encouraging to note that the model coefficients generally overlap with the field values and show a similar, though more scattered, correlation with channel discharge. Unlike the field events, however, it was difficult to obtain long sequences of λ versus Q for specific tests because the more rapid simulated hydrographs (to mimic extreme events) produced frequent collapses and fewer quasi-steady periods.

The average seepage coefficients for the two field events (1.2–1.4 m/s) are

significantly higher than those for the two model events under comparison here (0.6–0.9 m/s), although the model values were obtained at lower discharges (Table 2). The average for all model tests was $\lambda = 1.1 \pm 0.3$ m/s (1 standard deviation), consistent with the average field values. Again, the model values were measured at lower average discharge (9.5 ± 3.4 m³/s). Note that Beltaos (1999) obtained $\lambda = 1.5$ – 2.1 m/s for jams grounded upstream of an ICS on the Credit River in Ontario, where ice pieces averaged 0.21–0.25 m thick. Beltaos' results did not show a clear trend of λ versus Q , although the largest value coincided with the highest discharge.

The coefficients a and b in Eq. (1) can be related to properties of the fluid and porous medium through various formulas (Bear 1972). Beltaos (1999) chose the Ergun formula (Bear 1972) for b , or equivalently, λ

$$\lambda = \sqrt{\frac{Kp^3}{1-p}}gd_s \quad (3)$$

where K =dimensionless coefficient; p =ice-jam porosity; $d_s=6 \times$ (volume of solids)/(surface area of solids).

Here, Eq. (3) yields porosity given λ and estimates for K and d_s . Examination of Beltaos (1999) and Bear (1972) suggests $K=0.64 \pm 0.06$. To determine d_s , we may use average ice-floe length/thickness and width/thickness ratios measured in the model: $d_s=(2.2 \pm 0.2) \times$ ice thickness, t_i . The resulting expression for the porosities of the grounded jams is

$$\frac{p^3}{1-p} = 0.71 \frac{\lambda^2}{gt_i} \quad (4)$$

Uncertainties associated with K , d_s , t_i , and λ ($\pm 10\%$ each) do not strongly influence calculated porosities owing to the cubic nature of Eq. (4). The resulting average porosities are 0.67 ± 0.05 and 0.53 ± 0.03 for the two field jams and 0.41 ± 0.03 and 0.40 ± 0.03 for the two model jams discussed here (Table 2). These results seem reasonable (Prowse 1990; Beltaos 1999). The higher porosity for the January 19, 1996 field jam is consistent with that event's relatively less severe breakup wave.

Water Temperature and Ice Melting

For 2004–2005, we installed a thermistor probe to measure water temperature 88 m downstream of the ICS. Specifications for the probe indicate error less than ± 0.2 near 0°C , primarily an offset error associated with using standard coefficients in a polynomial to calculate temperature from measured resistance. The probe was buried in river gravel just below the channel bottom, about 2 m from the edge of the bank.

Fig. 8 shows the water temperature measured at 15-min intervals during the April 2, 2005 event and the corresponding pool elevation upstream of the ICS. The data reveal several interesting features. A small wave at 3:30 a.m. produced a 0.24-m elevation jump and probably cleared out the ice cover downstream of

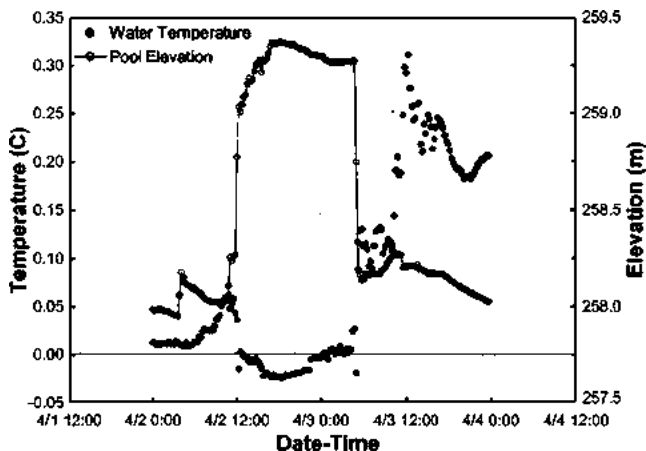


Fig. 8. Water temperature downstream of the ICS and pool elevation 52 m upstream of the ICS during the April 2, 2005 breakup event. ICS jam duration was from April 2, 12:00 p.m. to April 3, 5:00 a.m. Arrival of a small jam-release wave caused pool elevation to jump at April 2, 3:30 a.m. and probably released the downstream ice cover.

the ICS. The first video image at 6:10 a.m. indeed showed open water below the ICS. Water temperature rose steadily after this wave until the main ice run occurred at noon. As the ICS jam formed, recorded water temperature dropped to and below zero, reaching a minimum of -0.023°C . Because air temperature was above freezing, supercooling was not possible. Also, all water was flowing through ice, either at the grounded toe or through shear walls onto the floodplain. Thus, -0.023°C probably represents the probe offset from 0°C , a much smaller error than the upper-bound specification (0.2°C). After jam release at 5:00 a.m. on April 3, 2005, water temperature immediately jumped above 0.1°C and reached a high above 0.3°C before receding. Apparently, the water temperature entering the jam was between 0.1 and 0.3°C prior to its release.

Lever and Daly (2003) argued that melting reduces ice volume for jams held at breakup ice-control structures and cited supporting water-temperature measurements. A review of isotope studies by Buttle (1994) indicates that groundwater inflow usually accounts for more than 50% of streamflow at peak discharge, even for snowmelt events. This inflow will be close to the mean annual ground temperature, and will thus be an important heat flux into the river. Other sources of heat upstream of an ice jam include rainfall, air–water convection, solar radiation, fluid friction, and geothermal flux.

Can the warm water measured during the April 2, 2005 event account for the porosity increase observed during the February 28, 2000 event? The porous flow through the jam toe should be very efficient at transferring sensible heat in the water to ice melting. For simplicity, we may assume 100% heat transfer to de-

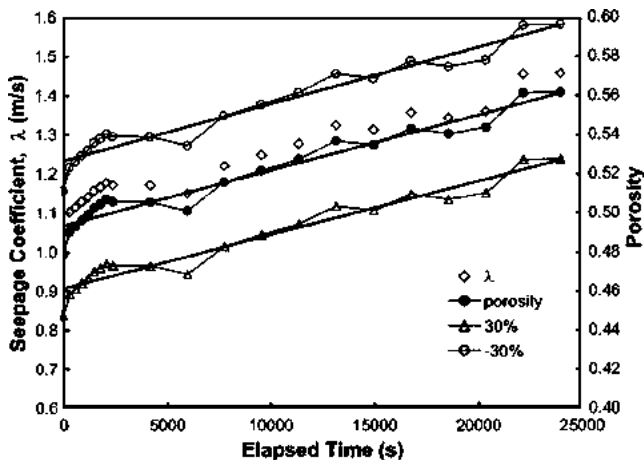


Fig. 9. Trends in λ and porosity with time from jam formation on February 28, 2000. Calculated porosities are for mean values and $\pm 30\%$ combined uncertainty in inputs to Eq. (4).

termine the minimum temperature needed to cause the measured porosity increase. For this case, an energy balance yields

$$Q\rho_w C_p \Delta T = h_f \rho_i \dot{V}_m \quad (5)$$

where Q =water discharge (m^3/s); ρ_w and ρ_i =water and ice densities (1,000 and $920 \text{ kg}/\text{m}^3$, respectively); C_p =specific heat of water ($4.2 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$); ΔT =water temperature above 0°C ; h_f =ice latent heat of fusion ($333 \text{ kJ}/\text{kg}$); and \dot{V}_m =volumetric ice melt rate. Eq. (5) thus becomes

$$\dot{V}_m = 0.0137 Q \Delta T \quad (6)$$

The ice volume in a jam is $V_{\text{ice}} = V_{\text{jam}}(1-p)$, where V_{jam} =overall jam volume (length \times width \times thickness). Consequently, if melting causes a porosity increase

$$\dot{V}_m = - \frac{dV_{\text{ice}}}{dt} = V_{\text{jam}} \frac{dp}{dt} \quad (7)$$

To apply Eq. (7) for the jam toe, we require an estimate of the toe volume and rate of increase in porosity, dp/dt . The February 28, 2000 jam width at the ICS was about 24 m. Based on similar model jams, we estimate that the length of the grounded section was about equal to this width. Ice was well above the top of the blocks, so the toe thickness was about 2.5 m. Thus, $V_{\text{jam}} \sim (1.4 \pm 0.4) \times 10^3 \text{ m}^3$.

We may obtain dp/dt graphically. Fig. 9 shows λ versus elapsed time from jam formation along with the porosities obtained via Eq. (4). Also shown are porosities resulting from combined $\pm 10\%$ uncertainties in each input parameter [$\pm 30\%$ total for the right side of Eq. (4)] and the corresponding linear fits. The input uncertainties combined contribute only $\pm 7\%$ uncertainty in p and only $\pm 3\%$

uncertainty in the best-fit slope, $dp/dt=(2.83\pm 0.08)\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$. Thus, for the February 28, 2000 jam toe $\dot{V}_m\sim(4\pm 1)\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$ via Eq. (7). The average through-jam discharge during the period of λ measurements was $Q=16\pm 2\text{ m}^3/\text{s}$. Eq. (6) thus yields an estimate for the minimum temperature required to cause the measured porosity increase of the jam toe: $\Delta T\sim 0.019\pm 0.006^\circ\text{C}$. This is substantially less than the temperatures measured during the April 2, 2005 event: at least 0.06°C at jam initiation and $0.1\text{--}0.3^\circ\text{C}$ after jam release (Fig. 9). Indeed, entering water temperature of only $0.06\pm 0.01^\circ\text{C}$ would have been sufficient to cause the entire 100-m-long jam to increase in porosity at the same rate as that calculated for the grounded toe.

ICS Ice-Holding Performance

A key parameter governing ice-jam formation and holding time at the prototype ICS is ice thickness. Historical records indicate that ice thickness in Hardwick village can exceed 0.6 m at the end of a cold winter without a midwinter breakup event. Indeed, pieces excavated from the 1992 Category 3 ice jam approached 1 m in thickness. By comparison, average ice-piece thickness at the ICS has equaled or exceeded 0.3 m only for the February 22, 1997 and the February 28, 2000 breakup events, and the ICS held the jams throughout both events. However, peak event discharges were only 14 ± 1 and $26\pm 1\text{ m}^3/\text{s}$, respectively. The ICS also held ice throughout a breakup event on February 12, 1998 ($15\pm 1\text{ m}^3/\text{s}$ peak) although ice pieces averaged only 0.18 m thick. For the relatively mild February 22, 1997 and February 12, 1998 events, the jams formed at the head of the pool and did not collapse onto the ICS. Note that the ICS held ice for 17 h during the April 2, 2005 event, when ice pieces were $0.28\pm 0.08\text{ m}$ thick and the release discharge was $42\pm 2\text{ m}^3/\text{s}$.

Fig. 10 shows the relationship between average ice-piece thickness at the ICS and jam-holding time for both field events and model tests. Holding time allows increasing discharge to weaken or release jams formed downstream of the ICS, and consequently, is an important performance measure. To compare with model data, ice thickness is expressed as a percent of the ICS gap width (4.3 m for the prototype ICS and four-block model tests, 5.6 m for three-block model tests). Note that for “no release” we assigned an arbitrary holding time of 48 h (longer than the typical hydrograph time-to-peak of 24 h). Generally, holding time increased with ice thickness up to a threshold of about 6–7% of gap width, after which no releases occurred. On only one occasion (March 29, 1994 test) did the four-block model structure release a jam. Ice thickness for that test averaged $0.28\pm 0.01\text{ m}$ and the jam released at a total discharge of $48\pm 5\text{ m}^3/\text{s}$, with $22\pm 6\text{ m}^3/\text{s}$ passing through the jam (Table 2).

The discharge at which jams release is also an important measure of ICS performance. Fig. 11 shows field and model release discharges versus ice thickness. As with holding time, release discharge increased with ice thickness up to a threshold of about 6–7% of gap width, then no releases occurred.

Releases did terminate four three-block model tests at discharges of $15\text{--}45\text{ m}^3/\text{s}$. For these tests, average ice thickness ranged from 0.26 to 0.34 m

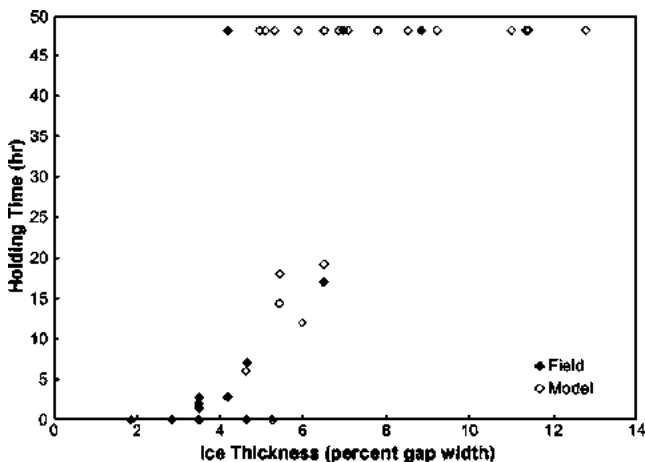


Fig. 10. Influence of ice-piece thickness on ICS jam-holding time. Field and model events with no releases are assigned holding times of 48 h. Model events with releases are assigned holding times based on a hydrograph with a peak flow of $60 \text{ m}^3/\text{s}$ occurring 24 h into event.

(4.6 to 6.0% of the gap). Only one of these tests included an ice sheet upstream of the structure (the normal condition prior to breakup at the prototype ICS). For that test, ice thickness was 0.34 m and release occurred with the base flow at $30 \text{ m}^3/\text{s}$ following arrival of a second simulated ice run. For both holding time and release discharge, normalization of ice thickness by gap width nicely collapses these model results onto the field data.

Discussion and Conclusions

A critical design goal for the sloped-block ice-control structure was safe and reliable ice retention to reduce downstream flooding. Consequently, model tests simulated breakup events that pose the greatest flood risk: large ice thickness and volume and severe breakup waves.

Most field events have been less severe than the model events because many mild hydrographic events occur for every severe one. Nevertheless, breakup on February 28, 2000 had similar ice-hydraulic characteristics as typical model tests, and the ICS held a jam throughout the event. Also, during breakup on April 2, 2005, the ICS held a jam to a discharge of $42 \text{ m}^3/\text{s}$, with pool elevation 1.2 m above the top of the blocks. This is an impressive accomplishment considering the ice averaged less than 0.3 m thick. Note that during the three worst ice-jam floods in Hardwick since 1960, peak discharge was less than $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Overall, field and model ice-holding times and jam-release discharges are quite consistent using ice thickness as a percentage of gap width to collapse the data. They

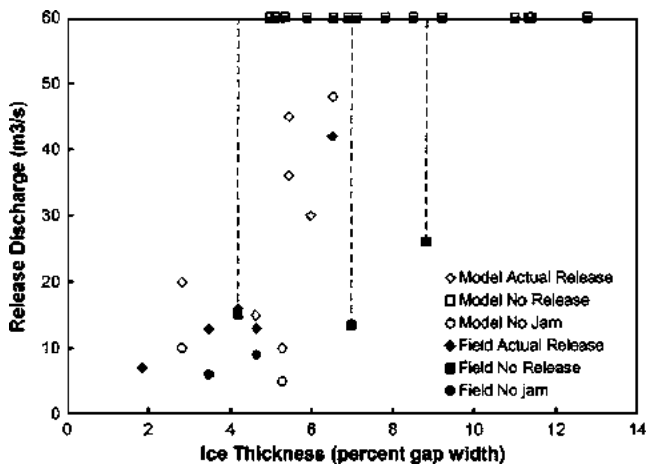


Fig. 11. Influence of ice thickness on ICS jam-release discharge. Field events with no releases are assigned the peak event discharge and a vertical dashed line. Model events with no releases are assigned $60 \text{ m}^3/\text{s}$ (higher than $\sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$ peak model discharge).

indicate that the prototype ICS should retain an ice jam throughout severe breakup events when ice thickness exceeds about 7% of gap width or 0.30 m.

Clearly, breakup ice thickness does not solely govern the ICS performance. Ice floe size and strength and wave amplitude must also influence arrest and grounding of the ice run and subsequent jam retention. However, ice thickness is a reasonable surrogate for these other factors. Ice floe size increases with thickness, increasing the likelihood of jamming across the ICS gaps; stage rise required to initiate breakup increases with ice bending strength (and thus thickness) as does the amplitude of the resulting wave; large ice thickness at breakup implies high strength of ice floes and thus high potential to resist rising hydraulic forces in the jam. These same factors contribute to high-risk natural ice jams, so improved ICS performance with increasing ice thickness suggests that the structure performs well when the flood threat is greatest.

Porous flow through a grounded jam toe influences the split between main-channel and floodplain discharges, and consequently the total discharge at which a jam may ultimately release. Porous flow through two well-documented ICS jams showed increasing seepage coefficients, and thus porosity, with increasing through-jam discharge. Ice melting can account for this effect assuming that $0.1\text{--}0.3^\circ\text{C}$ water temperatures measured during the April 2, 2005 breakup event are representative at this site. Thus, heat flux rather than mechanical erosion may be the primary cause of increasing ICS jam porosity. Lever and Daly (2003) argued that 0.7°C was a reasonable estimate for water entering an ICS jam on Cazenovia Creek and used this value to model ice melting during high-discharge breakup events. Owing in part to the inflow of ground water, water temperature entering an ice jam can be measurably above freezing, and the resulting melting

should be included in analyses of seepage coefficients and jam volume. More data are needed to determine variability of water temperatures during breakup and their dependence on hydrologic characteristics of the basin of interest.

Seepage coefficients from model tests also correlated with discharge and generally overlap field values. While Lever et al. (1997) did not model river water temperatures, the hydraulic pumps did warm the water, and tests were conducted with air temperatures above freezing. Also, small ice pieces continually washed out and floated away downstream during the model tests, and this mechanism would also have increased jam porosities. These effects could be modeled more rigorously to match field effects, but again more observations are needed. Overall, the similarity of model and field ice-hydraulic characteristics and ice-holding performance provides reassurance that the model was a suitable tool to guide the design of the ICS.

Is the sloped-block ICS mitigating ice-jam flooding in Hardwick? The evidence compiled to date suggests yes. There has been a noticeable reduction in ice-jam severity in Hardwick village during the past 11 seasons compared with the previous 30 years. Also, both field and model performance measures indicate that the ICS arrests ice runs and holds the resulting ice jams during conditions that pose the greatest flood threat: thick, strong ice and large breakup waves. Ice jams have formed in the village from ice runs downstream of the ICS, but jams retained by the ICS have limited ice supply and thus peak stages. Furthermore, ice-retention capacity is adequate during lesser events to allow downstream ice jams to release and any released ICS jams to pass harmlessly through the village. Thus, the ice-retention behavior of the ICS can account for the observed reduction in ice-jam flooding in Hardwick. A future study could strengthen this conclusion by simulating post-ICS breakup events, with and without the ICS, to quantify the reduction in peak stage attributable to the ICS. Nevertheless, reduced ice supply always helps, and the ICS has limited ice supply for hours to days during the most severe breakup events experienced to date.

Note that lowering the winter pool of Hardwick Lake from 1984 onward helped to move downstream the location of any ice jams that do form in the village. The jam-mitigation effect was not as pronounced as that of the ICS, and several threatening ice jams formed during the intervening 10 years. However, it couples nicely with reduced ice supply caused by the ICS to help prevent formation of threatening jams from ice released downstream of the ICS.

Is the sloped-block ICS appropriate for other flood-prone locations? Yes, but some design considerations are harder to satisfy than others. The number of blocks scales easily with river width and ice thickness to achieve ice-thickness/gap-width greater than 7% for expected severe events. A floodplain is required adjacent to the ICS, and the site should be as close as possible to the flood-prone area to maximize ice volume retained by the structure. Numerical analyses for through-jam and floodplain conveyance are possible, although the influence of ice melting on the former could vary with location. The most difficult design issue is the relationship linking block height, ice thickness, and release discharge or stage. The ICS blocks should protrude above the top of the bank, but the release stage depends in part on the height of the grounded toe, which is governed by dynamic processes during ice-jam arrest and subsequent collapses. Additionally, the down-

stream consequences of ICS jam releases for mild events should be considered. Dynamic numerical models (Hopkins et al. 1996; Lui and Shen 2005) could address these issues without resorting to model tests. Field and model data presented here should help validate such models for future design efforts.

Acknowledgments

Nearly everyone in CRREL's Ice Engineering Group has contributed over the years to the design, construction, and monitoring of the sloped-block ice-control structure: J.C. Tantinclaux, Kate White, Steve Daly, Andy Tuthill, Ed Foltyn, John Gagnon, Charlie Clark, Bob Haehnel, Jesse Stanley, and Carrie Vuyovich. The writers sincerely thank them for their efforts and continued interest in the project. The Town of Hardwick and the Federal Emergency Management Agency split the construction cost of the prototype ICS, and Hardwick continues to maintain it. We also gratefully acknowledge the support of the U.S. Army Corps of Engineers civil works research program for initial development and continued monitoring of the ICS.

References

- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*, Dover, New York.
- Beltaos, S. (1993). "Flow through breakup jams." *Proc., Canadian Hydrotechnical Conf.*, Fredericton, N.B., Canada, 643–652.
- Beltaos, S. (1999). "Flow through the voids of breakup ice jams." *Can. J. Civ. Eng.*, 26, 177–185.
- Beltaos, S. (2005). "Field measurements and analysis of waves generated by ice-jam releases." *Proc., 13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*, Hanover, N.H., 227–249.
- Buttle, J. M. (1994). "Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins." *Prog. Phys. Geogr.*, 18(1), 16–41.
- Calkins, D. J. (1985). "Ice jam prevention measures, Lamoille River at Hardwick, Vermont, USA." *Proc., 2nd Int. Conf. on the Hydraulics of Floods and Flood Control*, Cambridge, U.K., Paper C3, 149–168.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1987). "Flood insurance study, Town and Village of Hardwick, Vermont, Caledonia County." *FEMA Community No. 500027*, FEMA, Washington, D.C.
- Hopkins, M. A., Daly, S. F., and Lever, J. H. (1996). "Three-dimensional simulation of river ice jams." *Cold Regions Engineering—Proc., 8th Int. Conf. on Cold Regions Engineering*, R. F. Carlson, ed., Fairbanks, Alaska, 582–593.
- Lever, J. H., and Daly, S. F. (2003). "Upstream effects of Cazenovia Creek ice-control structure." *J. Cold Reg. Eng.*, 17(1), 3–17.
- Lever, J. H., Gooch, G., Tuthill, A., and Clark, C. (1997). "Low-cost ice-control structure." *J. Cold Reg. Eng.*, 11(3), 198–220.
- Liu, L., and Shen, H. T. (2005). "Numerical modeling of 2003 Grasse River ice jam and

scenario analysis.” *Proc., 13th Workshop of the Hydraulics of Ice Covered Rivers* (CD-ROM), Hanover, N.H..

Nislow, K. H., and Lever, J. H. (1998). “Assessing the ecological impact of an ice control structure.” *Ice in Surface Waters—Proc., of 14th Int. Sym. on Ice*, H. T. Shen, ed., Potsdam, N.Y., 787–792.

Prowse, T. D. (1990). “Heat and mass balance of an ablating ice jam.” *Can. J. Civ. Eng.*, 17(4), 629–635.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (1998). *HEC-RAS river analysis system, user’s manual, version 2.2*, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif.

Wong, J., Beltaos, S., and Krishnappan, B. G. (1985). “Seepage flow through simulated grounded ice jam.” *Can. J. Civ. Eng.*, 12(4), 926–929.

ANNEXE F – Courriel de l’OIQ – Obligations face à la *Loi sur les ingénieurs*

Thomas S. Robitaille

De: Claude Beaulieu <cbeaulieu@enord.ca>
Envoyé: 29 novembre 2021 10:33
À: 'Thomas S. Robitaille'
Objet: TR: [OIQ] - (SAC-33885) Urgent! - aide, application de la Loi

De : Renault, Christian <crenault@OIQ.QC.CA> **De la part de** Pratique Professionnelle
Envoyé : 17 novembre 2021 13:39
À : cbeaulieu@enord.ca
Objet : RE: [OIQ] - (SAC-33885) Urgent! - aide, application de la Loi

Bonjour Monsieur Beaulieu,

Voici quelques références :

- L'article 1.1 de la [loi sur les ingénieurs](#) définit l'exercice de l'ingénierie. Cet article mentionne que le respect de l'environnement et de la vie, la protection des biens, la pérennité du patrimoine et l'efficacité économique font partie de l'exercice de l'ingénierie dans la mesure où ils sont liés aux activités professionnelles de l'ingénieur.
- Les articles 2 et 3 de la loi définissent les activités professionnelles réservées aux ingénieurs.
- L'article 2.01 du [Code de déontologie des ingénieurs](#) mentionne que dans tous les aspects de son travail, l'ingénieur doit respecter ses obligations envers l'homme et tenir compte des conséquences de l'exécution de ses travaux sur l'environnement et sur la vie, la santé et la propriété de toute personne.
- [Obligation d'avertir lorsque des travaux dangereux sont réalisés](#)

En espérant que ces références pourront vous être utiles.

Cordialement,

Christian Renault, ing., M.Sc.
Conseiller senior à la surveillance de l'exercice

Ordre des ingénieurs du Québec
1801, avenue McGill College, 6^e étage
Montréal (Québec) H3A 2N4
514 845-6141 | 1 800 461-6141, poste 3191
crenault@oiq.qc.ca
oiq.qc.ca | carrieresoig.ca



Avis de confidentialité

L'information transmise dans ce message électronique ainsi que dans les fichiers qui peuvent y être attachés est de nature confidentielle et destinée à l'usage exclusif du destinataire. Si ce message vous est parvenu par erreur ou que vous n'êtes pas le destinataire visé, vous êtes par la présente avisé que tout usage, copie ou distribution de l'information de ce message est strictement interdit et vous êtes prié d'en aviser l'expéditeur et de détruire ce message.

Confidentiality Notice

ANNEXE G – MORSE, B., SIMARD-ROBITAILLE, T., TURCOTTE, B. 2021. Réduction du risque relié aux inondations à Saint-Raymond– Phase II; Bilan de l’estacade flottante et de son seuil rocheux aménagés au km 24 sur la rivière Sainte-Anne. Rapport présenté au ministère de la Sécurité publique dans le cadre du contrat CPS-18-19-02. Université Laval, Québec. 28 p.

Réduction du risque relié aux inondations à Saint-Raymond – Phase II

GQ120923

Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2022

CPS 18-19-02

**Bilan de l'estacade flottante et de son seuil rocheux aménagés au km 24 sur la
rivière Sainte-Anne**

29 novembre 2021

Travail réalisé pour :

Ministère de la Sécurité publique
Direction générale adjointe de la prévention et de la planification
Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie
2525, boulevard Laurier, Tour des Laurentides, 6e étage
Québec (Québec), G1V 2L2

Travail réalisé par :

L'équipe de travail au 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

Réalisation des travaux

L'équipe de l'Université Laval (EUL) est composée de :

Thomas Simard-Robitaille, M.Sc, ing. jr, sous-traitant à l'Université Laval

Benoit Turcotte, ing. Ph. D., sous-traitant à l'Université Laval

Brian Morse, ing. Ph. D., professeur à l'Université Laval

Ce projet bénéficie de l'expertise et des orientations de Pascal Marceau Ph.D. et Josée Pelland, ing. de la direction de la planification et de la prévention, de la direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie, du ministère de la Sécurité publique.

Pour citation

Morse, B. Simard-Robitaille, T., Turcotte, B. (2021). *Réduction du risque relié aux inondations à Saint-Raymond– Phase II; Bilan de l'estacade flottante et de son seuil rocheux aménagés au km 24 sur la rivière Sainte-Anne*. Rapport présenté au ministère de la Sécurité publique dans le cadre du contrat CPS-18-19-02. Université Laval, Québec. 28 p.

Le projet « *Réduction du risque relié aux inondations à Saint-Raymond -phase II* » a reçu une contribution financière de 526 000 \$ provenant du Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2022 du gouvernement du Québec [CPS 18-19-02].

Résumé

La mise en place d'une estacade flottante à sapins et d'un seuil rocheux au km 24 (soit 18 km en amont du centre-ville de Saint-Raymond) représentait une des combinaisons de mesures parmi les plus prometteuses identifiées par l'équipe de l'Université Laval (EUL) pour la réduction des risques liés aux inondations de la rivière Sainte-Anne sur la ville.

Le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) et la Ville de Saint-Raymond (VSR) ont accepté et soutenu cette recommandation visant la construction, l'exploitation et l'entretien de cette infrastructure à l'intérieur d'un projet de recherche. Ce projet arrive maintenant à terme et, afin de faciliter le transfert de cette infrastructure à la VSR, ce rapport décrit l'infrastructure, son objectif et sa performance depuis les cinq derniers hivers.

Les fonctions principales de l'estacade-seuil (E-S) sont (1) d'initier prématurément le couvert de glace à l'automne, (2) de retenir un maximum de frasil au début de l'hiver, ainsi que (3) de freiner des trains de glace lors de débâcles. Ce sont ces impacts qui permettent de réduire les risques liés aux inondations à la VSR.

Depuis la mise en place du seuil en 2019, faisant suite à l'installation chaque automne depuis 2016 de l'estacade flottante, le transport de frasil cesse en moyenne 6 jours après le début de l'hiver, soit après environ 35 degrés jours de gel cumulé (DJGC). Cette performance concorde avec l'objectif visé de réduire au minimum la période de transport du frasil vers le centre-ville. Ne laisser passer que la quantité de frasil produite par 35 DJGC représente un résultat exceptionnel, tout autant que l'est la capacité du site aménagé à retarder la débâcle lors d'une crue. Malgré un suivi limité à deux hivers depuis que l'aménagement a été complété, nous concluons que le système E-S est très performant.

Nous recommandons que l'estacade soit entretenue, inspectée et posée annuellement. Nous recommandons également de retirer les débris ligneux appuyés sur le seuil et d'inspecter sa structure annuellement. De plus, nous recommandons de continuer d'évaluer les impacts potentiels sur la faune tel que requis par le CA du MELCC et nous croyons que cela démontrera que l'E-S n'a aucun impact négatif sur la libre circulation des poissons. Finalement, afin d'assurer une surveillance constante de l'E-S en lien avec son opérationnalité, l'implication d'un expert serait aussi de mise.

Table des matières

| | |
|---|-----|
| Résumé | iii |
| 1. Introduction | 1 |
| 1.1 Objectifs | 1 |
| 2. Description de l'installation (estacade-seuil) | 2 |
| 2.1 Localisation | 2 |
| 2.2 Fonctions | 5 |
| 2.3 Design de l'estacade-seuil | 6 |
| 2.3.1 <i>Choix de l'emplacement</i> | 6 |
| 2.3.2 <i>Défi de conception et design fonctionnel</i> | 7 |
| 2.3.3 <i>Design structurel</i> | 7 |
| 2.4 Impacts environnementaux | 15 |
| 2. Bénéfices et performances | 18 |
| 3. Constats | 22 |
| 4.1. Nombre de jours pour la formation du couvert de glace et l'arrêt du transport du frasil | 22 |
| 4.2. Débits | 22 |
| 4.3. Degrés jours de gel | 22 |
| 4.4. Dégels hivernaux | 23 |
| 5. Conclusion et recommandations | 25 |
| Bibliographie | 26 |
| Annexe A – Plans du seuil rocheux tel que construit | 28 |

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1a. Localisation de l'E-S sur la rivière Ste-Anne | 2 |
| Figure 1b. Localisation du seuil-estacade (vue en profil de la rivière Ste-Anne) | 3 |
| Figure 2. Prise des glaces en amont du seuil et en amont de l'estacade au km 24..... | 4 |
| Figure 3. Schéma pour orienter ceux qui font la pose annuelle de l'estacade à conifères. | 10 |
| Figure 4. Canon à neige utilisé pour créer un seuil neigeux | 13 |
| Figure 5. Seuil rocheux aménagé sur la rivière Sainte-Anne à 18 km en amont du centre-ville. . | 14 |
| Figure 6. Photo lors de la pose de l'estacade flottante le 9 décembre 2016..... | 18 |
| Figure 7. État de la couverture de glace lors de la pose de l'estacade, le 14 novembre 2019 | 19 |
| Figure 8. Couvert de glace respectivement le 17 novembre 2020 (A) et la journée suivante (B). 20 | |
| Figure 9. Vue aérienne de la prise des glaces en amont de l'E-S..... | 21 |

| | |
|--|---|
| Schéma 1. Éléments de conception de l'estacade flottante sur la rivière Sainte-Anne au km 24: ancrages (noir), manilles y incluant maillon faible et chaines (rouge), câble principal (jaune), conifères (vert), bouées de flottaison (bleu). | 8 |
|--|---|

| | |
|---|---|
| Photo 1. Tête d'un ancrage de l'estacade (noir) avec maillon faible (gris) et manille (rouge) pour attacher la chaîne (noir foncé). (La présence de la pelle est là à des fins d'échelle.)..... | 9 |
|---|---|

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Analyse des coûts de l'estacade aux conifères du km 24 | 12 |
| Tableau 2. Coûts reliés à l'aménagement du seuil rocheux. | 15 |
| Tableau 3. Synthèse des valeurs écologiques des milieux humides riverains | 16 |
| Tableau 4. Performance de la prise des glaces au km 24 selon les années d'observations | 24 |

1. Introduction

La ville de Saint-Raymond (VSR) a été affectée par de nombreuses inondations depuis sa fondation. En effet, la rivière Sainte-Anne, située au cœur de la ville, est préoccupante pour la population. En 2014, la VSR a fait face à l'une des plus importantes inondations de son histoire (Morse et Turcotte, 2014; Perrault et al., 2015).

La rivière Sainte-Anne a fait l'objet de nombreuses études sur les inondations survenues au cours des dernières décennies (ex : Piette, 1953; Leclerc, 1966; Fau et Bordeleau, 1991; Fortier et Gauthier, 2009). Depuis 2014, l'Université Laval travaille à mieux comprendre la dynamique de la rivière durant toutes les saisons afin de définir une stratégie plus efficace de réduction du risque d'inondation.

Des mesures d'atténuation incluant l'installation, en amont de la ville, d'une estacade flottante en combinaison avec un seuil rocheux (E-S) ont été recommandées à la suite des premiers hivers d'observation. Le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) et la VSR ont accepté et soutenu cette recommandation visant la construction, l'exploitation et l'entretien de cette infrastructure à l'intérieur d'un projet de recherche. Ce projet arrive maintenant à terme et, afin de faciliter le transfert de cette infrastructure à la VSR, ce rapport décrit l'infrastructure, son objectif et sa performance depuis les cinq derniers hivers. À notre connaissance, cette infrastructure est unique au monde.

1.1 Objectifs

D'abord, il est important de comprendre les différentes étapes du projet sur la réduction des risques liés aux inondations à la VSR, ainsi que les différentes mesures de mitigation suggérées et mises en place. En effet, le but de la présente étude est de démontrer, de manière objective, l'efficacité de la combinaison estacade flottante - seuil rocheux sur la base d'observations, de documentation et de simulation de son comportement. Ce rapport présente une brève description de l'estacade flottante et du seuil rocheux, leur coût associé, différentes études d'impacts ainsi que des recommandations. Ce rapport est un livrable identifié dans l'avenant du contrat de recherche VSR-phase II octroyé par le MSP à l'EUL.

2. Description de l'installation (estacade-seuil)

2.1 Localisation

La structure E-S est située à 24 kilomètres en amont du barrage de Chute-Panet ($47^{\circ}00'30.4''N$ $71^{\circ}42'58.8''O$; Figure 1a), dans la partie aval d'un bief seuils-mouilles (nommé S5) et à l'amont de rapides (S4) (Figure 1b). L'estacade flottante se situe à environ 15 mètres en amont de l'arche du seuil rocheux (Figure 2). À cet endroit, le bassin versant de la rivière Sainte-Anne est de 550 km^2 , comparativement à 760 km^2 au centre-ville.

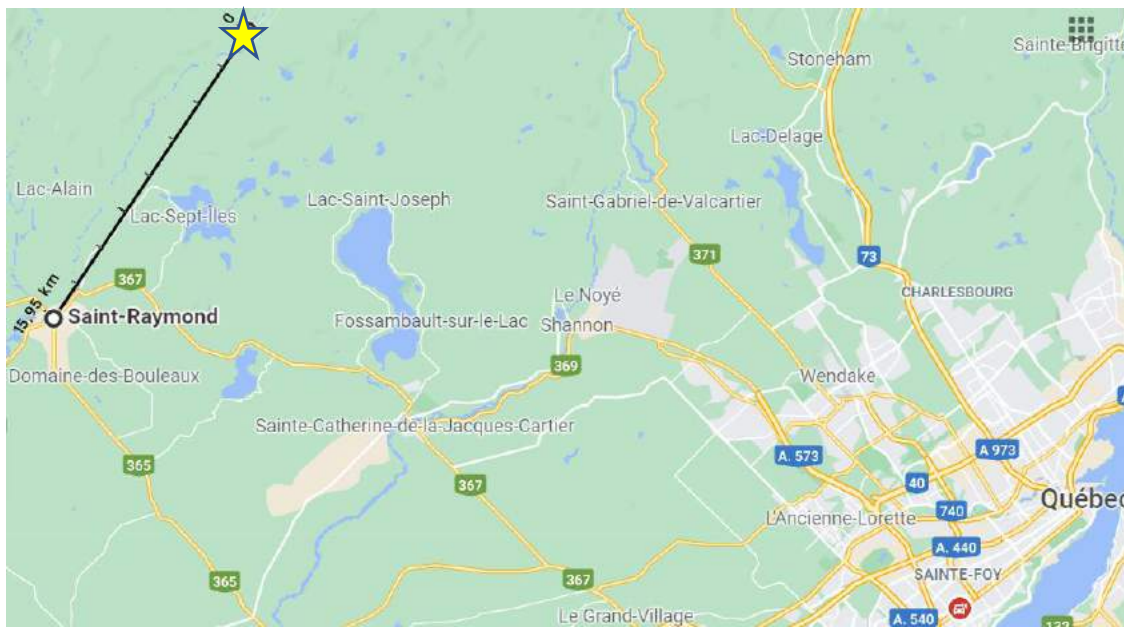


Figure 1a. Localisation de l'E-S sur la rivière Sainte-Anne; l'étoile correspond à l'endroit où l'estacade-seuil a été installée 24 km en amont du barrage Chute-Panet et 18 km (16 km vol d'oiseau) en amont du centre-ville de Saint-Raymond (selon Google Maps).

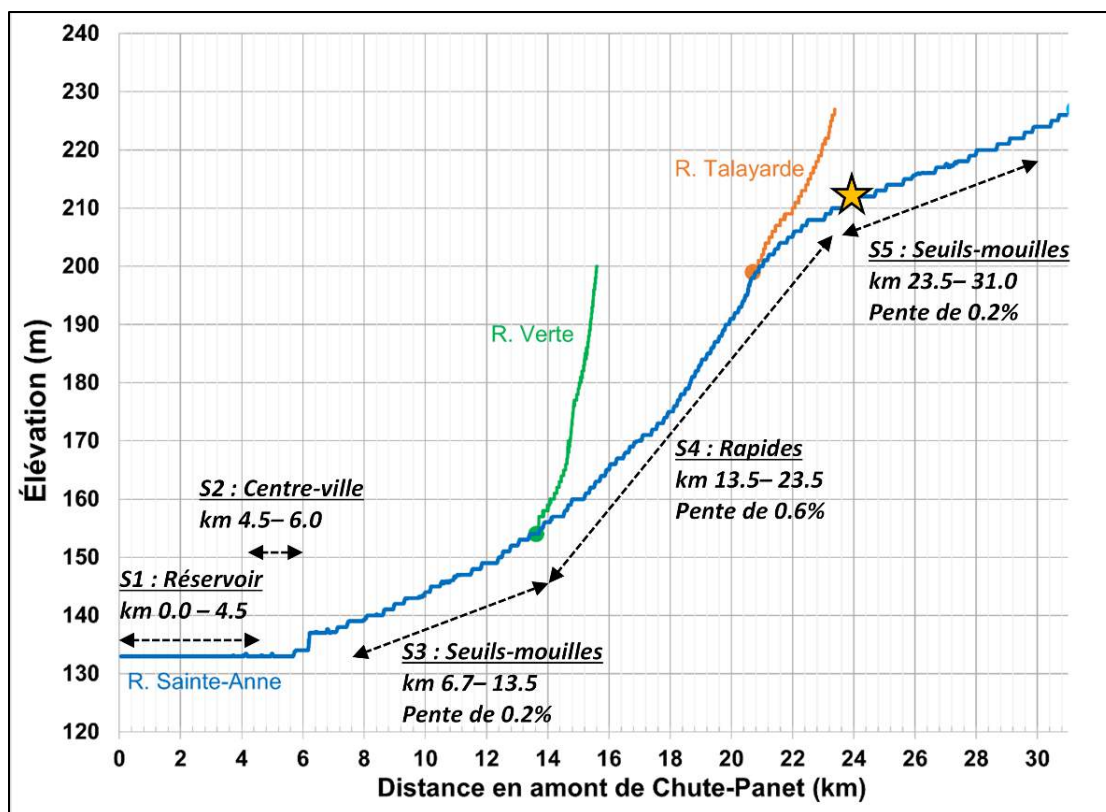


Figure 1b. Localisation du seuil-estacade (vue en profil de la rivière Ste-Anne), l'étoile correspond à l'endroit où l'estacade-seuil a été installée. (Le zéro correspond à l'emplacement du barrage Chute-Panet).

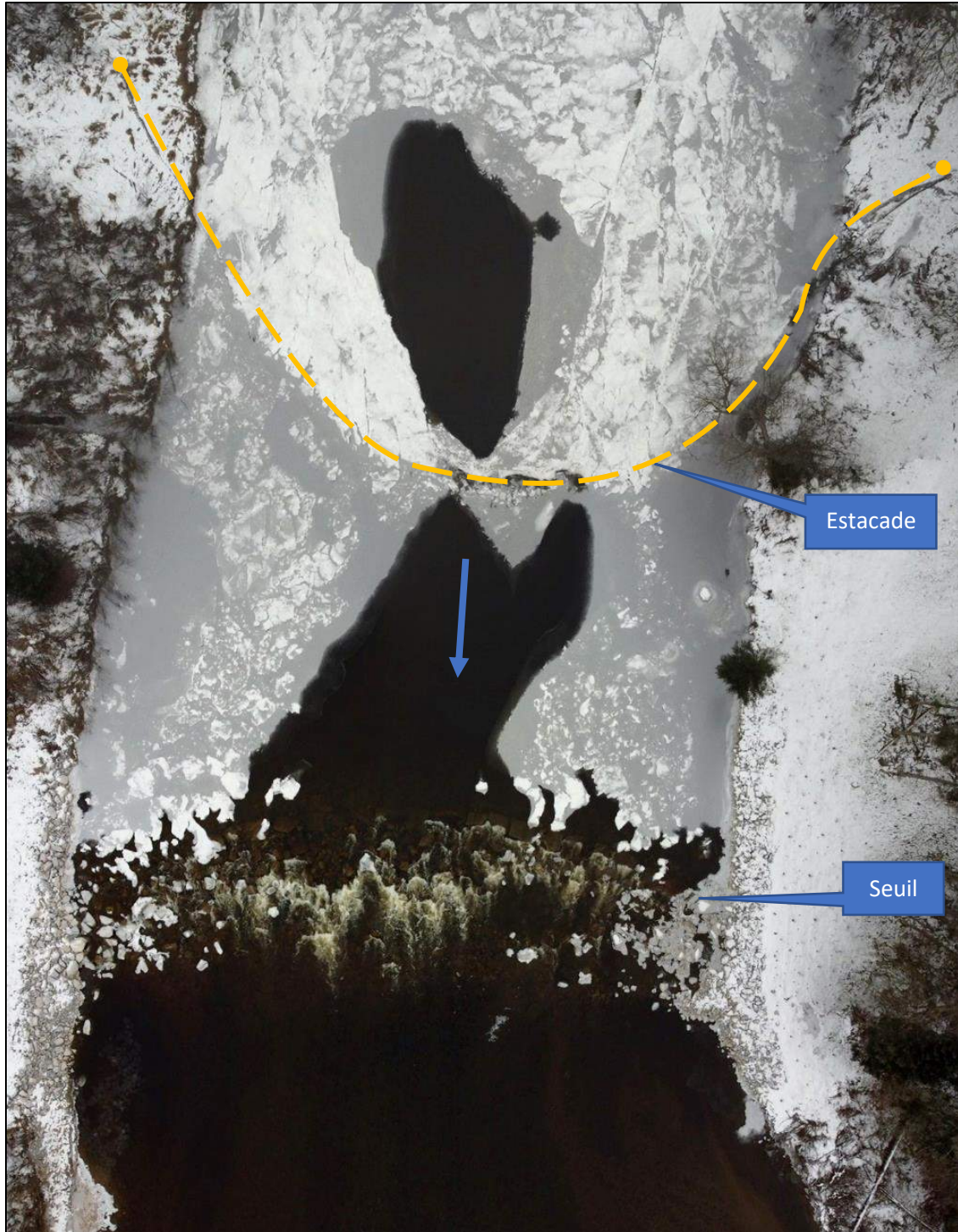


Figure 2. Vue aérienne de la prise des glaces en amont du seuil et en amont de l'estacade au km 24, le 24 novembre 2020, soit 12 jours après l'installation de l'estacade (Multimédias Région Portneuf, 2020). La flèche indique le sens de l'écoulement. Le tracé en pointillé localise l'estacade flottante.

2.2 Fonctions

L'E-S cherche à réduire le volume du barrage consolidé de frasil (BCF) qui se forme annuellement à la VSR entre le km 2 et le km 13.5. Le BCF est un grand obstacle à l'écoulement qui peut causer des inondations par lui-même et peut aussi être à la source de la création d'un embâcle qui peut causer des inondations.

Le système estacade-seuil (E-S) est nommé ainsi puisque ces deux entités travaillent ensemble. Le seuil rocheux permet de créer des conditions hydrauliques favorables à la formation d'un couvert de glace tandis que l'estacade flottante agit comme un peigne pour intercepter le frasil transporté par le courant et ainsi initier la formation du couvert de glace. Chacune des installations est décrite dans les sections suivantes.

En rehaussant le niveau d'eau à l'endroit de l'estacade et sur environ 700 m de plus, le seuil améliore les conditions hydrauliques pour que l'estacade travaille efficacement.

Grâce aux conifères qui y sont attachés à un câble flottant, l'estacade agit comme un peigne pour intercepter le frasil transporté par le courant, réduit les vitesses du courant en surface et ainsi offre une zone où le frasil qui est à la dérive peut se déposer à la surface de l'eau. Ensuite, grâce aux zones calmes présentes naturellement et améliorée par la présence du seuil, le couvert peut graduellement remonter la rivière et se former sur une longueur initiale de 700 m.

Avec le temps, ce couvert de glace s'épaissit par la croissance thermique et par la déposition en dessous du frasil qui transite de l'amont. Éventuellement, le couvert devient assez résistant pour former une marche dans la rivière et devient inondée. Par la suite, la croissance du couvert de glace peut continuer sa progression vers l'amont. Éventuellement, il y a un couvert de glace qui se forme entre le km 24 et le km 31. Ce couvert coupe la production de frasil et ainsi réduit le volume du BCF.

Plus tard dans l'hiver, lors de la débâcle, le couvert de glace formé par l'estacade permet de freiner temporairement les trains de glace qui descendent la rivière en amont du km 24. Ce retardement (ou arrêt) du train crée un déphasage entre l'onde d'eau de la débâcle et les trains de glace associés. Ceci a pour effet de limiter la quantité de glace d'un embâcle de

glace et le débit lors de sa formation. Ainsi, le freinage temporaire ou l'arrêt absolu du train de glace par l'E-S peut atténuer les niveaux d'inondation au centre-ville de VSR.

2.3 Design de l'estacade-seuil

2.3.1 Choix de l'emplacement

- En amont du km 31, la rivière est composée de deux branches ayant des pentes très importantes et le processus de formation de la glace dans ces biefs est 'dynamique'. c'est-à-dire qu'il y a la formation de glace de fond, de barrages de glace et de seuils de glace. De ce fait, il est inutile de tenter d'intervenir à cet endroit.
- Dans la section des rapides (Figure 2; S4), l'écoulement est trop vif (supérieur à 0.7 m/s) pour inciter la formation d'un couvert de glace sans un reprofilage complète du bief.
- L'opportunité recherchée avec la pose de l'E-S est la formation du couvert de glace sur le bief (Figure 1b,S5). Ce bief a une géomorphologie seuil-mouille qui n'est pas normalement associée avec la pose d'estacade flottante (courant généralement trop vif et glace à la dérive généralement trop sphérique), mais en choisissant un bon site, l'espoir était là. Pour se faire, il fallait :
 - un site le plus proche de la fin de la section S5 pour maximiser la superficie recouverte sur S5.
 - un site juste en haut d'une marche afin de déjà avoir un plan d'eau le plus tranquille possible sur une distance le plus importante possible.
 - un site accessible aux travaux de construction, pose et enlèvement.
 - un site pas trop large pour faciliter les travaux et minimiser les coûts.
 - un site où la construction du seuil aura un impact minimal sur l'inondation des terres à l'amont.
 - un site où le propriétaire donnerait accès à la rivière Saint-Anne et accepterait les dérangements sur son terrain.

Après de nombreuses visites sur le terrain et après la modélisation des vitesses de courant et de profondeur d'inondation dans HEC-RAS, le site au km 24 fut choisi (Figures 1 et 2).

2.3.2 Défi de conception et design fonctionnel

Plusieurs défis de conception ont été relevés par l'équipe de l'Université Laval (EUL) au cours des années :

- D'abord, une estacade traditionnelle (formée de câbles d'acier et bouées métalliques) est normalement conçue pour intercepter des blocs et plaques de glaces à des vitesses d'écoulement allant jusqu'à 0,6 m/s. Cependant, ce genre de structure ne peut pas intercepter les particules de frasil. L'estacade flottante comprenant des conifères attachés à un câble flottant, une idée originale de l'EUL, intercepte plus efficacement le frasil surtout lorsque les vitesses de l'eau sont inférieures à 0,3 m/s.
- À la suite notre modélisation du bief dans HEC-RAS, l'EUL recommande d'aménager un seuil rocheux en complément de l'estacade flottante, puisque cette dernière ne serait que partiellement efficace en raison des conditions hydrauliques naturelles non-favorables (vitesses trop élevées), surtout à environ 100 m en amont du site retenu à cause de la présence d'un seuil naturel (environ 0,2 m de dénivellation).
- En collaboration avec l'EUL, *Environnement Nordique* (Claude Beaulieu, ing.) a procédé au design d'un seuil rocheux afin d'augmenter la profondeur d'eau dans le but de réduire les vitesses d'écoulement pour ainsi créer des conditions hydrauliques favorables pour la rétention de la glace sur une grande distance en amont et pour une plage de débit beaucoup plus large. Lors de la conception, il fallut que le seuil rocheux ne soit pas trop haut afin d'assurer le libre transit des poissons.

2.3.3 Design structurel

2.3.3.1 Estacade flottante

L'estacade flottante est attachée chaque automne à ses ancrages permanents aménagés sur chacune des rives (Figure 2). Elle n'a quasiment aucun impact hydraulique (Edie et al., 2021), ni sur les différents habitats (aquatique et riverain), ni sur le transport des sédiments en charge de fond ou en suspension (Bélangier et coll., 2019, Simard-Robitaille et coll., 2019).

L'estacade flottante comprend un câble principal, des ancrages, des chaînes et manilles, des conifères et du matériel de flottaison (Lafleur, 2017). Le câble principal est un cordage

marin en polyéthylène (fibre *Dyneema*) qui est léger, flottant et aussi résistant que l'acier. La structure a été pensée de manière à former une parabole sous tension (Schéma 1).

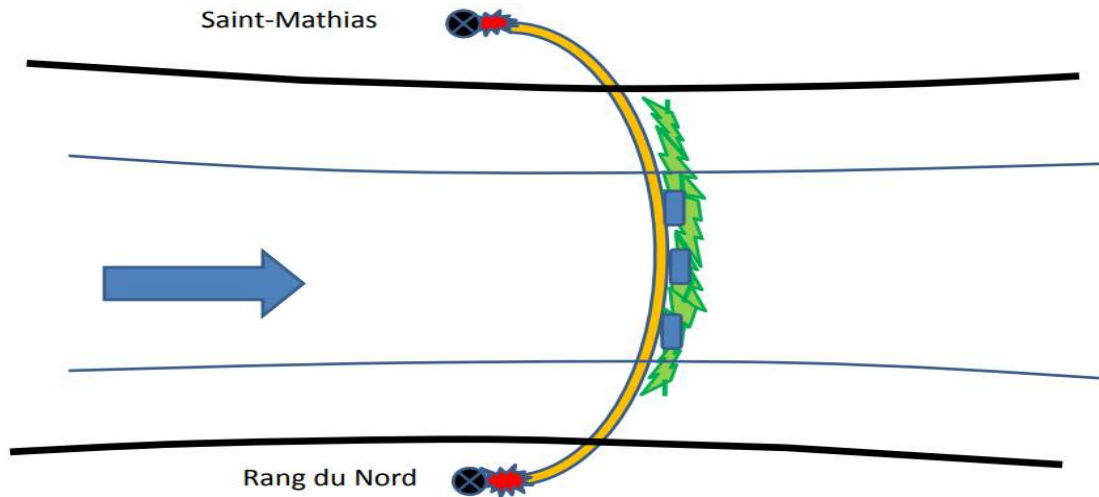


Schéma 1. Éléments de conception de l'estacade flottante sur la rivière Sainte-Anne au km 24: ancrages (noir), manilles y incluant maillon faible et chaînes (rouge), câble principal (jaune), conifères (vert), bouées de flottaison (bleu).

Les ancrages en acier (Photo 1) sont installés dans un forage dédié en rive et la liaison avec le terrain est obtenue par le coulage en place de béton afin de résister à une force de tension jusqu'à 90 tonnes. L'ancrage en rive droite (Rang du Nord; $47^{\circ} 0'31.22''N 71^{\circ}42'59.19''O$) n'a pas atteint le roc, mais sa profondeur permet de résister aux forces d'arrachement. L'ancrage de la rive gauche (Rang Saint Mathias; $47^{\circ} 0'29.62''N 71^{\circ}42'57.61''O$) atteint le roc. Les chaînes et manilles servent à attacher le câble principal aux ancrages. La manille simple (voir photo ici-bas) est un maillon faible qui, par son design, permet de rompre l'assemblage avant l'atteinte de la force maximale de conception et ainsi de conserver l'intégrité du câble et des ancrages.



Photo 1. Tête d'un ancrage de l'estacade (noir) avec maillon faible (gris) et manille (rouge) pour attacher la chaîne (noir foncé). (La présence de la pelle est là à des fins d'échelle.)

L'aménagement de l'estacade implique également l'attachement des conifères sur le câble qui doivent être renouvelés chaque année. Ces derniers permettent d'intercepter le frazil, non seulement à la surface, mais aussi à une profondeur qui correspond à la partie immergée des conifères y incluant ses branches. Des barils flottants constituent la dernière composante de l'estacade. Ils sont faits en polyéthylène de haute densité (PEHD) et permettent de compléter la flottaison de l'estacade (Figure 3; VSR, 2021). Cependant, lors de chaque crue ceux-ci sont arrachés et doivent être remplacés.

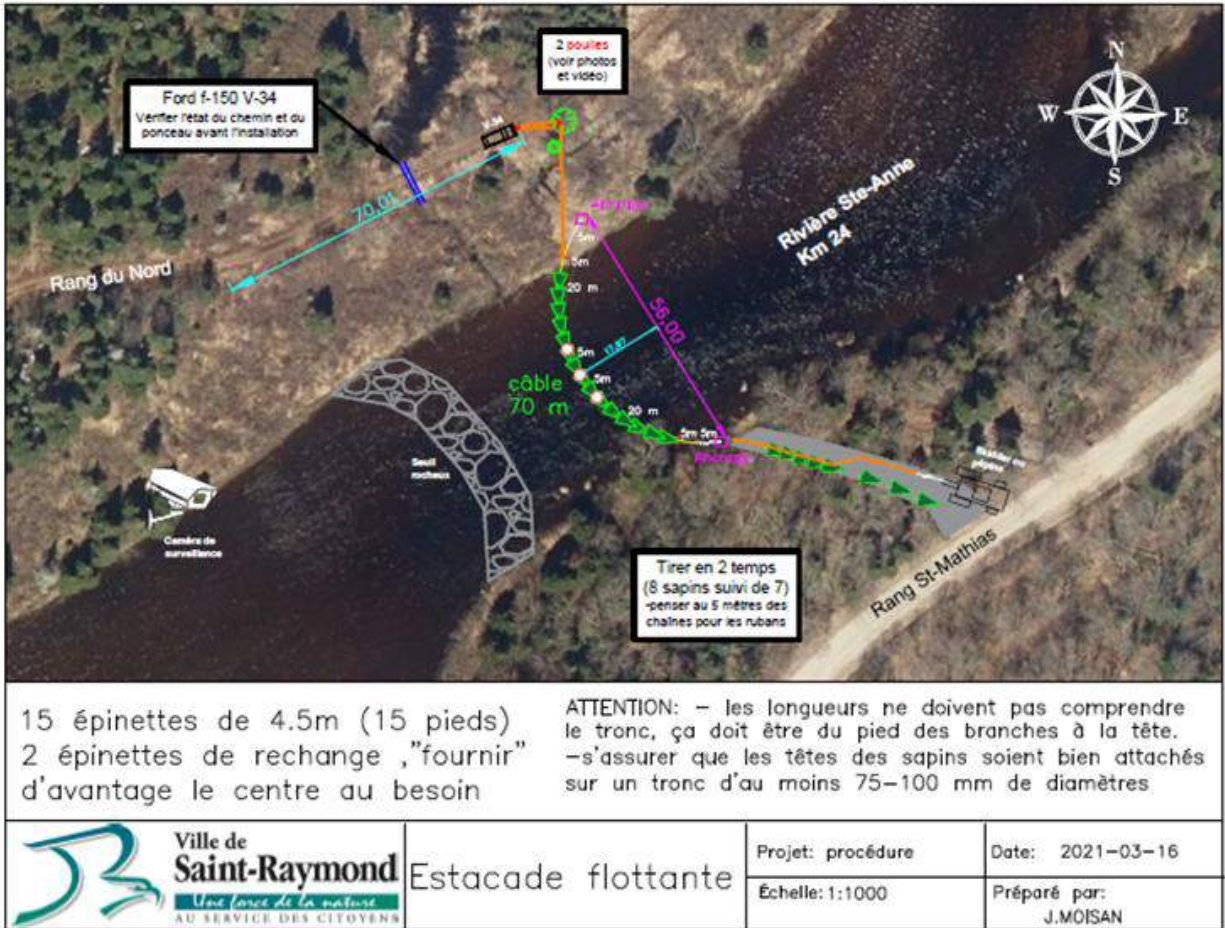


Figure 3. Schéma de référence pour orienter ceux qui font la pose annuelle de l'estacade à conifères.

À la suite des cinq derniers hivers, il a été constaté que la partie exondée du cordage subissait de l'abrasion sur les rives. Il faut donc enrouler les premiers mètres du cordage de manchons protecteurs pour contrer ce processus.

La mise en place de l'estacade flottante se fait chaque automne, idéalement dans la première moitié du mois de novembre, et est enlevée à chaque printemps, après la crue associée à la fonte des neiges. Suivant un protocole développé par l'EUL et perfectionné par la VSR, cette dernière forme, chaque année, une équipe pour l'installation sécuritaire de l'estacade flottante : un véhicule muni d'un treuil et une débusqueuse sont nécessaires afin de tirer les câbles d'une rive à l'autre (Figure 3, VSR, 2021).

Le tableau 1 (Lafleur, 2017) présente l'ensemble des coûts de l'estacade flottante. En additionnant environ 600\$ pour l'obtention du certificat d'autorisation environnementale

(CA), cette structure représente un investissement d'environ 52 000\$ en plus des 120 heures mises par Morse pour sa conception dans le cadre de ses activités de recherche. À cet investissement capital, s'ajoutent les coûts annuels pour le remplacement des arbres et des flotteurs perdus, ainsi que pour les coûts reliés à la pose, l'enlèvement et le stockage. La durée de vie du cordage est estimée à une quinzaine d'années selon la sévérité des événements. Il faut examiner l'estacade à chaque printemps afin de reconnaître les signes d'usure du cordage et l'entretenir et le remplacer au besoin.

Tableau 1. Analyse des coûts de l'estacade aux conifères du km 24 (Lafleur, 2017)

| Matériaux | | | | |
|--|-----------------------------|----------|-----------------|--|
| Objet | Prix par unité (\$/unité) | Unité | Prix total (\$) | |
| Cordage Polypropylène 1/2" | 45.06 | 1 | 45.06 | |
| Cordage Polypropylène 1" (par pieds) | 0.91 | 600 | 546 | |
| Corde Amsteel Blue (par pieds) | 1.05 | 200 | 210 | |
| Cable principal (D12 Plus 34 mm) avec cosses | 10520 | 1 | 10520 | |
| 60 mètres de sapins | 1236 | 1 | 1236 | |
| Barils | 20 | 4 | 80 | |
| Mousse isolante (bouteilles) | 8.5 | 12 | 102 | |
| Adapteur pour ancrages de chez Boivin | 500 | 2 | 1000 | |
| Manilles régulières | 201.16 | 2 | 402.32 | |
| Manilles faibles | 56.34 | 2 | 112.68 | |
| Chaines (par maillons) | 75.56 | 33 | 2493.48 | |
| Maillon de liaison | 213 | 4 | 852 | |
| Sous total (\$) | | 17599.54 | | |
| Main d'œuvre | | | | |
| Personne | Salaire horaire (\$/h) | Heures | Prix total (\$) | |
| Brian Morse | 0 | 120 | 0 | |
| Benoit Turcotte | 90 | 26 | 2340 | |
| Techniciens | 60 | 70 | 4200 | |
| Charlotte Lafleur | 13.74 | 18 | 247.32 | |
| Karine St. Gelais | - | | 1000 | |
| Secrétaires | - | | 1000 | |
| Claude Beaulieu | - | | 5000 | |
| Sous-traitance Cimota Inc. | - | | 19000 | |
| Sous-total (\$) | | 32787.32 | | |
| Équipement | | | | |
| Appareil | Coût (\$) | | | |
| Pelle mécanique | 1300 | | | |
| Débusqueuse | 800 | | | |
| Treuil | 2300 | | | |
| Sous-total (\$) | | 4400 | | |
| Déplacement | | | | |
| Location de voiture | Prix voiture/jour (\$/jour) | Unités | Prix total (\$) | |
| Surveillance des travaux | 70 | 13 | 910 | |
| Pose de l'estacade | 70 | 3 | 210 | |
| Sous-total (\$) | | 1120 | | |
| Total (\$) | | 51506.86 | | |

2.3.3.2 Seuil neigeux

Le concept original présenté au gouvernement pour l'obtention du CA incluait un seuil rocheux. Le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MELCC) avait des réserves sur l'impact du seuil sur l'habitat du poisson. Ce dernier fut donc temporairement mis de côté et le CA pour l'aménagement de l'estacade flottante fut octroyé.

Afin d'augmenter la portée de l'effet de l'estacade flottante au-delà du seuil naturel situé à environ 100 m en amont, l'aménagement d'un seuil neigeux a été testé à l'hiver 2017-18. Ce seuil était généré à l'aide d'un canon à neige portatif (de type HKD) (Figure 4, Ville de Saint-Raymond, 2017), utilisant l'eau de la rivière Sainte-Anne au site, qui permettait de produire plusieurs tonnes de neige par heure sur le couvert de glace nouvellement formé en amont de l'estacade. Cependant, après 2 hivers d'essais, l'EUL et la VSR ont conclu qu'il était trop coûteux et trop peu efficace; il devait faire froid pour assurer une production de neige optimale, mais ce froid affectait la pompe alimentant le canon.



Figure 4. Canon à neige utilisé pour créer un seuil neigeux (Ville de Saint-Raymond, 2017)

2.3.3.3 Seuil rocheux

En 2019, le concept du seuil rocheux a été resoumis au MELCC et cette fois, avec des explications additionnelles et des conditions rattachées (suivi sur trois ans pour le poisson), le CA a été accordé. Environnement Nordique a donc été mandaté de réaliser les travaux.

Le seuil possède une hauteur moyenne de 1 m et une hauteur de chute de 0.7 m. Sa forme en arche distribue les forces de la rivière sur les rives. Il est situé à environ 15 m en aval de l'arche de l'estacade (Figure 2). Il a été construit dans le lit mineur de la rivière et atteint une longueur de 60 m (Simard-Robitaille et coll., 2019 et Environnement Nordique, 2021). Les mégablocs rocheux formant la structure du seuil sont ancrés dans le lit de la rivière. Les plans tels que construits sont annexés à ce rapport (Annexe A).



Figure 5. Seuil rocheux aménagé sur la rivière Sainte-Anne à 18 km en amont du centre-ville. Vue vers la rive droite.

L'aménagement du seuil rocheux a coûté environ 358 600\$ (Tableau 2; Bélanger et coll., 2019). À cela, il faut ajouter un 5% pour des frais de gestion. Ainsi, le coût total de l'aménagement est d'environ 376 500 \$.

Une étude hydraulique a été effectuée par Simard-Robitaille et coll. en 2019 afin de bien comprendre les impacts du seuil sur le lit de la rivière. Pour des débits faibles en automne, il a été montré que cette structure générerait des vitesses de moins de 0,25 m/s et un nombre de Froude inférieur à 0,1 sur une distance de 700 m (Simard-Robitaille et coll., 2019), ce qui permet de maximiser les probabilités d'initier le couvert de la glace en présence de particules de frasil, puisque les conditions requises sont d'avoir une vitesse inférieure à 0,3 m/s et un nombre de Froude inférieur à 0,1.

Cette étude fut importante pour le design initial de la hauteur du seuil, mais sachant que les débits à l'automne sont très variables, que l'intensité du froid vient par vagues, que les tempêtes de neige varient d'une année à l'autre, que la distribution des vitesses

d'écoulement, de turbulence et de particules de frasil est un phénomène complexe, que la forme et grosseur des particules de frasil sont très variables, que l'impact des conifères sur l'écoulement ne se modélise pas, que leur efficacité à intercepter le frasil ne peut pas être connue à l'avance, l'EUL savait que la performance de l'estacade varierait d'une année à une autre et que c'est seulement avec les observations sur plusieurs années de la performance de l'E-S que les bénéfices de cet ensemble peuvent être découverts (voir section ici-bas).

Par ailleurs, puisque les vitesses moyennes d'écoulement sont plus basses en présence du seuil, cela favorise la déposition des sédiments dans la fosse (Simard-Robitaille et coll. 2019). D'ailleurs, à la suite de l'hiver 2020-21, un dépôt de sédiments, vraisemblablement associé à la crue du 25 décembre 2020, a été observé directement à l'amont du seuil.

Les travaux en rivière de l'aménagement du seuil ont débuté en novembre 2019. Toutefois, avec l'arrivée hâtive de l'hiver et à la suite d'une crue importante, il ne fut que partiellement complété avant le début de la prise des glaces. Les travaux ont été repris l'année suivante et ont été finalisés en juin 2020 (Figure 5).

Tableau 2. Coûts reliés à l'aménagement du seuil rocheux (sans les frais de gestion)

| Seuil rocheux au Km 24 (# 2300-0017) | | Montant |
|---|---|-------------------|
| | Plans et devis | 49 680 \$ |
| | Aménagement seuil rocheux | 89 239 \$ |
| | Surveillance des travaux | 22 247 \$ |
| | Aménagement d'une voie d'accès | 35 108 \$ |
| | Matériaux pour seuil rocheux | 93 520 \$ |
| | Ouvrier aquatique et sécurité | 15 786 \$ |
| | Compensation monétaire de milieux humides, demande C.A. | 21 502 \$ |
| | Suivi de la libre circulation du poisson | 19 669 \$ |
| | Végétalisation des aires de travail | 11 850 \$ |
| | | 358 602 \$ |

2.4 Impacts environnementaux

Afin de répondre à la demande de CA du MELCC, des études ont été faites pour bien comprendre l'impact de l'E-S sur l'écologie.

L'analyse écologique du km 24 a révélé qu'il n'y a aucune présence d'espèces vulnérables ou menacées dans la zone d'étude (Bélanger, 2019). Parmi les espèces importantes de la région, les poissons ont été un sujet discuté puisque le seuil modifie leur habitat. La valeur écologique des milieux humides retrouvés autour du km 24 est de 44% ce qui représente une valeur moyenne (Tableau 3; Bélanger, 2019). La superficie étant faible, l'absence d'espèce exotique envahissante ainsi que l'absence de fragmentation de l'habitat lui

Tableau 3. Synthèse des valeurs écologiques des milieux humides riverains (Bélanger, 2019)

| Paramètre | Valeur |
|--------------------------------------|----------------|
| Physique | |
| Superficie | 2 |
| Forme | 6 |
| Hydroconnectivité de surface | 8 |
| Capacité de rétention d'eau | 2 |
| Drainage | 2 |
| Fragmentation | 10 |
| Sous-total ramené sur 100 | 50 |
| Biologique | |
| Diversité | 6 |
| Espèces exotiques envahissantes | 10 |
| Représentativité régionale | 10 |
| Rareté relative | 0 |
| Présence d'espèces à statut (E.M.V.) | 0 |
| Sous-total ramené sur 100 | 43 |
| Social | |
| Projet de conservation | 4 |
| Activités récréatives | 4 |
| Perturbations | 8 |
| Sous-total ramené sur 100 | 40 |
| Total sur 100 | 44 |
| Indice de qualité d'habitat (1 à 3)* | 2 |
| Valeur écologique * | Moyenne |

* (1) faible 0-33 ; (2) moyenne 33-67 ; (3) élevée 67-100

attribuent ce pointage. Rien ne semble indiquer que la présence du seuil rocheux nuit à l'habitat (Simard-Robitaille et coll., 2019) en fait, sa présence pourrait même améliorer sa richesse (Bélanger 2019).

Le suivi du seuil doit se faire à chaque période hivernale afin de s'assurer de son efficacité et de son intégrité. Un suivi écologique sur les poissons, découlant d'une condition du CA du MELCC, a déjà été initié par Synergis. Cette étude s'étendra jusqu'à l'automne 2025, à raison de données collectées la première, troisième et la cinquième année, afin de s'assurer que les vitesses par-dessus le- seuil ne limitent pas la libre circulation des poissons lors de la période de montaison. Les résultats préliminaires montrent que la libre circulation du poisson n'est pas entravée par le seuil.

2. Bénéfices et performances

Le concept de l'estacade flottante munie de sapins fonctionne : c'est-à-dire qu'il réussit à former un couvert de glace rapidement en interceptant le frasil (Figure 6) lors des premiers froids. Les conditions hydrauliques particulières du site ont fait en sorte qu'un ralentissement des vitesses additionnel était nécessaire afin que le frasil ne transite plus vers l'aval. Au final, un seuil rocheux a été aménagé en aval de l'estacade.



Figure 6. Photo lors de la pose de l'estacade flottante le 9 décembre 2016. Le frasil est rapidement capté à l'estacade, mais il transitera sous le couvert quelques heures plus tard démontrant la nécessité de construire un seuil.

En 2019, avec le seuil rocheux partiellement construit, les conditions hydrométéorologiques ont été suffisamment favorables pour former un couvert de glace complet avant même la pose de l'estacade réalisée le lendemain (Figure 7). Il est à noter

que ces conditions hydrométéorologiques ne surviendront pas annuellement, ainsi la pose annuelle de l'estacade flottante est toujours nécessaire.



Figure 7. État de la couverture de glace lors de la pose de l'estacade flottante, le 14 novembre 2019 (Multimédias Région Portneuf, 2019).

L'hiver 2020-2021 était le premier hiver avec le système estacade-seuil complété avant le début de l'hiver. À la suite d'une légère chute de neige et d'une nuit à -10°C , le 18 novembre 2020, le couvert de glace était complet et le transport du frasil en aval du seuil avait cessé (Figure 8).



Figure 8. Couvert de glace respectivement le 17 novembre 2020 (A) et la journée suivante (B).
La figure 9 montre le fonctionnement du système de l'estacade-seuil, le 24 novembre 2020, soit 6 jours après la prise des glaces. En aval du seuil, la rivière s'écoule à l'eau libre, alors qu'à l'amont, un couvert de glace la recouvre complètement.



Figure 9. Vue aérienne de la prise des glaces en amont du seuil et en amont de l'estacade au km 24, le 24 novembre 2020, soit 12 jours après l'installation de l'estacade (Multimédias Région Portneuf, 2020). La flèche indique le sens de l'écoulement.

Lors des débâcles, le système E-S semble avoir retardé les glaces entre 0 et 120 minutes avant qu'elles ne transitent vers le centre-ville. Il serait nécessaire de continuer l'investigation par rapport à cet aspect, car cette dynamique demeure peu documentée à ce jour. Toutefois, il est intéressant de noter que les glaces n'ont pas été évacuées du km 24 lors de la débâcle printanière de 2021, elles ont plutôt fondu en place, bien après que les glaces aient été évacuées du centre-ville. Le débit associé à cet événement était de $160 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station hydrométrique de Chute-Panet (050408), soit un débit modéré qui est rarement associé à des inondations par embâcle au centre-ville VSR.

3. Constats

Le tableau 4 relate les performances de l'E-S en comparant également deux hivers où il n'y avait aucun aménagement.

4.1. Nombre de jours pour la formation du couvert de glace et l'arrêt du transport du frasil

Les premières années avec l'estacade (avec ou sans le seuil neigeux), le nombre de jours avant que le transport de frasil ne se termine était respectivement de 9, 32, 28 et 21. Cette performance (moyenne de 23 jours) ne répondait pas à l'objectif de former un couvert complet en seulement quelques jours.

Avec l'ajout du seuil rocheux (partiel ou complet), la formation complète est survenue en 1, 6, 7 et 10 jours. Cette performance (moyenne de 6 jours) répond bien à l'objectif, surtout si l'on considère que les 10 jours en 2020-21 faisaient suite à une crue historique (970 m³/s) et que les débits étaient très élevés pendant les premiers 4 jours suivants.

Cette moyenne de 6 jours est très inférieure à celle de 37 jours (25 jours en 2014-2015 et 48 jours en 2015-2016) prévalant en situation initiale sans aménagement. L'objectif initial de devancer l'hiver de 7 à 14 jours est ainsi démontré et atteint.

4.2. Débits

Les débits pour l'estacade seulement (avec seuil neigeux ou non) étaient de 18, 21, 16 et 27 m³/s pour une moyenne de 21 m³/s, ce qui est relativement faible. Une fois le seuil rocheux ajouté, ils étaient 36, 31, 44 et 41 m³/s, correspondant à une moyenne de 38 m³/s. Ces chiffres démontrent que l'aménagement E-S est performant pour une importante plage de débits incluant ceux qui sont associés à des automnes pluvieux. Ce résultat répond encore une fois à l'objectif souhaité d'avoir un couvert de glace qui se forme malgré des automnes pluvieux.

4.3. Degrés jours de gel

Du point de vue des degrés jours de gel nécessaires pour la formation du couvert de glace (incluant l'arrêt du transport de frasil) avec estacade seulement (seuil neigeux ou non), leurs totaux au cours des premiers hivers étaient 162, 197, 217, 223°C-J, correspondant à

une valeur moyenne de 200 DJGC. Après l'aménagement du seuil rocheux (partiel ou complet), ces valeurs étaient plutôt 49, 7, 14 et 65 pour une moyenne de 34 DJGC. Encore une fois, ce résultat correspond très bien à l'objectif, car chaque DJGC représente une quantité de frasil qui peut parvenir au centre-ville. Obtenir une condition hivernale aussi précoce en rivière représente un résultat considéré comme excellent.

4.4. Dégels hivernaux

Durant les hivers 2018-19 et 2020-21, il y a eu des dégels hivernaux durant lesquels les couverts de glace à l'amont de l'E-S furent détruits et emportés (Tableau 4). Durant ces événements, les conifères ont été abimés et leurs attachements au câble perturbés; ce qui devait théoriquement réduire l'efficacité de l'estacade.

Après le 22 décembre 2018 (avant la pose du seuil), le débit fut important (345 m³/s) et, avec une estacade abimée, il a fallu 21 jours pour que le débit tombe à 27 m³/s et il a pris 223 DJDG pour que le frasil arrête à nouveau son transit vers l'aval.

Après l'événement du 25 décembre 2020 (après la pose du seuil), le débit fut encore plus important (970 m³/s) et l'estacade fut très abimée. Malgré ces conditions extrêmes, ça ne pris que 10 jours pour que le transit du frasil arrête correspondant à seulement 65 DJDG malgré que le débit fût toujours relativement élevé (41 m³/s).

Après cet événement, la VSR a demandé à l'EUL si elle devrait enlever l'estacade et reposer à nouveau des conifères intacts. Notre recommandation fut de simplement repositionner les arbres existants (si possible), car il était de notre avis qu'avec la présence du seuil, l'estacade serait suffisamment efficace pour faire son travail et parce que nous croyions que c'était très difficilement réalisable.

Ces événements nous démontrent que la structure de l'estacade est assez forte pour résister à des événements très extrêmes et est assez bien équilibrée (pas trop de forces ponctuelles) pour ne pas casser lors du passage des blocs de glace. En même temps, malgré des arbres arrachés, dénudés et mal positionnés, l'estacade a maintenu une performance très élevée.

Tableau 4. Performance de la prise des glaces au km 24 selon les années d'observations

| Aménagements | | Installation de l'estacade flottante | | Période de prise des glaces (début et <u>fin du transport de frasil</u>) | | | | | Période de reprise des glaces, le cas échéant. (début et <u>fin du transport de frasil</u>) | | | | | |
|--------------|--------------|--------------------------------------|----------------------|---|------------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|--|---|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| <i>Hiver</i> | Aménagements | Date | Débit associé (m³/s) | Nombre de jours pour la prise de glace et la <u>fin du transport</u> | Débits associés (m³/s) | Couverture de glace (S5) correspondante (%) | DJGC correspondants (°C-j) | Neige cumulée équivalente en eau (mm) | Crue mobilisatrice: date; couverture (S5) et débit maximal | Nombre de jour pour la reprise de glace et la <u>fin du transport</u> | Débits associés (m³/s) | DJGC correspondants (°C-j) | | |
| 2014-15 | Aucun | - | - | <u>25</u> | <u>25</u> | <u>70</u> | <u>141</u> | <u>46</u> | | | | | | |
| 2015-16 | Aucun | - | - | <u>48</u> | <u>23</u> | <u>67</u> | <u>134</u> | <u>76</u> | | | | | | |
| 2016-17 | E | 2016-12-09 | 22 | -4*** / <u>9</u> | <u>23</u> / <u>18</u> | <u>42</u> / <u>77</u> | <u>43</u> / <u>162</u> | <u>35</u> | | | | | | |
| 2017-18 | E+N | 2017-11-14 | 48 | <u>4</u> / <u>32</u> | <u>35</u> / <u>21</u> | <u>0</u> / <u>75</u> | <u>22</u> / <u>197</u> | <u>50</u> | | | | | | |
| 2018-19 | E+N | 2018-11-13 | 53 | -2*** / <u>28</u> | <u>74</u> / <u>16</u> | <u>20</u> / <u>86</u> | <u>15</u> / <u>217</u> | <u>63</u> | 2018-12-22 100% 345 m³/s | | | | | |
| | E* | | | | | | | | Reprise des glaces : | | | <u>3</u> / <u>21</u> | <u>72</u> / <u>27</u> | <u>30</u> / <u>223</u> |
| 2019-20 | E+Sp | 2019-11-14 | 37 | -2*** / <u>1</u> | <u>41</u> / <u>36</u> | <u>43</u> / <u>45</u> | <u>24</u> / <u>44</u> | <u>18</u> | | | | | | |
| 2020-21 | E+Sc | 2020-11-12 | 38 | <u>6</u> / <u>6</u> ** | <u>31</u> / <u>31</u> | <u>0</u> / <u>14</u> | <u>0</u> / <u>7</u> | <u>13</u> | 2020-12-01 36% 355 m³/s | | | | | |
| | E+Sc | | | | | | | | Reprise des glaces : | | | <u>5</u> / <u>7</u> | <u>60</u> / <u>48</u> | <u>5</u> / <u>14</u> |
| | E+Sc | | | | | | | | 2021-12-25 72% 970 m³/s | | | | | |
| | E*+Sc | | | | | | | | Reprise des glaces : | | | <u>4</u> / <u>10</u> | <u>89</u> / <u>41</u> | <u>23</u> / <u>65</u> |

- Notes :
- S5 : bief visé pour la formation du couvert de glace par l'E-S (voir figure 1b).
- *** valeur négative implique la prise des glaces fut réalisée naturellement des jours avant même la pose de l'estacade
- E = Estacade posée; N = Seuil de neige construit; Sp = Seuil de roche partiel; Sc = Seuil de roche complété; E* = Conifères partiellement endommagés après une crue
- DJGC = Degrés jours de gel cumulé (°C-j)
- La fin du transport signifie qu'à partir de cette date, le frasil n'était plus transporté vers l'aval du seuil du km 24. Les données correspondantes ont été soulignées.
- Débits sont ceux mesurés à Chute-Panet (station 050408); couverture de glace est celle dans le bief S5 (voir Figure 2)
- ** N.B. Un passage de drone le 24 novembre 2020 (soit 12 jours après l'installation de l'estacade) confirme l'étendue du couvert de glace à l'amont sur au moins 1 km.

5. Conclusion et recommandations

La combinaison d'infrastructures durables, soit l'estacade flottante à sapins et le seuil rocheux, coupe la période de transit de frasil en moyenne de 31 jours (la performance précise d'une année à l'autre dépend des conditions hydro-météorologiques). En conclusion, l'E-S répond bien à l'objectif souhaité soit de réduire le transport de frasil vers le centre-ville durant les périodes critiques, soit au début de l'hiver et à la suite des débâcles hivernales. En fait, sa performance dépasse toutes nos attentes vis-à-vis la réduction du transport de frasil.

De plus, lors de la débâcle, le couvert de glace formé par l'E-S a semblé freiner la débâcle et ainsi déphaser les vagues d'eau et de glaces qui transitent vers le centre-ville. En effet, lors de la débâcle de 2021, les glaces ont même été retenues en amont de l'ouvrage alors que la section du centre-ville était libre de glace.

L'EUL recommande donc :

- de continuer à poser l'estacade flottante chaque automne, à effectuer son entretien, à compiler annuellement des statistiques de performance (date de pose, date d'initiation d'interception du frasil, date de formation complète d'un couvert de glace, date de l'arrêt du transit de frasil, date de la mobilisation du couvert en amont de l'estacade, date du départ complet des glaces) ;
- de continuer la recherche afin de bien documenter les débâcles au km 24 afin de quantifier le déphase du train de glace de l'onde de débit et l'impact de cette déphase sur les effets en aval ;
- d'évaluer les impacts potentiels sur la faune jusqu'en 2025 tel que requis par le CA du MELCC ; et
- de retirer les débris ligneux appuyés sur le seuil et d'inspecter sa structure annuellement.

La présence d'une station d'observation de la rivière en temps réel, présentement installée en aval du site, peut grandement contribuer à ces suivis. Finalement, afin d'assurer une

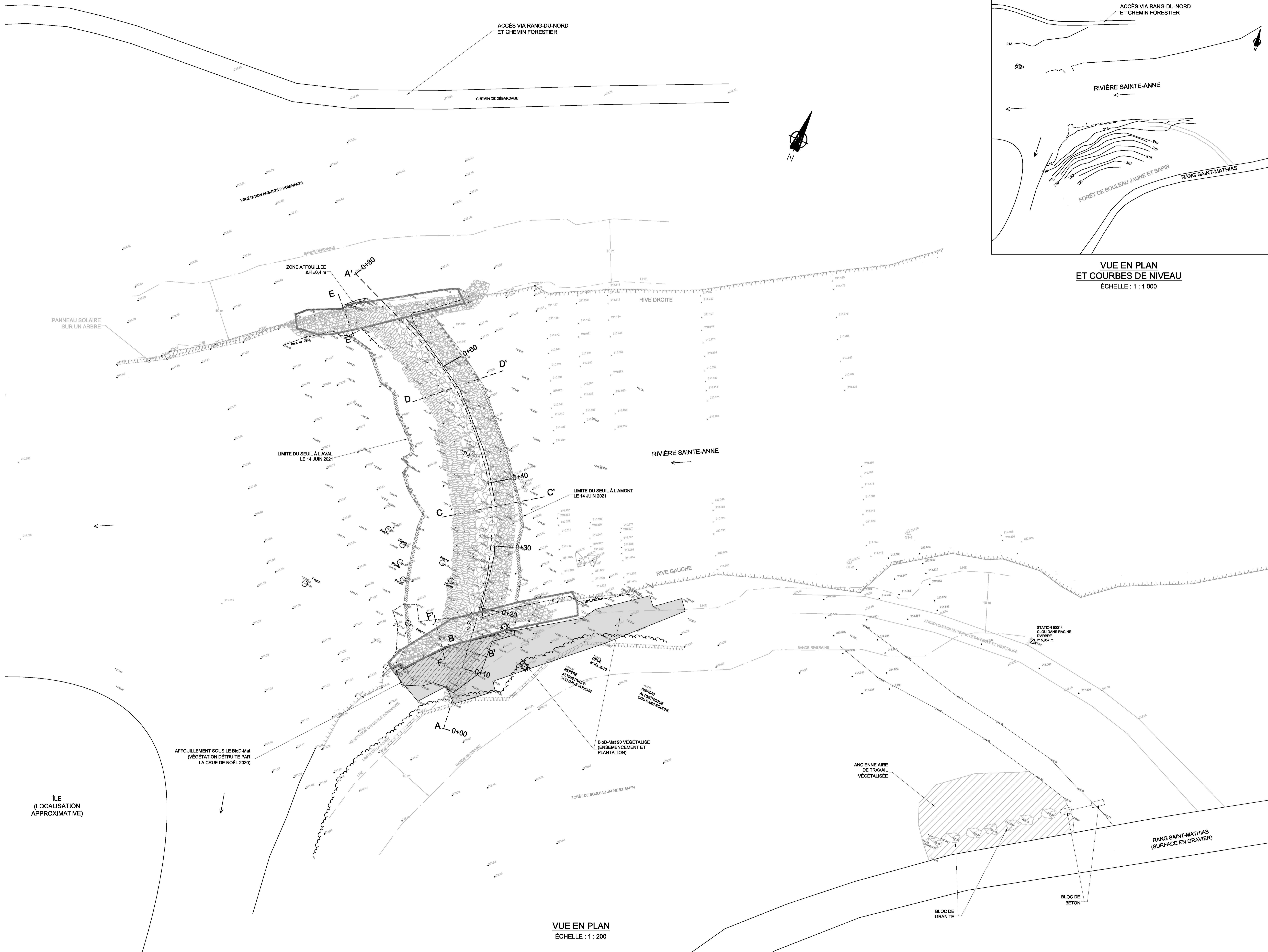
surveillance constante de l'E-S en lien avec son opérationnalité, l'implication d'un expert serait aussi de mise.

Bibliographie

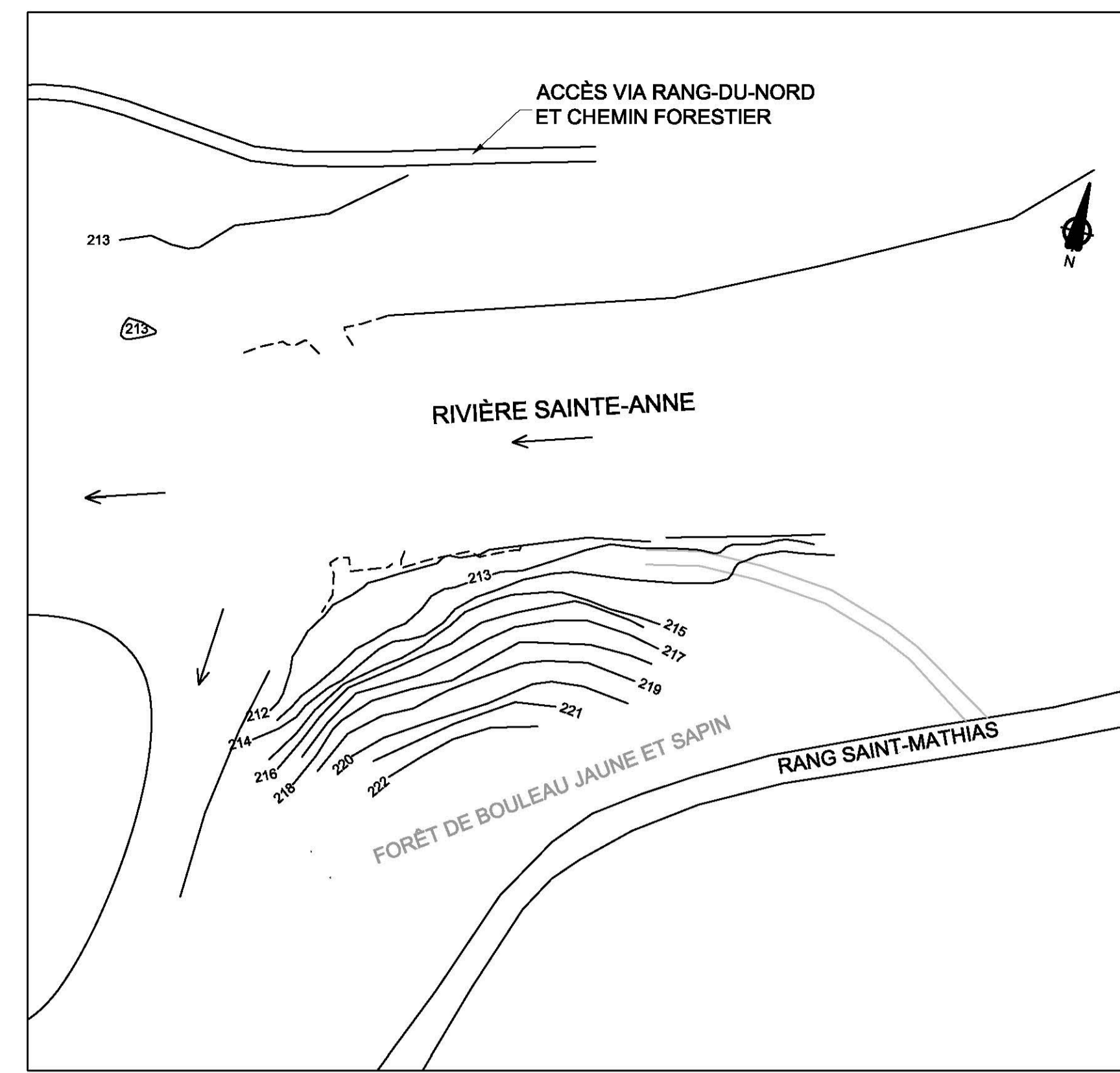
- Ashton, G. D. 1983. Frazil ice. In Theory of dispersed multiphase flow (pp. 271-289). Academic Press.
- Bélangier, S., Beaulieu, C. et T. Simard-Robitaille. 2019. Diminution des risques d'inondation : mesures d'atténuation au centre-ville de Saint-Raymond. Rapport présenté par Environnement nordique inc. à la Ville de Saint-Raymond, Québec, 43 pages + 2 annexes
- Bélangier, S. et A. Desrosiers. 2019. Étude écologique du site du km 24 de la rivière Sainte-Anne. Rapport présenté par Environnement nordique à la ville de Saint-Raymond, Québec, 26 pages + 4 annexes.
- Edie, E., Clark, S., Dow, K., 2021. Hydraulic effect of an Ice boom in Ice-Free Conditions. 21st CGU-HS CRIPE Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Saskatoon, SK.
- Gooch, G. (1996). Effects of ice boom geometry on ice capture efficiency. Cold regions research and engineering laboratory Hanover NH.
- Lachance, N. 2014. Résidents jetés à la rue à Saint-Raymond. Le journal de Montréal. (en ligne) Récupéré à <https://www.journaldemontreal.com/2014/04/16/residents-jetes-a-la-rue-a-saint-raymond>
- Lafleur, C., Morse, B. 2017. Rapport de construction : estacade flottante. Rapport technique présenté à la Ville de Saint-Raymond. Université Laval. 18 pp.
- Larousse. 2021. Définition du mot : Frasil (n.masc.). (en ligne), récupéré à <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/frasil/35105>
- Liddiard, A. Abdelnour, R. Tremblay, R-M. Quach T.T. et Morse, B. 2002. Design and monitoring of a prototype ice boom for use in an area of high current velocity. In IAHR Proceedings of the 16th International Symposium on Ice—Ice in the Environment (Vol. 1, pp. 211-219). Dunedin, NZ.
- Martin J. 2009. Saint-Raymond prend les grands moyens pour prévenir les inondations. Le Soleil. (En ligne) Récupéré à <https://www.lesoleil.com/actualite/en-region/saint-raymond-prend-les-grands-moyens-pour-prevenir-les-inondations-bd723fbdd6e87c40ec464e397ae9e517> .

- Morse, B., Turcotte, B. 2014. Réduction du risque d'inondations causées par les glaces de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond – Phase I : Identification des mesures possibles. Rapport présenté à la Ville de Saint-Raymond et à l'Organisme de bassin versant des rivières Sainte-Anne, Portneuf et du secteur de la Chevrotière (CAPSA). 108 pages
- Morse, B., Turcotte, B. 2015. Évaluation des bénéfices et de la faisabilité technique de l'installation d'estacades flottantes sur la rivière Sainte-Anne. Rapport technique présenté à la Ville de Saint-Raymond, novembre 2016, 20 pp.
- Perrault, N., Sirois, C., Dufour, P. 2015. Portrait historique et des enjeux associé aux inondations. Organisme de bassin versant des rivières Sainte-Anne, Portneuf et du secteur de la Chevrotière (CAPSA). Rapport présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) pour le Cadre de prévention de sinistre inondation. 63 pages.
- Simard-Robitaille, T., Morse, B., Beaulieu, C., 2019. Étude hydraulique de l'aménagement d'un seuil avec estacade flottante sur la rivière Sainte-Anne dans le secteur du km 24, rapport présenté au ministère de la Sécurité publique par Environnement Nordique, le 7 août 2019. 25 pp.
- Simard-Robitaille, T., Turcotte, B., Morse, B. 2021. Réduction du risque relié aux inondations à Saint-Raymond– Phase II; analyses des rendements de la machinerie et des moyens d'affaiblir le couvert de glace ainsi que la justification économique des moyens analysés. Rapport présenté au ministère de la Sécurité publique dans le cadre du contrat CPS-18-19-02. Université Laval, Québec. 3 pp + 1 annexe.

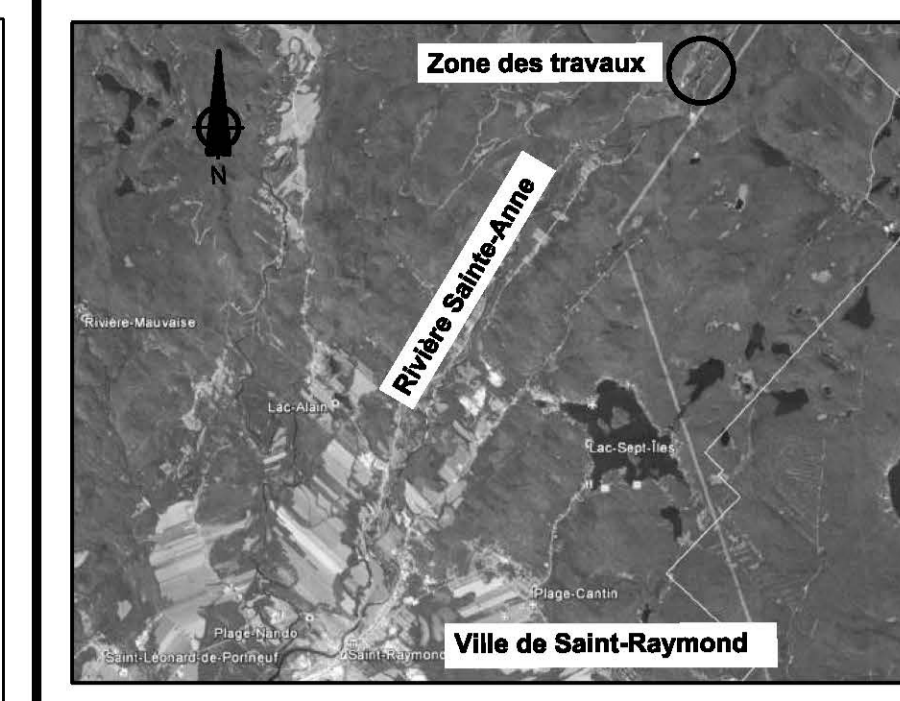
Annexe A – Plans du seuil rocheux tel que construit



VUE EN PLAN
ÉCHELLE : 1 : 200



VUE EN PLAN
ET COURBES DE NIVEAU
ÉCHELLE : 1 : 1 000



LOCALISATION

LÉGENDE POUR CONSTRUCTION

- ← Direction de l'écoulement
- LHE — Ligne des hautes eaux
- Bande riveraine de 10 m
- Haut de talus existant
- Bas de talus existant
- Bloc existant dans la rivière
- ⊙ Sapin
- Limite de la forêt
- Ligne de chéage
- ST-1 Station d'apertage sur un bloc rocheux

LÉGENDE SELON RELEVÉ
DU 14 JUIN 2021
(11 mois après les travaux)

- Bord de l'eau à ± 14 m³/s (selon débit à Chute-Panet)
- Limite de l'enrochement du seuil
- Limite de l'enrochement en rive

| REVISIONS | | | | |
|-----------|----|----|--|------|
| 21 | 06 | 22 | Plan final - 11 mois après la construction | S.B. |
| 19 | 10 | 07 | Pour construction | S.B. |
| 19 | 07 | 31 | Pour autorisations | S.B. |

CONSULTANT: **ENK** Environnement Nordique inc.
Environnement Nordique inc.
290, rue des Cormorans,
Lévis (Québec) G7A 3A1
Tél: 418-336-8336
Cell: 418-929-4135

APPROUVÉ PAR: **Claude Beaulieu, Ing.** **Simon Bélangier, T.P.**

CLIENT: **Ville de Saint-Raymond**
LE SERVICE DES CITOYENS

PROJET: **Aménagement d'un seuil dans la rivière Sainte-Anne au nord-est de Saint-Raymond - Vue en plan et localisation -**

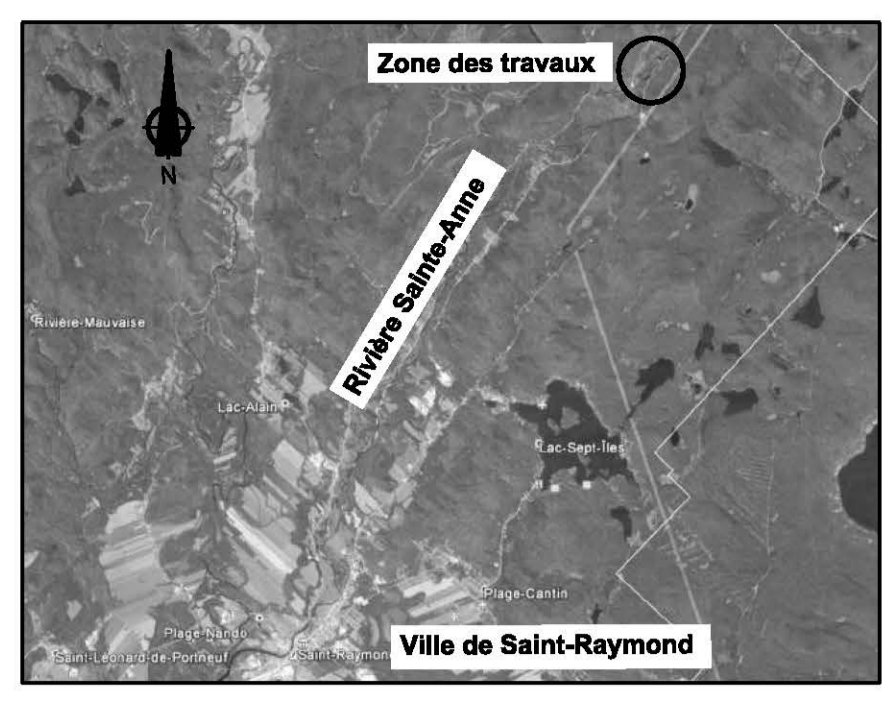
ÉCHELLE: **SI** SYSTEME INTERNATIONAL D'UNITÉS

CONCEPTION: **Claude Beaulieu, Ing.**
Simon Bélangier, T.P., géomorphologue

DESSINÉ: **André Letellier, tech.**

DATE: **22 JUIN 2021**

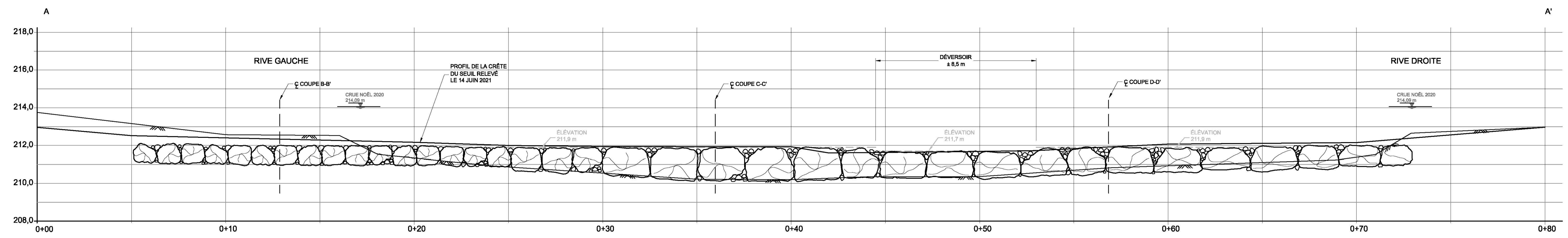
PROJET NO: **EN 19-259**



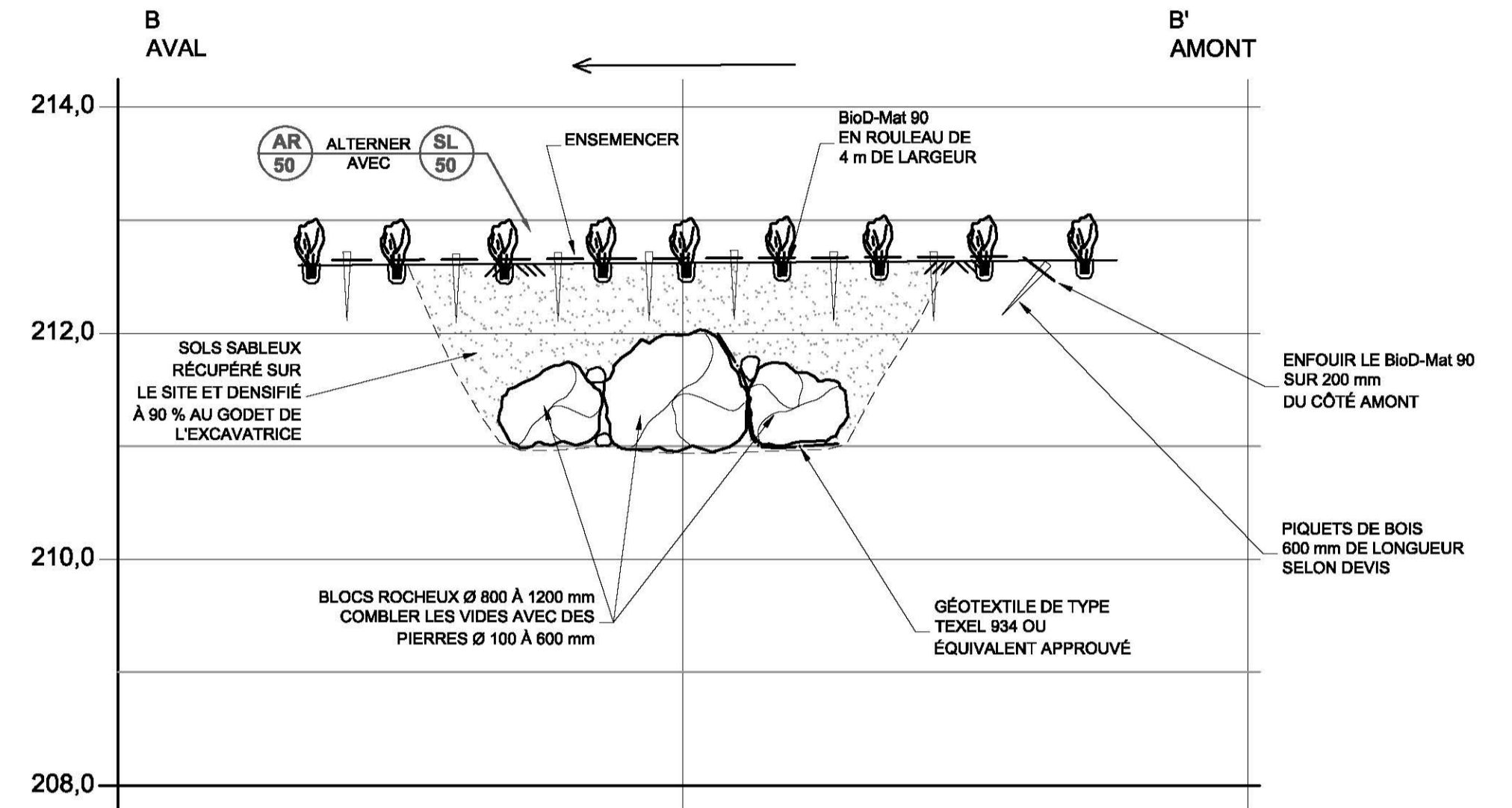
LOCALISATION

LÉGENDE POUR CONSTRUCTION

- Surface du sol ou du lit existant
- Espace à planter
Nb de plants



PROFIL A-A' VUE VERS L'AVAL
ÉCHELLE : 1 : 100

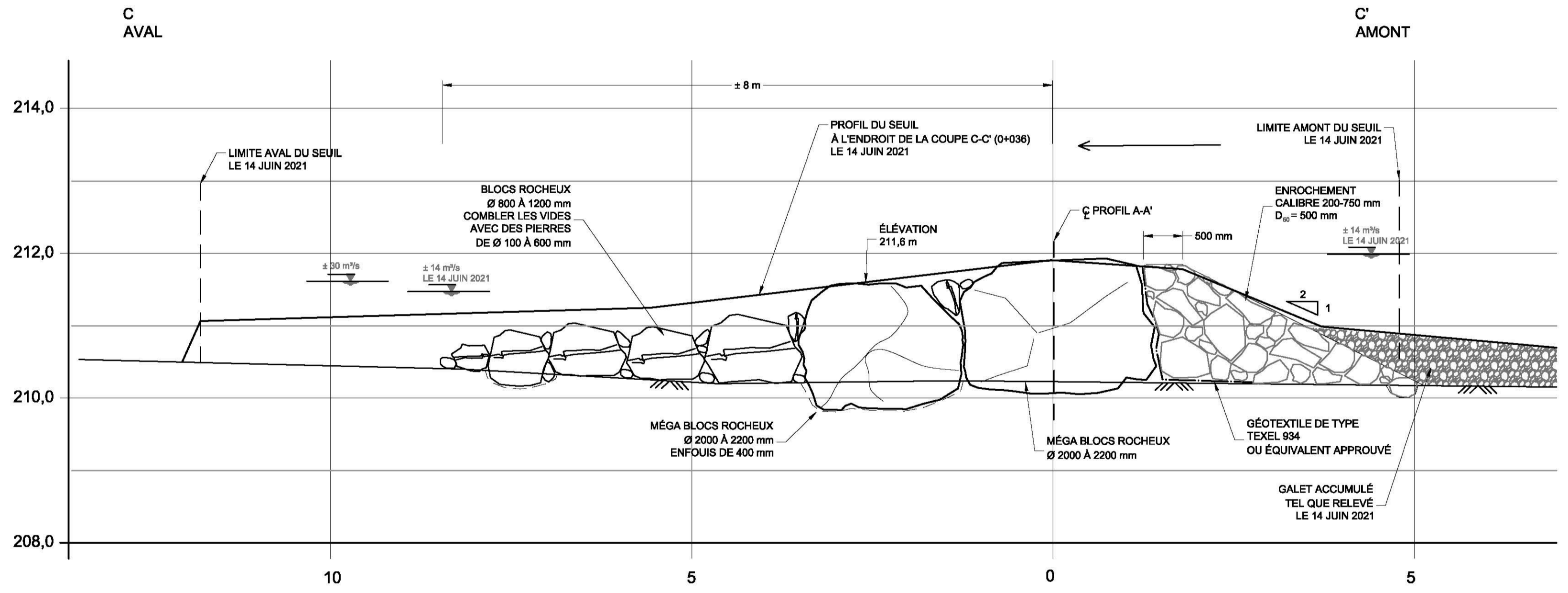


COUPE B-B' VUE VERS LE NORD
APPLIQUER AUX CHÂINAGES 0+04 À 0+16
ÉCHELLE : 1 : 50

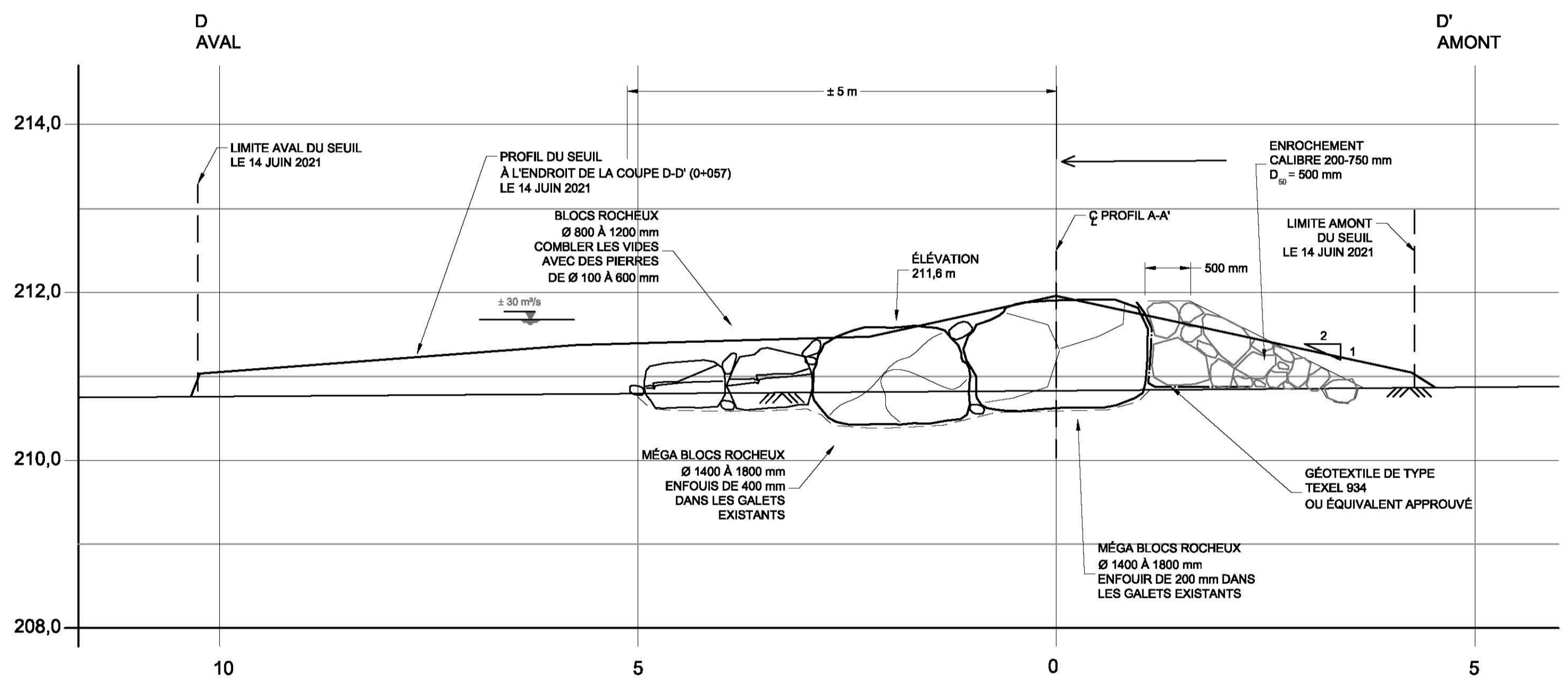
Tableau de plantation

| Code | Nom scientifique (nom français) | Hauteur cm | Distance c/c cm | Calibre | Quantité |
|------------------------------|---|------------|-----------------|----------|----------|
| Arbustes à feuilles caduques | | | | | |
| AR | Alnus rugosa (alêne rugueuse) | 25-40 | 100 | 1 gallon | 90 |
| SL | Spirea latifolia (spirea à larges feuilles) | 25-40 | 100 | 1 gallon | 90 |

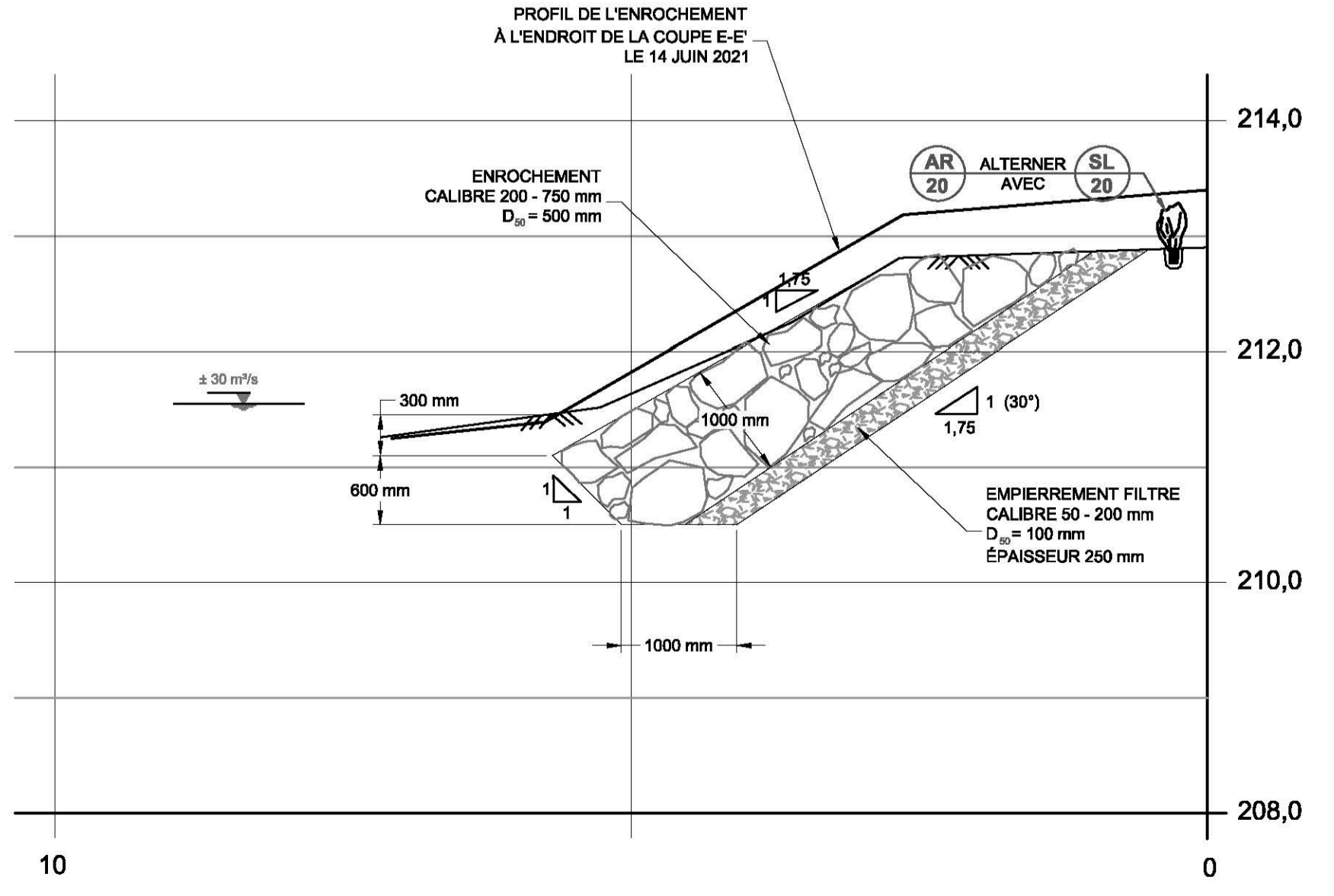
Note : Les quantités supplémentaires non indiquées au plan seront localisées sur le site par le surveillant.



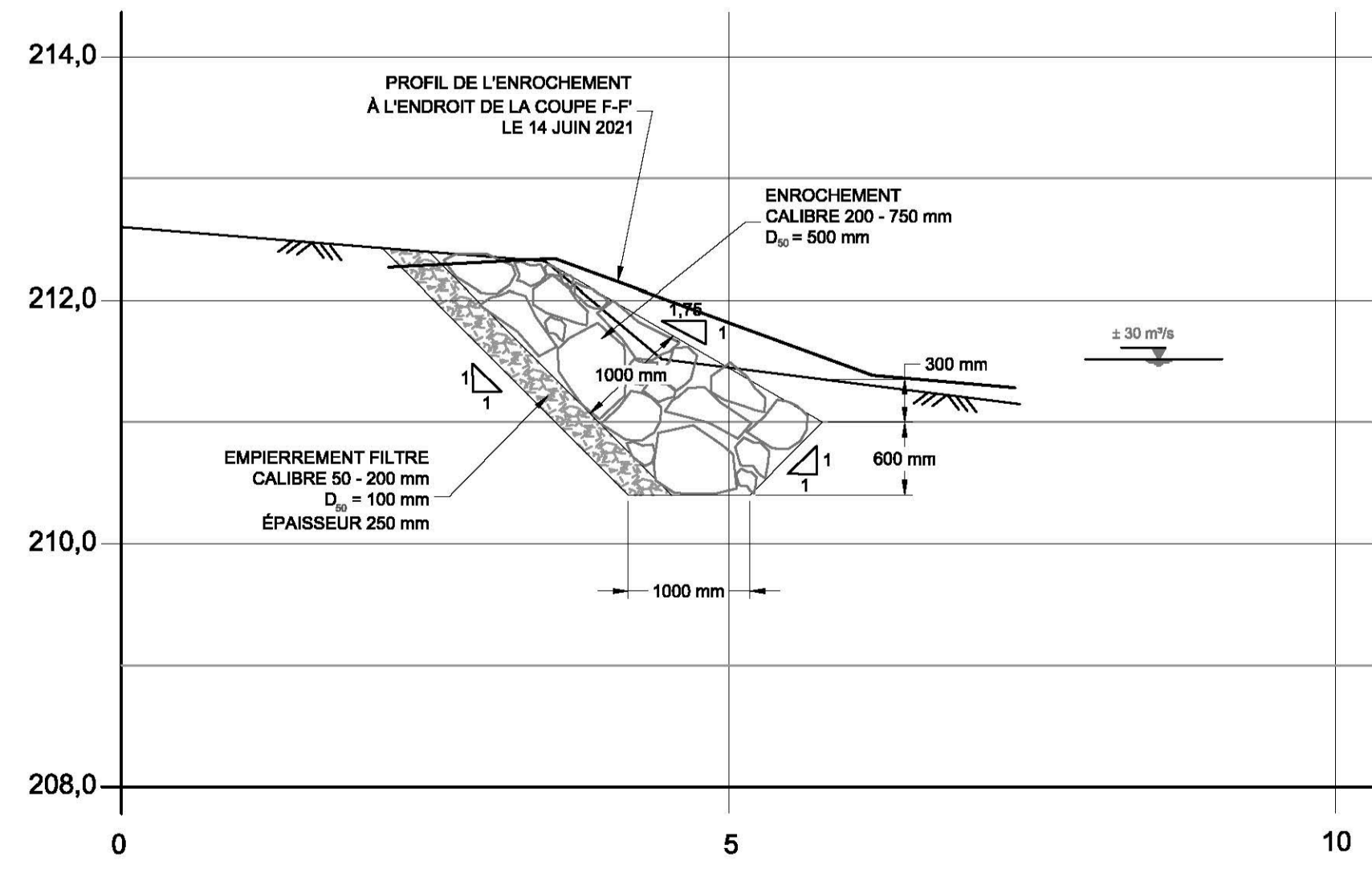
COUPE C-C' VUE VERS LE NORD-OUEST
AVEC DONNÉES DU 14 JUILLET 2021
ÉCHELLE : 1 : 50



COUPE D-D' VUE VERS LE NORD-OUEST
AVEC DONNÉES DU 14 JUILLET 2021
ÉCHELLE : 1 : 50



COUPE E-E' VUE VERS L'AVANT
ENROCHEMENT EN RIVE DROITE
ÉCHELLE : 1 : 50



COUPE F-F' VUE VERS L'AVANT
ENROCHEMENT EN RIVE GAUCHE
ÉCHELLE : 1 : 50

- NOTES :
- 1- Prévoir des vêtements isothermiques ("dry suit") appropriés pour les travaux dans l'eau.
 - 2- Un dispositif de lestage attaché avec de la corde facilité la mise en place du géotextile dans l'eau en présence du courant.

REVISIONS

| Date | Description | Statut |
|----------|--|--------|
| 21 06 22 | Plan final - 11 mois après la construction | S.B. |
| 19 10 07 | Pour construction | S.B. |
| 19 07 31 | Pour autorisations | S.B. |

CONSULTANT: **IENK** Environnement Nordique Inc.
280, rue des Comtoises, Lévis (Québec) G7A 3A1
Tél: 418-838-8335
Cél: 418-829-4135

APPROUVÉ PAR: **Claude Beaulieu, Ing.** **Simon Bélandier, T.P.**

CLIENT: **Ville de Saint-Raymond**
BUREAU D'AMÉNAGEMENT URBAIN

PROJET: **Aménagement d'un seuil dans la rivière Sainte-Anne au nord-est de Saint-Raymond - Profil, coupes et tableau de plantation -**

ÉCHELLE: **INDIQUÉE** **SI** SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS

CONCEPTION: **Claude Beaulieu, Ing.** **Simon Bélandier, T.P., géomorphologue**

DATE: **22 JUILLET 2021**

PROJET NO: **EN 19-259**