

# Bilan des interventions de réduction des risques d'inondation à Saint-Raymond de 2016 à 2023

Volets financés par le ministère de la Sécurité publique

Rapport présenté à la :



Mai 2025

Projet 23-0292





# Bilan des interventions de réduction des risques d'inondation à Saint-Raymond de 2016 à 2023

Volet financé par le ministère de la Sécurité publique

Rapport n° 23-0292 présenté à la :

**Ville de Saint-Raymond**

Par :

**Environnement Nordique**



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



Thomas S. Robitaille, M.Sc., ing.  
Hydraulique et dynamique des glaces



Claude Beaulieu, ing.  
Hydraulique fluviale

**Environnement Nordique inc.**

1689, rue du Marais

Québec (Québec) G1M 0A2

418-836-8335

[www.synergis.ca](http://www.synergis.ca)

2 mai 2025

## ÉQUIPE DE RÉALISATION

---

Direction du projet	Claude Beaulieu, ingénieur en hydraulique fluviale
Analyse et rédaction	Simon Bélanger, T.P., M.A., géomorphologue Thomas S. Robitaille, ing., M.Sc, hydraulique et glace
Cartographie	Sophie Savard, géographe Gisèle Milette, M. Sc., géographe et géomaticienne

On devra citer le rapport comme suit :

BÉLANGER, S., T. SIMARD-ROBITAILLE et C. BEAULIEU. 2025. Bilan des interventions de réduction des risques d'inondation à Saint-Raymond de 2016 à 2023. Rapport n° 23-0292 présenté par Environnement Nordique inc. à la Ville de Saint-Raymond, Québec, 137 pages.

## SOMMAIRE

---

Le projet de réduction des risques d'inondation (RRI) par la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond fait suite à la volonté citoyenne, en 2014, d'investiguer leur rivière afin de ne plus revivre des inondations aussi importantes que celles vécues lors des printemps 2012 et 2014. L'événement de 2014, à lui seul, aurait causé des dommages de plus de 9 M\$. Les citoyens et les élus ont formé le Comité Rivière qui a mandaté l'équipe de Brian Morse de l'Université Laval. Forts des résultats encourageants de la recherche sur un tronçon de plus de 32 km, le ministère de la Sécurité publique est venu soutenir les efforts de RRI via le CPS : les aléas touchant à la fois des enjeux à l'eau libre et d'obstructions majeures de l'écoulement par le frasil et les embâcles de glace.

Entre 2016 et 2023, **12 interventions** ont été réalisées autant dans la rivière, sur les rives qu'en matière de prévention. Les principaux objectifs visaient à raccourcir la période de formation du couvert de glace, ralentir leur transport en amont de la ville et faciliter l'évacuation de l'eau et des glaces jusqu'au barrage de Chute-Panet (PK 0). En plus de l'affaiblissement préventif du couvert sur environ 2 km entre la confluence de la rivière Bras du Nord et le centre-ville, le « bouquet » de solutions intègre un système d'alerte précoce, la stabilisation de rives perturbant l'équilibre sédimentologique, l'aménagement d'une estacade flottante et d'un seuil au PK 24, la protection du centre-ville (digues et clapets anti-refoulement), le retrait des caissons pour la drave ainsi que le dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond (PK 6,1), sa gestion lors de la formation initiale du couvert combiné à l'aménagement d'un système de retenue des glaces au PK 10,5. La résilience des interventions réside en leur nombre et leurs fonctions propres attirées pour performer selon différents scénarios d'aléas.

Ces solutions ont permis de **réduire le dommage moyen annuel (DMA) de plus de 60 % depuis 2014**, justifiant leur rentabilité. À lui seul, le tandem seuil – estacade a permis d'épargner plus de 350 000 tonnes de glace lors des hivers 2022-23 et 2024-25, soit 3 fois la limite de vulnérabilité du tronçon voisin du centre-ville. Les crues extrêmes vécues en décembre 2020 et 2023, à plus de 970 m<sup>3</sup>/s, ont sollicité certains dispositifs de protection rénovés en 2020 au centre-ville (digues et clapets) et en aval (enlèvement des caissons). Sans ces solutions, l'inondation subie aurait été aggravée. Les données du système d'alerte précoce appuient ces observations, corroborées par un ingénieur expert en dynamique des glaces.

Le dragage du réservoir au PK 6,1 ajouté à l'opération des vannes ont permis d'améliorer les conditions favorables à la formation du couvert. Une gestion dynamique du réservoir complétée par l'installation d'une estacade flottante améliorerait significativement son rendement, en permettant, d'abord, au centre-ville de se libérer de ses glaces jusqu'à Chute-Panet avant la débâcle en amont.

## TABLE DES MATIÈRES

---

LISTE DES FIGURES .....	v
LISTE DES CARTES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX .....	ix
LISTE DES ACRONYMES .....	x
1.0 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte et objectifs .....	1
1.2 Localisation .....	2
2.0 HISTORIQUE DES INONDATIONS .....	5
3.0 INTERVENTIONS RÉALISÉES.....	7
3.1 Affaiblissement du couvert de glace .....	7
3.1.1 Fonctions recherchées .....	7
3.1.2 Description .....	8
3.1.3 Travaux.....	9
3.1.4 Aspects environnementaux .....	12
3.1.5 Suivi et efficacité .....	12
3.2 Système d'alerte précoce et instrumentation des cours d'eau .....	14
3.2.1 Fonctions recherchées .....	14
3.2.2 Description .....	14
3.2.3 Installation.....	19
3.2.3 Suivi et efficacité .....	20
3.3 Stabilisation de la rive gauche entre les PK 7,1 et 6,7 .....	21
3.3.1 Description .....	21
3.3.2 Travaux.....	22
3.3.3 Aspects environnementaux .....	24
3.3.4 Suivi et efficacité .....	26
3.4 Estacade flottante au PK 24 .....	26
3.4.1 Fonctions recherchées .....	26
3.4.2 Choix du site .....	27
3.4.3 Description .....	27
3.4.4 Travaux.....	29
3.4.5 Aspects environnementaux .....	32
3.4.6 Suivi et efficacité .....	32
3.5 Seuil de blocs rocheux au PK 24.....	34
3.5.1 Fonctions recherchées .....	34
3.5.2 Description .....	35

3.5.3	Travaux .....	36
3.5.4	Aspects environnementaux .....	39
3.5.5	Suivi et efficacité .....	41
3.6	Enlèvement de caissons de drave en aval .....	50
3.6.1	Fonctions recherchées .....	50
3.6.2	Description .....	51
3.6.3	Travaux .....	53
3.6.4	Aspects environnementaux .....	55
3.6.5	Suivi et efficacité .....	56
3.7	Stabilisation du talus riverain et reconstruction de la digue vers le PK 5,4 .....	56
3.7.1	Fonctions recherchées .....	56
3.7.2	Description .....	57
3.7.4	Aspects environnementaux .....	63
3.7.5	Suivi et efficacité .....	64
3.8	Dispositif anti-refoulement de la rue Jacques-Labranche au PK 6,05.....	66
3.8.1	Fonctions recherchées .....	66
3.8.2	Description .....	66
3.8.3	Travaux .....	68
3.8.4	Suivi et efficacité .....	69
3.9	Reconstruction de l'émissaire de la rue Saint-Hubert au PK 4,9.....	70
3.9.1	Fonctions recherchées .....	70
3.9.2	Description .....	71
3.9.3	Travaux .....	71
3.9.4	Aspects environnementaux .....	74
3.9.5	Suivi et efficacité .....	74
3.10	Inspection et défrichage des digues .....	75
3.10.1	Fonctions recherchées .....	75
3.10.2	Description .....	76
3.10.3	Observations à l'inspection .....	78
3.10.4	Travaux .....	80
3.10.5	Aspects environnementaux .....	81
3.10.6	Suivi et efficacité .....	81
3.11	Dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond (PK 6,15 à 6,35) .....	81
3.11.1	Fonctions recherchées .....	81
3.11.2	Description .....	82
3.11.3	Travaux .....	84
3.11.4	Aspects environnementaux .....	86

3.11.5	Suivi et efficacité .....	87
3.12	Système de retenue des glaces au site du PK 10,5 (SRG).....	91
3.12.1	Fonctions recherchées .....	91
3.12.2	Critères de conception du SRG sur la rivière Sainte-Anne .....	92
3.12.3	Description .....	94
3.12.4	Travaux .....	96
3.12.5	Aspects environnementaux .....	102
3.12.6	Suivi et efficacité .....	103
4.0	AUTRES MESURES MISES EN ŒUVRE .....	114
4.1	Comité Rivière.....	114
4.2	Repères de crue.....	114
4.3	Déménagement du poste de pompier et de sauvetage.....	115
5.0	RÉDUCTION DU DMA ET SYNTHÈSE DES COÛTS .....	117
5.1	Mise en contexte .....	117
5.2	Nature des aléas en lien avec le DMA et risque .....	117
5.3	Évolution du DMA avec les interventions déjà réalisées .....	117
5.4	Synthèse des coûts par activité .....	118
6.0	SUVIS ET ENTRETIENS .....	121
6.1	Entretiens et frais récurrents .....	121
6.2	Entretiens probables et suivis à anticiper .....	121
7.0	POURSUITE DU PROJET .....	122
7.1	Gérer la glace et le frasil en amont .....	122
7.2	Gérer l'eau et la glace en aval .....	123
7.3	Aménager une centrale hydroélectrique à Chute-Panet .....	125
7.4	Augmenter l'espace de liberté de la rivière.....	126
8.0	RETOUR SUR EXPÉRIENCE .....	127
8.1	Gestion du projet.....	127
8.2	Aspects techniques .....	128
8.3	Transfert de données à INFO-Crue du MELCCFP .....	129
9.0	CONCLUSION .....	130
10.0	RÉFÉRENCES.....	132

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Inondation du secteur nord de Saint-Raymond par un embâcle sur la rivière Bras du Nord le 19 décembre 2023. ....	6
Figure 2 : Accumulation précoce de frasil dans la rivière Sainte-Anne le 15 novembre 2018 .....	8
Figure 3 : Règle de mesure de l'épaisseur de la glace / frasil fabriquée par les employés de la Ville. ....	9
Figure 4 : Mesure des épaisseurs de la glace et du frasil sur la rivière Sainte-Anne, le 13 janvier 2019.....	9
Figure 5 : Excavatrice conventionnelle travaillant à partir de la rive gauche, le 19 mars 2015. ....	10
Figure 6 : Amphibex sur la rivière Sainte-Anne vers le PK 3,4, le 9 mars 2016. ....	10
Figure 7 : Dégagement d'un chenal dans la glace sous le pont Chalifour en mars 2019. ....	11
Figure 8 : Pelle-araignée munie de flotteurs et tractée par un câble d'acier, le 3 avril 2018. ....	11
Figure 9 : Dégagement d'un chenal dans la glace de la rivière Sainte-Anne par la pelle-araignée, le 22 janvier 2019.....	13
Figure 10 : Écoulement dans le chenal excavé au centre-ville.....	14
Figure 11 : Prototype de la page d'accueil de la plateforme avec différentes options .....	16
Figure 12 : Page prototype de cartes et graphiques pour la visualisation des données à la station ...	18
Figure 13 : Exemple des trois niveaux d'alerte avec deux messages rédigés. ....	19
Figure 14 : Stations hydrométriques en rive droite de la rivière Sainte-Anne.....	20
Figure 15 : Talus affecté par un glissement de terrain à moins de 6 m de la résidence #789-791.....	21
Figure 16 : Crête du talus érodé à 1 m de la résidence #740 avenue Beaulieu.....	22
Figure 17 : Berme de travail aménagée sur une partie de l'enrochement (25 octobre 2018). ....	22
Figure 18 : Apport de frasil ayant ralenti des travaux le matin du 15 novembre 2018.....	23
Figure 19 : Travaux d'amendement du sol sous le matelas de branches, le 19 novembre 2018. ....	23
Figure 20 : Talus riverain de 394 m stabilisé. ....	24
Figure 21 : Érosion et transport vers l'aval de matériel érodé entre 2011 et 2018, avant la stabilisation. ....	25
Figure 22 : Reprise du matelas de branches à l'extrémité amont de la stabilisation, le 24 août 2022. ....	25
Figure 23 : Ancrage, manille, joint fusible et chaîne. En médaillon, texture du câble sous tension. ...	28
Figure 24 : Estacade flottante avec câble, sapins et flotteurs en plastique (12 novembre 2020). ....	29
Figure 25 : Estacade de rétention du frasil fait d'un câble flottant et d'épinettes (9 décembre 2016). ....	29
Figure 26 : Amas de débris et de sables agglomérés autour du câble estacade le 10 mai 2021. ....	30
Figure 27 : Amas de neige soufflée et barrage de neige remodelé par la machinerie le lendemain.....	31
Figure 28 : Aménagement du barrage de neige par une excavatrice (15 décembre 2017). ....	31
Figure 29 : Usure du câble de l'estacade par le frottement contre une tige d'arbuste (12 juin 2019). ....	34

Figure 30 : Seuil de blocs rocheux destiné à réduire la vitesse de l'écoulement (5 septembre 2020). .....	35
Figure 31 : Vue en coupe du seuil de blocs rocheux du site du PK 24. ....	36
Figure 32 : Mise en place des blocs rocheux sous la forme d'une berme de travail le 7 novembre 2019. ....	37
Figure 33 : Installation du géotextile à l'amont des blocs rocheux le 2 juillet 2020. ....	38
Figure 34 : Représentation schématique des microconditions d'écoulement sur un seuil de blocs. ....	40
Figure 35 : Images satellitaires montrant la zone calme formée par le seuil .....	41
Figure 36 : Formation précoce du couvert de glace en amont de l'estacade le 14 novembre 2019. ....	43
Figure 37 : Formation rapide du couvert de glace les 17 et 18 novembre 2020. ....	44
Figure 38 : Vue aérienne de l'accumulation du frasil et de la prise des glaces le 24 novembre 2020. ....	44
Figure 39 : Retenue des glaces au PK 24 lors de la crue printanière de 2022 .....	45
Figure 40 : Vue aérienne de l'accumulation du frasil et de la prise des glaces le 24 novembre 2022. ....	47
Figure 41 : Bris partiel du BioD-Mat et érosion du sol constatés en décembre 2020 et juin 2021. ....	47
Figure 42 : Mise en place du BioD-Mat 90 et des rangs de plançons le 4 novembre 2021. ....	48
Figure 43 : Enlèvement de débris de bois et d'arbres entiers au site du PK 24 le 19 août 2021. ....	49
Figure 44 : Mise en place de quelques blocs rocheux au seuil du PK 24 le 19 août 2021. ....	49
Figure 45 : Dommages à la petite intervention de génie végétal au PK 24 le 25 avril 2024. ....	50
Figure 46 : Obstacles à l'évacuation des glaces par des caissons, le 31 mars 2015.....	50
Figure 47 : Caissons photographiés en 1927 (Société historique de Saint-Raymond). ....	51
Figure 48 : Caisson de drave émergeant au-dessus de l'eau en août 2019. ....	52
Figure 49 : Pierres d'un caisson de drave en partie démantelé et sous l'eau en août 2019. ....	52
Figure 50 : Vue aérienne des caissons à la suite de l'abaissement du niveau d'eau, le 7 juillet 2020. ....	52
Figure 51 : Enlèvement des caissons avec l'excavatrice montée sur une barge (11 août 2020). ....	53
Figure 52 : Barge avec sa benne munie d'un mur poussoir (26 août 2020). ....	54
Figure 53 : Mur poussoir actionné. Photo d'un autre projet prise en 2019 au lac Saint-Louis. ....	54
Figure 54 : Pierre des caissons confinée au bas de la rive (26 août 2020). ....	56
Figure 55 : Cavités dans l'ancienne digue en pierre vers le PK 5,4. ....	57
Figure 56 : Blocs de glace et de frasil consolidé.....	58
Figure 57 : Creusage d'une clé par une excavatrice munie d'un bras de 26 m, le 23 septembre 2020. ....	58
Figure 58 : Vue en coupe des interventions dans la partie amont, la moins sollicitée. ....	59
Figure 59 : Enrochement recouvert de gravier afin de favoriser sa végétalisation le 8 octobre 2020. ....	60
Figure 60 : En A, compost et semences. En B, BioD-Mat et plantation sur la partie amont de la digue. ....	60

Figure 61 : Vue en coupe de la digue du plan d'Environnement Nordique de Bélanger et Beaulieu. ....	61
Figure 62 : Digue anti-débordement en construction le 25 septembre 2020. ....	61
Figure 63 : Contrefort en acier appuyant la digue (8 octobre 2020). ....	62
Figure 64 : Boîte en acier pour éviter de mélanger de la terre avec la pierre. ....	63
Figure 65 : Enrochement en partie végétalisé par le compost et les semences, le 21 octobre 2021. ....	64
Figure 66 : Haut niveau d'eau lors de la crue de Noël 2020 en amont du pont Tessier. ....	65
Figure 67 : Digue et enrochement deux jours après la crue de Noël 2020 (27 décembre). ....	65
Figure 68 : État de la digue et du talus le 21 juin 2022. ....	65
Figure 69 : Émissaire de la rue Jacques-Labranche de type TBA 1200 mm en rive (29 mai 2019). ....	66
Figure 70 : Représentation schématique de l'anti-refoulement de la rue Jacques-Labranche. ....	67
Figure 71 : Vue en coupe montrant la chambre de clapet et la conduite par rapport à la rivière. ....	67
Figure 72 : Dégagement de la conduite pluviale lors des travaux le 2 octobre 2020. ....	68
Figure 73 : Clapet Jacques-Labranche, le 12 novembre 2020, avant la complétion des travaux de végétalisation au printemps 2021. ....	69
Figure 74 : Émissaire avec mur et maçonnerie de béton en saillie, haute de 2,4 m, le 29 mai 2019. ....	70
Figure 75 : Émissaire et mur de tête haut de 2,4 m vus de la rive opposée, le 19 juin 2019. ....	70
Figure 76 : Mise en place d'une troisième dalle de granite le 21 octobre 2021. ....	72
Figure 77 : Extrait du plan montrant une vue en coupe des interventions. ....	72
Figure 78 : Insertion de l'extrémité biseautée en béton le 21 octobre 2021. ....	73
Figure 79 : Extrémité biseautée jointe avec du ciment et de la mousse d'uréthane, le 28 octobre 2021. ....	73
Figure 80 : Nouvel émissaire avec EBF sans saillie en rive, le 28 octobre 2021. ....	74
Figure 81 : Pierres de l'enrochement déplacées par la glace à replacer (photo du 25 avril 2024). ....	75
Figure 82 : Digue de la rive droite faite d'un enrochement et d'une géomembrane. ....	77
Figure 83 : Construction de la digue avec enrochement et noyau d'argile en rive gauche, en 2009. ....	77
Figure 84 : Vue en coupe qui illustre la distinction entre le talus riverain et la digue voisine. ....	78
Figure 85 : Digue de la rive droite avec des cornouillers du côté de la rivière (25 avril 2024). ....	79
Figure 86 : Végétation de la digue située en rive gauche (13 octobre 2021). ....	80
Figure 87 : Défrichage de la digue de la rive gauche le 16 novembre 2021. ....	80
Figure 88 : Image satellitaire de 2018 montrant l'îlot en rive gauche avant les travaux. ....	83
Figure 89 : Haut-fond visible après l'abaissement du niveau d'eau du réservoir (10 août 2021). ....	83
Figure 90 : Dépôt récent d'alluvions dans le réservoir du barrage de Saint-Raymond (10 août 2021). ....	83
Figure 91 : Andain de galets et blocs issus du lit de la rivière avec quelques blocs de béton. ....	84
Figure 92 : Dragage par excavation du lit de la rivière et chargement des camions hors routes. ....	85
Figure 93 : Stabilisation et restauration de l'accès en rive gauche (16 septembre 2022) ....	86

Figure 94 : Dépôt de sédiments relevé deux fois en 2023, lors de l'ouverture des vannes du barrage.....	87
Figure 95 : Comparaison des accumulations avant les travaux en 2018 et une année après en 2023. ....	88
Figure 96 : Formation du couvert de glace entre le 18, 19 et le 30 novembre 2022, respectivement. ....	89
Figure 97 : Bief engorgé et barrage refoulé par un BCF dès le 12 décembre 2022. ....	90
Figure 98 : Frasil dans le réservoir du barrage de Saint-Raymond, le 14 décembre 2022. ....	91
Figure 99 : Embâcle naturel au PK 10,5 avant l'aménagement du SRG (photo du 9 janvier 2020). ....	93
Figure 100 : Schématisation de la circulation de l'eau lors d'un embâcle de glace au site du PK 10,5. ....	93
Figure 101 : Levage d'un bloc de taille avec une excavatrice de 74 tonnes (25 août 2022). ....	94
Figure 102 : Débris accumulé sur les piliers d'une estacade en ligne droite dans la rivière Duberger (11 juin 2020). ....	95
Figure 103 : Section d'écoulement au SGR lors d'une crue de récurrence 100 ans. ....	96
Figure 104 : Extrait du plan d'Environnement Nordique montrant le SRG. ....	97
Figure 105 : Utilisation d'un pont temporaire en appui sur la rive gauche renforcée. ....	98
Figure 106 : Installation d'un bloc de taille avec deux excavatrices, dont l'une munie d'un DGPS. ....	99
Figure 107 : Déroulage du géotextile appuyé sur la face amont du rang de blocs (6 septembre 2022). ....	99
Figure 108 : Mise en place des rangs de plançons de saules et de cornouiller (26 octobre 2022). ....	100
Figure 109 : Plançons protégés de la glace par des pierres de 150 à 800 mm (27 octobre 2022). ....	100
Figure 110 : SRG le 28 octobre 2022, en présence d'un débit de 45 m <sup>3</sup> /s à Chute-Panet. ....	101
Figure 111 : Restauration végétale de la plaine inondable en rive gauche. ....	101
Figure 112 : Galets arrondis mis en place sur le matelas de pierre (8 septembre 2022). ....	103
Figure 113 : Petit arbre coincé sur le bloc voisin de la rive gauche le 12 juillet 2023. ....	105
Figure 114 : Photo panoramique du SRG et de son rapide en aval, le 28 août 2023 à 29 m <sup>3</sup> /s. ....	106
Figure 115 : Fragmentation de la glace par le SRG le 19 décembre 2023. ....	107
Figure 116 : Sondage du couvert de glace, le 28 février 2024, à 20 m en amont du SRG. ....	108
Figure 117 : Photos comparées du même segment de la rive gauche à ±40 m en aval du SRG. ....	109
Figure 118 : Relevé bathymétrique au DGPS le 13 octobre 2022 en aval immédiat du SRG. ....	110
Figure 119 : Bathymétrie comparée extraite du rapport de Bélanger et Simard-Robitaille (2024). ....	110
Figure 120 : Haut-fond émergeant remodelé par les crues après l'aménagement du SRG. ....	111
Figure 121 : Reprise de la végétation en rive, incluant les rangs de plançons, durant l'été 2023. ....	112
Figure 122 : Carte des vitesses d'écoulement (tirée de Bélanger et Simard-Robitaille 2024). ....	113
Figure 123 : Modèle de repère historique de crue utilisé à Saint-Raymond. ....	115
Figure 124 : Repère historique de crue dans un parc et panneau de sensibilisation sur un mur. ....	115
Figure 125 : Nouveau poste de pompier au n° 103, rang Grande Ligne. ....	116

Figure 126 : Profil longitudinal du lit de la rivière en aval de Saint-Raymond alors que la vanne du barrage de Chute-Panet était ouverte. ....	123
Figure 127 : Orthophotographie du 7 juillet 2020, lorsque la vanne était ouverte à Chute-Panet.....	124
Figure 128 : Parcours payables en aval du centre-ville de Saint-Raymond .....	125

## **LISTE DES CARTES**

---

Carte 1 : Localisation générale des interventions. ....	3
Carte 2 : Interventions de RRI dans le secteur urbain de Saint-Raymond .....	4
Carte 3 : Localisation des stations hydrométriques et des caméras seules. ....	17
Carte 4 : Localisation des types de digues et des interventions d'entretien en 2021. ....	76

## **LISTE DES TABLEAUX**

---

Tableau 1 : Dates des principales inondations selon leur origine .....	5
Tableau 2 : Performance de l'estacade seule au PK 24 .....	33
Tableau 3 : Performance des aménagements au PK 24 .....	42
Tableau 4 : Effets des plus importantes crues mi-hivernales et printanières sur le couvert de glace au PK 24 depuis l'hiver 2019-2020 .....	46
Tableau 5 : Dates des visites de terrain au site SRG. ....	104
Tableau 6 : Dates et débits de pointe des crues. ....	105
Tableau 7 : Répartition des efforts budgétaires en fonction des activités destinées à la RRI sur la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond .....	120

## LISTE DES ACRONYMES

---

BCF	Barrage consolidé de frasil
CEL	Crues à l'eau libre
CPS	Cadre pour la prévention de sinistres
CPTAQ	Commission de protection du territoire agricole du Québec
DEH	Direction de l'expertise hydrique
DGB	Direction générale des barrages
DGPS	Système de positionnement global différentiel
DJGC	Degrés-jour de gel cumulés
DMA	Domage moyen annuel
DSB	Direction de la sécurité des barrages
EBF	Extrémité biseautée femelle
EMB	Embâcle
ENI	Environnement Nordique
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Québec
MPO	Ministère des Pêches et Océans du Canada
MSP	Ministère de la Sécurité publique du Québec
PK	Point kilométrique
PRAFI	Programme de résilience et d'adaptation face aux inondations
REAFIE	Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement
RRI	Réduction des risques d'inondation
RSA	Rivière Sainte-Anne
SRG	Système de retenue des glaces
UL	Université Laval (ici représentant l'équipe du département de génie civil et de génie des eaux dirigée par Brian Morse)
VSR	Ville de Saint-Raymond

## 1.0 INTRODUCTION

---

### 1.1 Contexte et objectifs

Les embâcles de glace (EMB) et la formation de barrages consolidés de frazil (BCF) dans la rivière Sainte-Anne sont reconnus comme étant la principale cause des inondations au centre-ville de Saint-Raymond. L'inondation par embâcle survenue en avril 2014 a causé des dommages estimés à 9,3 M\$, dont près des deux tiers sont attribués au secteur Sainte-Marie situé au nord de la rivière dans le secteur du centre-ville (Turcotte et coll. 2021). Cette inondation a également provoqué plusieurs problèmes de santé et de stress aux résidents. Les fortes crues récentes de décembre 2020 et 2023 indiquent que des crues majeures en l'eau libre (CEL) sont également possibles. Les risques de décès associés à ces inondations ne sont d'ailleurs pas exclus.

Entre 2014 et 2022, l'équipe du professeur Brian Morse, désormais retraité, du département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval a réalisé des suivis sur le terrain, de la modélisation hydraulique et des études afin d'améliorer la compréhension des phénomènes qui induisent ces inondations et d'y proposer des solutions (Turcotte et Morse 2015). En plus d'appuyer ces constats sur des bases scientifiques, la Ville de Saint-Raymond s'est mobilisée avec ses consultants et est devenue innovatrice dans la mise en œuvre d'interventions visant à réduire ces risques.

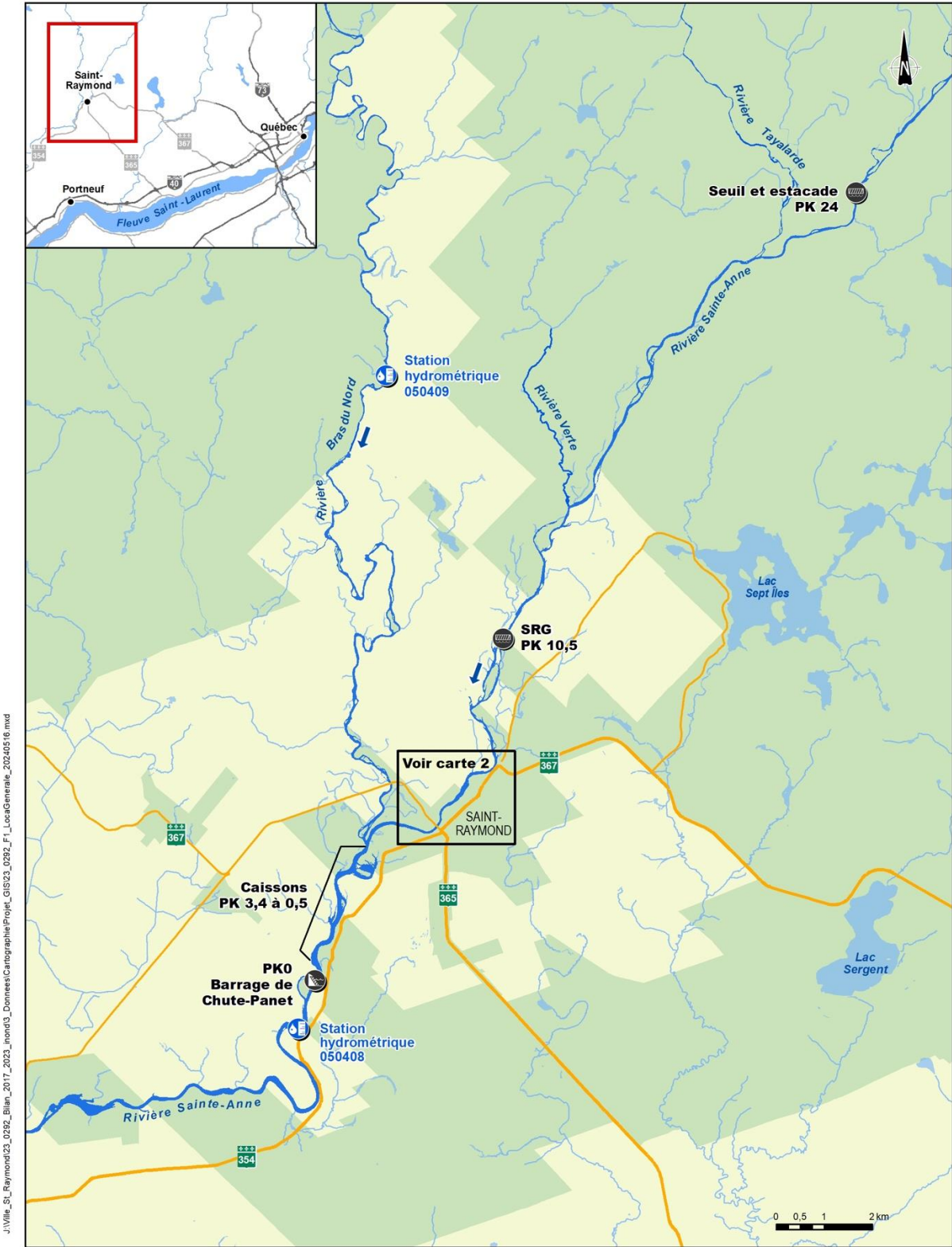
Les interventions et leurs études ont été réalisées avec l'appui financier et l'étroite collaboration du ministère de la Sécurité publique (MSP) du Québec par l'application d'un programme appelé Cadre pour la prévention de sinistres (CPS). Ces activités ont débuté dès 2014 en finançant les études de l'équipe de Brian Morse de l'Université Laval. Les interventions, pour leur part, ont débuté en 2016, dans la partie amont de la rivière. Le bilan actuel porte sur les interventions qui couvrent une période de 7 années, de 2016 à 2023. Mentionnons par ailleurs que l'expérience acquise par la Ville, le MSP et leurs consultants peut servir de référence à d'autres municipalités du Québec qui souhaitent réduire la fréquence et les conséquences des inondations induites par ces trois aléas (EMB, BCF et CEL).

Ce rapport présente un bref résumé de l'historique des inondations à Saint-Raymond suivi d'une description et d'une justification des 12 interventions réalisées durant la période concernée. Cette description concerne principalement les aspects techniques, mais également certains éléments

environnementaux incontournables. Mentionnons qu'il n'y a pas d'espèce rare ni à statut particulier sur les sites des interventions. Une analyse de l'efficacité observée ou attendue pour ces interventions est présentée dans les chapitres suivants. Un bilan des coûts spécifiques aux différentes interventions est présenté pour faciliter la planification financière de projets similaires ailleurs au Québec. À ceci s'ajoutent quelques éléments touchant la poursuite du projet et la diffusion des connaissances. Afin de limiter les répétitions et d'alléger le texte, le projet dans son ensemble est identifié par le sigle RRI pour *Réduction des Risques d'Inondation*.

## **1.2 Localisation**

Le projet s'étend sur un tronçon de 24 km de la rivière Sainte-Anne, comprenant le centre-ville de Saint-Raymond, dans la MRC de Portneuf. Plus précisément, il se situe entre le barrage de Chute-Panet à l'aval (PK 0) et le site du PK 24 en milieu forestier (figure 1). Le centre-ville de Saint-Raymond est localisé aux environs du PK 5,5 (figure 2), soit la distance qui le sépare du barrage de Chute-Panet en suivant le tracé de la rivière.



**Carte 1 : Localisation générale des interventions.**



## 2.0 HISTORIQUE DES INONDATIONS

Depuis 1893, 77 inondations ont été répertoriées à Saint-Raymond. Les plus marquantes sont présentées au tableau 1 et classées en fonction de leur origine.

**Tableau 1 : Dates des principales inondations selon leur origine**

En eau libre		Par embâcle de glace ou de frasil
Crue printanière	Crue estivale et automnale	
12-13 mai 1912	11 septembre 1924	décembre 1895
1924	28 ou 30 septembre 1924	27 décembre 1896
1939	30 juillet 1931	19 mars 1936
1941	15 novembre 1951	12-15 décembre 1952
1943	3 novembre 1966	21-22 décembre 1957
28 avril 1979	11 juillet 2023	16 décembre 1964
7-8 mai 1989		25-26 avril 1968
1-2 mai 2023		8 décembre 1969
		10 décembre 1974
		26 mars 1979
		31 mars 1987
		25 décembre 2003
		décembre 2004
		14-17 janvier 2005
		22 mars 2012
		15-16 avril 2014
		22-23 décembre 2018
		25 décembre 2020
		1 <sup>er</sup> janvier 2021
		18-19 décembre 2023
		30-31 décembre 2024

*Adapté de Morse et Turcotte 2014*

Les inondations à Saint-Raymond sont fréquentes depuis fort longtemps. Celles induites par embâcles de glace sont nettement plus abondantes en étant la seule cause répertoriée entre 1990 et 2025. Turcotte et Morse (2015) soutiennent que les inondations par embâcles comportent plus de problèmes et de risques que celles observées en eau libre. Elles sont plus imprévisibles et plus fréquentes annuellement (Morse et Turcotte 2018) et les rehaussements des niveaux d'eau associés sont généralement plus rapides. De plus, l'eau froide gèle au contact des infrastructures et la glace perturbe leur fonctionnement.

En décembre 2020 et 2023, les glaces de la rivière Sainte-Anne ont été évacuées sans débordement, puis les débits à l'eau libre (CEL) ont atteint des valeurs supérieures à 970 m<sup>3</sup>/s\* approchant dangereusement le seuil d'inondation majeur au centre-ville. Ce troisième aléa doit également faire l'objet de mesures préventives. Soulignons par ailleurs qu'un embâcle s'est formé sur la rivière Bras du Nord, principal affluent de la rivière Sainte-Anne, près du pont de la route 367 inondant le secteur nord de la ville le 19 décembre 2023 (figure 1). Au moment où la débâcle survenait dans le Bras du Nord, les niveaux d'eau de la Sainte-Anne étaient déjà élevés de sorte que les glaces ont formé un embâcle majeur près du pont.



**Figure 1 : Inondation du secteur nord de Saint-Raymond par un embâcle sur la rivière Bras du Nord le 19 décembre 2023.**

---

\* Dans ce rapport, à moins d'avis contraire afin de faciliter la compréhension, tous les débits mentionnés sont ceux mesurés à la station 050408 située 1,3 km en aval du barrage de Chute-Panet et gérée par la direction de l'Expertise hydrique du MELCCFP. On parlera plutôt de débit nominal et non de débit local estimé. Par exemple, il sera écrit que les glaces se sont mobilisées au PK 24 à un débit de X m<sup>3</sup>/s, soit la valeur équivalente mesurée à Chute-Panet lors de cet événement.

### 3.0 INTERVENTIONS RÉALISÉES

---

Les interventions réalisées sur la rivière Sainte-Anne pour réduire les risques d'inondation à Saint-Raymond sont au nombre de 12 et sont présentées de façon généralement chronologique :

- affaiblissement préventif du couvert de glace entre les PK 3,5 à 5,4;
- système d'alerte précoce et instrumentation des cours d'eau;
- stabilisation de la rive gauche<sup>†</sup> entre les PK 7,1 et 6,7;
- estacade flottante au PK 24;
- seuil de blocs au PK 24;
- enlèvement de caissons de drave entre les PK 3,4 et 0,5;
- stabilisation du talus riverain et reconstruction de la digue vers le PK 5,4;
- dispositif anti-refoulement de la rue Jacques-Labranche au PK 6,05;
- reconstruction de l'émissaire de la rue Saint-Hubert au PK 4,9;
- défrichage de la digue en rive gauche entre les PK 5,9 et 5,3;
- dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond (PK ±6,35 à 6,15);
- système de retenue des glaces au PK 10,5

Bien qu'ils occupent le même site et qu'ils soient complémentaires, l'estacade flottante et le seuil de blocs au PK 24 sont présentés séparément, car plus de deux années séparent leur mise en place et leurs fonctions hydrauliques sont distinctes.

#### 3.1 Affaiblissement du couvert de glace

##### 3.1.1 Fonctions recherchées

La quantité de frasil transitant dans le tronçon de la rivière Sainte-Anne voisin du centre-ville varie autour de 400 000 tonnes en moyenne annuellement (Vergeynst et coll., 2015). La valeur maximale, estimée par une modélisation de la période de prise des glaces, aurait atteint jusqu'à 920 000 tonnes durant l'hiver 2003-2004 (Turcotte et Morse 2016). Même s'il est possible d'influencer la formation d'un BCF en conditions hivernales moyennes, il est peu probable de pouvoir gérer, avec acceptabilité sociale et environnementale, tous les aléas observés à ce jour, même avec la mise en place de mesures structurelles efficaces en amont de la Ville (Turcotte et Morse 2016).

---

<sup>†</sup> Par convention, selon un observateur qui regarde vers l'aval d'une rivière, la *rive gauche* est à gauche et la *rive droite* est à droite. Cette convention s'applique également aux sections transversales présentées dans ce rapport.

Par ailleurs, la figure 2 présente une situation non souhaitable observée le 15 novembre 2018. Le débit étant supérieur à la capacité de gestion des vannes du barrage de Saint-Raymond, la rétention du frasil n'a pu se faire, entraînant une obstruction à l'écoulement dans le bief aval voisin du centre-ville de Saint-Raymond en seulement trois nuits. Il appert que le tronçon voisin du centre-ville est en mesure d'accueillir entre 100 000 et 120 000 tonnes de frasil avant une obstruction problématique. Ces conditions deviennent exacerbées si une suite de redoux mobilise de petits embâcles susceptibles de s'accumuler sur un BCF localisé en aval. Saint-Raymond devient alors plus vulnérable aux inondations à la moindre crue.

L'objectif principal de l'affaiblissement est de réduire l'intégrité du couvert de glace. Ainsi, un couvert affaibli entre les PK 5,4 et 3,5 pourrait se mobiliser plus tôt durant la période de débâcle limitant ainsi le refoulement et la hausse des niveaux d'eau. De plus, un chenal d'écoulement excavé dans la glace permet de faciliter l'évacuation de l'eau. L'affaiblissement du couvert permet également de contribuer à devancer la débâcle naturelle au centre-ville (Simard-Robitaille 2021).

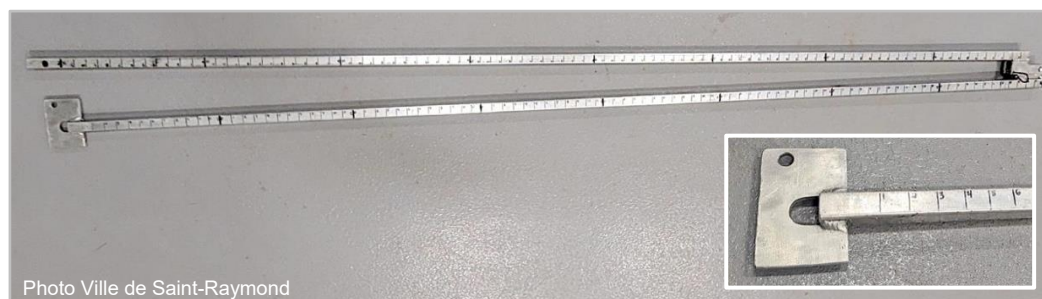


**Figure 2 : Accumulation précoce de frasil dans la rivière Sainte-Anne le 15 novembre 2018, malgré l'opération des vannes par la grue.**

### 3.1.2 Description

L'affaiblissement du couvert de glace de la rivière Sainte-Anne a débuté au printemps 2013, en réponse aux dommages subis lors de l'inondation de 2012. Il est réalisé chaque hiver par le Service des travaux publics de la Ville en suivant les recommandations de Thomas Simard-Robitaille, spécialiste en dynamique des glaces, qui réalise leur suivi depuis une dizaine d'années (Simard-Robitaille et coll. 2015, Simard-Robitaille et Morse 2019, Simard Robitaille 2021).

Préalablement aux travaux, les employés de la Ville procèdent chaque hiver à la caractérisation du couvert de glace incluant le frasil (figures 3 et 4). Cette caractérisation consiste à mesurer les épaisseurs de chacune des composantes du couvert de glace et en préciser la nature (glace noire, glace blanche et les différentes densités de frasil rencontrées).



**Figure 3 :** Règle de mesure de l'épaisseur de la glace / frasil fabriquée par les employés de la Ville. Par sa rotation, la palette à la base permet de qualifier la densité du frasil.



**Figure 4 :** Mesure des épaisseurs de la glace et du frasil sur la rivière Sainte-Anne, le 13 janvier 2019.

### 3.1.3 Travaux

Les travaux d'affaiblissement du couvert de glace de la rivière Sainte-Anne consistent à excaver un chenal ouvert d'environ 3,5 m de largeur sur une longueur variable en fonction des conditions de glace observées. Les fragments de glace excavés sont placés sur le côté du chenal, sur le couvert de glace, afin de ne pas bloquer les chenaux naturels que la rivière se creuse dans son accumulation de frasil. Trois types d'excavatrices ont principalement été utilisées. Il s'agit d'une excavatrice conventionnelle, de la drague-excavatrice amphibie nommée Amphibex et de la pelle-araignée de Menzi Muck.

L'excavatrice conventionnelle offre un bon rendement en termes de quantité de glace enlevée (figure 5), mais demeure peu versatile au point de la rendre inutilisable en plusieurs endroits, notamment en présence des hauts murs riverains au centre-ville et sous les ponts. Son utilisation sécuritaire n'est pas toujours possible selon diverses contraintes et une erreur d'opération est plus risquée.



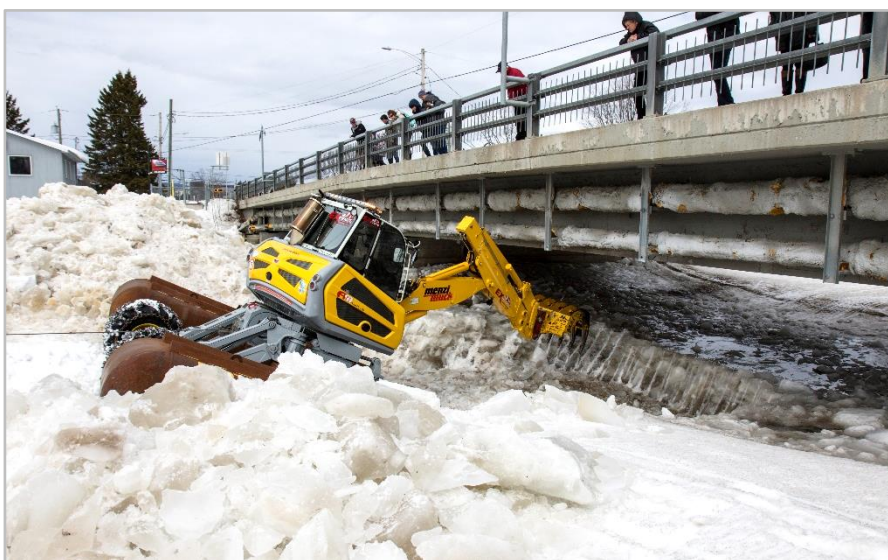
**Figure 5 :** Excavatrice conventionnelle travaillant à partir de la rive gauche, le 19 mars 2015.

L'Amphibex a été utilisée entre 2013 et 2019. Elle provient du Nouveau-Brunswick et n'est pas toujours disponible au moment opportun. De plus, son godet n'a pas la capacité de retirer efficacement les glaces brisées du chenal et sa progression est réduite dans les accumulations de frazil. L'Amphibex ne peut couvrir tout le bief aval du centre-ville, car sa hauteur ne lui permet pas de passer sous les ponts. En effet, son tirant d'eau est trop grand pour circuler aux endroits peu profonds et les faibles vitesses d'écoulement ne permettent pas d'évacuer les glaces cassées, ce qui l'oblige à arrêter les hélices de son propulseur.



**Figure 6 :** Amphibex sur la rivière Sainte-Anne vers le PK 3,4, le 9 mars 2016.

Un troisième équipement utilisé depuis 2015 est une pelle mécanique de type araignée aux 4 roues motrices fabriquée en Suisse par Menzi Muck. Cet équipement muni de 4 roues montées sur des bras articulés peut se soulever et s'abaisser de 1,6 m afin de pouvoir travailler sous un pont, comme le montre la figure 7. Depuis l'année 2017, la pelle-araignée est équipée de deux flotteurs spécialement conçus au Québec par l'entreprise ExPente pour travailler sur la glace en sécurité (figure 8). Cet équipement est versatile et peut théoriquement accéder à tous les endroits de la rivière grâce à ses dispositifs de sécurité. De plus, elle peut être adaptée pour scier, briser ou retirer des glaces.



**Figure 7 :** Dégagement d'un chenal dans la glace sous le pont Chalifour en mars 2019.



**Figure 8 :** Pelle-araignée munie de flotteurs et tractée par un câble d'acier, le 3 avril 2018.

Les coûts des travaux<sup>‡</sup> varient selon les besoins, les longueurs et l'état du couvert de glace. De 2015 à 2023, les frais encourus variaient entre 78 841 \$ et 174 564 \$, pour un total de 888 325,65\$. Le montant le plus élevé a été dépensé en 2019, en raison de l'intervention salvatrice en janvier sur un embâcle formé en décembre 2018 qui causait des refoulements d'eau dans les sous-sols des résidences du centre-ville. Le coût moyen annuel correspond à 88 220\$ excluant l'année 2019. Les compagnies d'assurance des opérateurs exigent que leurs activités soient supervisées par un ingénieur ou du personnel qualifié.

#### 3.1.4 Aspects environnementaux

Il y a peu d'enjeux environnementaux associés à l'affaiblissement du couvert de glace sur la rivière Sainte-Anne. Ce type d'intervention n'est pas reconnu pour perturber les activités du poisson ni son habitat. D'ailleurs, cela ne nécessite pas d'autorisation ministérielle du MELCCFP. En laissant les glaces excavées sur le couvert, les sédiments potentiellement emprisonnés dans la glace demeurent dans l'enceinte de la rivière. La pelle-araignée utilise des huiles hydrauliques, des lubrifiants et des graisses entièrement biodégradables respectant des normes européennes plus restrictives que celles en vigueur en Amérique du Nord. Les risques de contamination de l'eau par un accident sont réduits au minimum.

#### 3.1.5 Suivi et efficacité

Le suivi de l'efficacité des différentes méthodes d'affaiblissement préventif du couvert de glace a fait l'objet du mémoire de maîtrise de Thomas Simard-Robitaille (2021) en étant appuyé sur des observations et mesures réalisées sur la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond durant 5 hivers, soit de 2014-2015 à 2018-19.

Les rendements des équipements pour affaiblir le couvert de glace varient grandement selon l'épaisseur du couvert de glace. Globalement, les rendements de l'Amphibex et de la pelle-araignée peuvent se comparer ou différer, selon le type de couvert de glace en présence. Définir l'efficacité relative d'une mesure d'affaiblissement préventif ne peut être atteint, car l'environnement a été modifié par l'intervention et le couvert de glace varie d'une année à l'autre. Une solution resterait de réaliser une étude sur plusieurs années afin d'obtenir des résultats statistiquement pertinents et

---

<sup>‡</sup> Pour chaque solution au chapitre 3, le coût des travaux est aussi présenté au tableau 7 de la section 5.4. Il est à noter que la scission des étapes des interventions peut différer de ce qui est décrit dans le présent chapitre. Les montants finaux au tableau 7 correspondent aux valeurs au 31 mars 2005.

indépendants. Les cinq hivers analysés par Simard-Robitaille (2021) sont insuffisants sur le plan statistique.

Néanmoins, la dynamique des débâcles lors de l'hiver 2018-2019 a permis de juger l'efficacité des travaux réalisés sur la prévention de débordements majeurs au centre-ville de Saint-Raymond. L'excavation d'un chenal continu entre les PK 3,5 et 5,6 a permis de garder des niveaux bas au centre-ville alors que la revanche n'était que d'une dizaine de centimètres à plusieurs endroits (figures 9 et 10). Sans ce travail, il aurait été attendu que des débordements mineurs à modérés soient observés à plusieurs endroits au centre-ville.

En conclusion, l'affaiblissement préventif du couvert de glace a été un des premiers maillons d'une série de mesures structurantes visant la RRI à Saint-Raymond. Cette activité réalisée conjointement avec l'opération du système d'alerte précoce (section 3.2) a constitué le premier filet de sécurité de la population de Saint-Raymond. Elle a permis d'attendre et de développer les mesures physiques permanentes décrites plus loin et à la mise en œuvre de cette recherche appliquée sur l'ensemble des tronçons sur les rivières Sainte-Anne et Bras du Nord sur le territoire de Saint-Raymond.



**Figure 9 :** Dégagement d'un chenal dans la glace de la rivière Sainte-Anne par la pelle-araignée, le 22 janvier 2019.



**Figure 10 :** Écoulement dans le chenal excavé au centre-ville permettant de maintenir les niveaux bas en préservant la faible revanche au centre-ville, le 21 avril 2019.

## 3.2 Système d'alerte précoce et instrumentation des cours d'eau

### 3.2.1 Fonctions recherchées

À partir de 2016, l'équipe de l'UL et la Ville de Saint-Raymond ont mis en place un système visant à informer, le plus tôt possible, les employés et la population des risques d'inondation anticipés afin de s'y préparer le mieux possible. Ce système comporte des équipements physiques d'acquisition des données ainsi qu'une procédure de gestion et de diffusion de l'information. Les objectifs de la mise en place de ces équipements sont :

- d'étudier la rivière à distance, en temps réel, afin de mieux quantifier les phénomènes et d'optimiser l'efficacité des sorties de terrain par les équipes de recherche;
- de permettre d'appréhender les inondations et de préparer les équipes d'urgence en cas d'inondation potentielle;
- de favoriser la connaissance de la rivière par différents intervenants provinciaux et municipaux dans les prochaines années (Turcotte et coll. 2016).

### 3.2.2 Description

La description du système d'alerte précoce provient essentiellement des rapports de Turcotte et coll. (2016) et de Richard (2019) préparés à la fois pour la Ville de Saint-Raymond et le MSP.

Les équipements physiques comprennent 7 stations hydrométriques permettant d'accéder à des données, à distance, pour suivre les conditions hydrologiques de la rivière Sainte-Anne et de la rivière Bras du Nord. Bien que la rivière Sainte-Anne soit la principale associée aux inondations à

Saint-Raymond, la Bras du Nord (BdN) y contribue dans une proportion significative. Cinq de ces stations procurent des données en temps réel et tandis que deux, les plus en aval, offrent plutôt des données une fois par jour.

Les stations hydrométriques sont localisées aux endroits suivants :

- PK 0 dans le réservoir du barrage de Chute-Panet;
- PK 3,3 au pont de fer de la piste cyclable;
- PK 6,2 dans le réservoir du barrage de Saint-Raymond;
- PK 13,5 au pied des rapides et en aval de de la confluence avec la rivière Verte;
- PK 20,3 au pied d'un rapide sur le roc, en aval de la confluence avec la rivière Talayarde;
- PK 23,8 à la tête des rapides à l'aval du seuil et de l'estacade flottante sur la rivière Sainte-Anne;
- PK BdN 4,6 dans le bas des rapides de la rivière Bras du Nord.

Les stations comprennent une sonde de niveau d'eau et de température de l'eau, une caméra et un système d'acquisition et de transmission des données. Un panneau solaire et des batteries pour stocker l'énergie assurent l'alimentation des appareils. Certaines stations mesurent également la température de l'air, la pression atmosphérique, les précipitations et l'épaisseur du couvert de neige. De plus, des caméras supplémentaires sont présentes sur des bâtiments en hauteur au centre-ville, aux PK 5,4 et 5,8. La localisation des stations hydrométriques et des caméras seules est présentée sur la carte 3.

La procédure de gestion des données et de diffusion de l'information comprend :

- une plateforme de visualisation des données;
- un site Web administré par la Ville pour diffuser les données.

Le « Portail de surveillance des inondations de la Ville de Saint-Raymond » a été développé par l'Université Laval en collaboration avec la Ville et prend la forme d'un site Web. On peut voir les prototypes des pages du site aux figures 11 et 12.

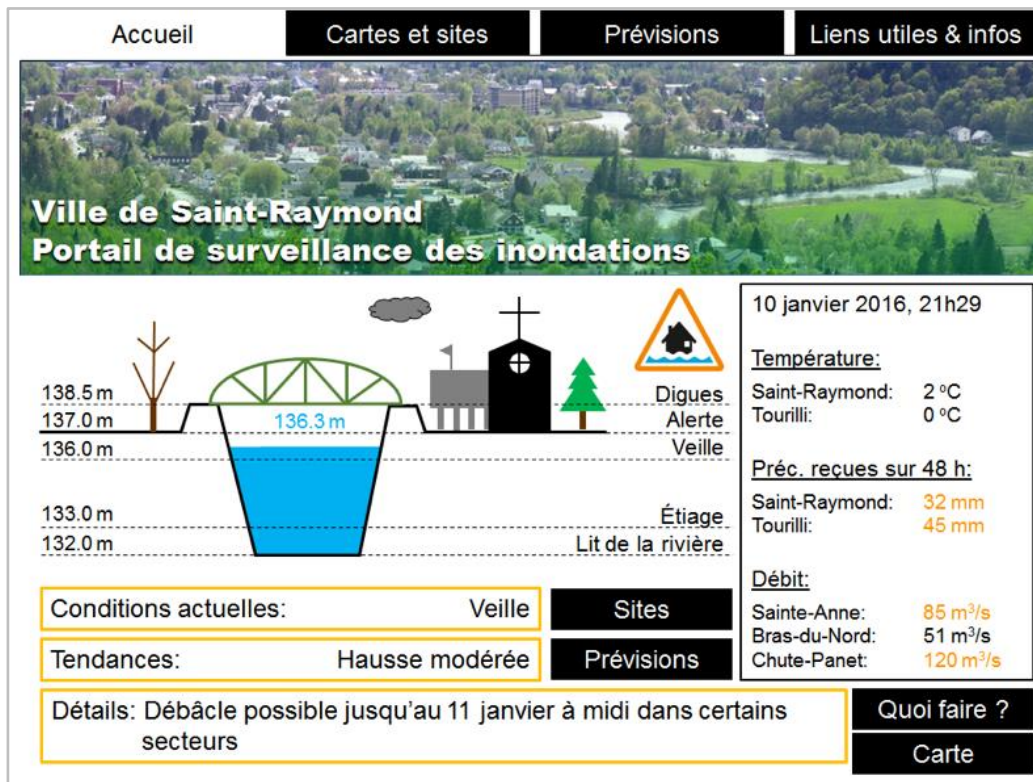
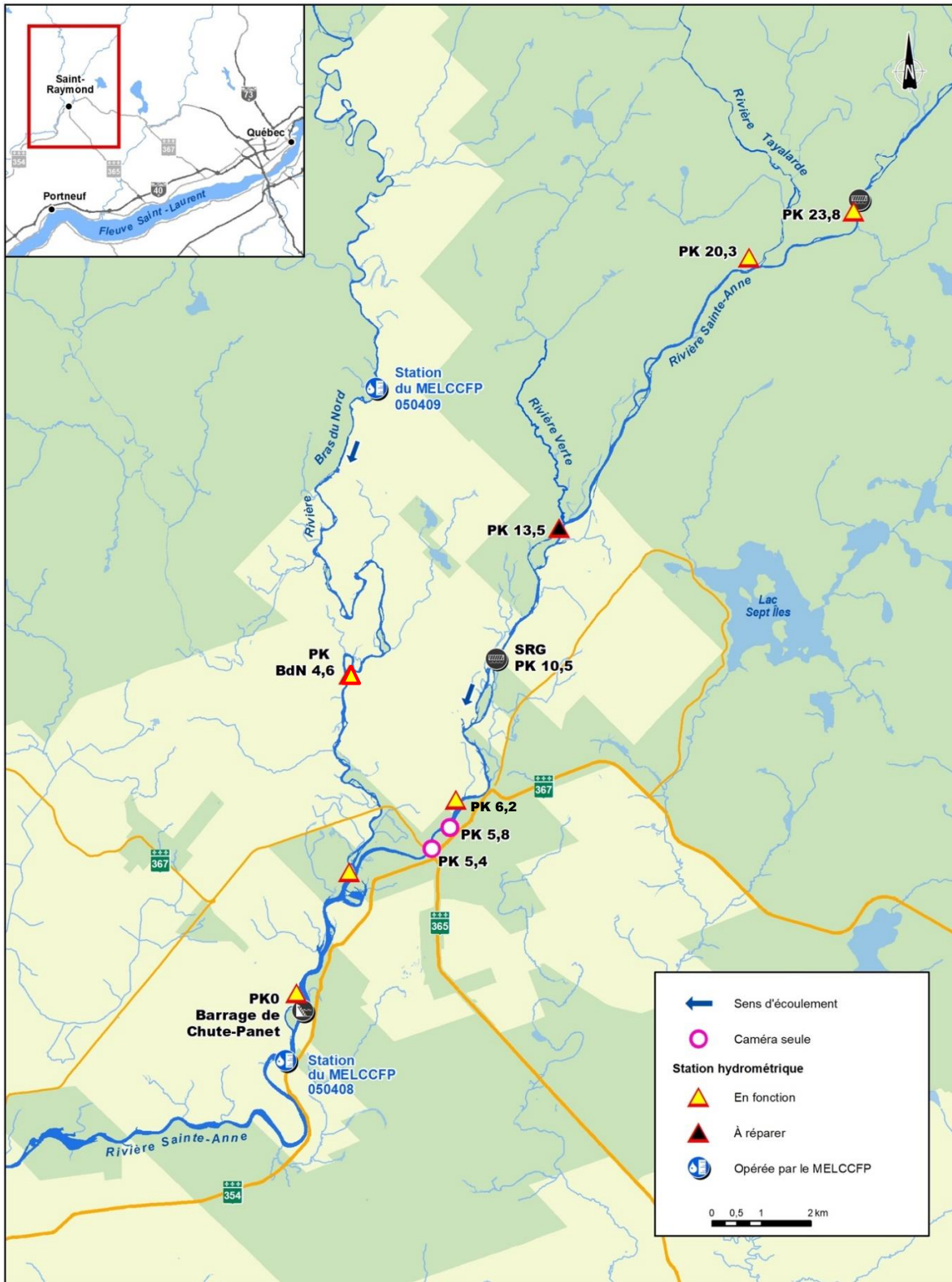


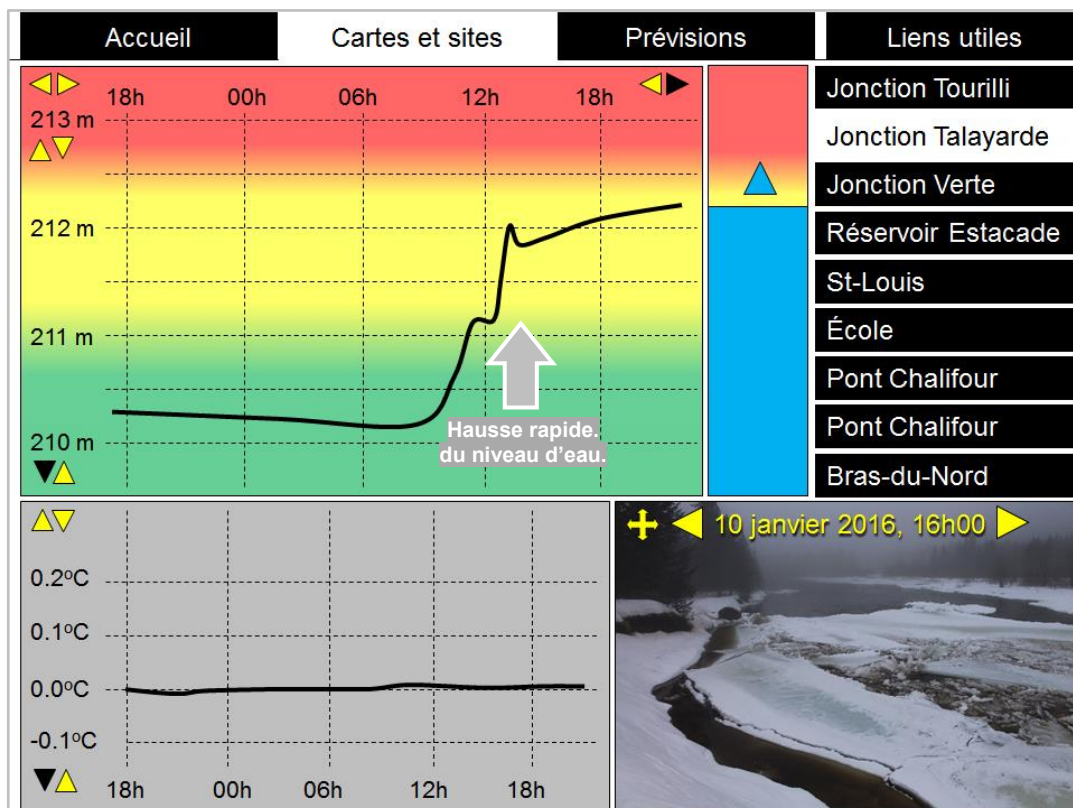
Figure 11 : Prototype de la page d'accueil de la plateforme avec différentes options (tirée de Turcotte et coll. 2016).



Carte 3 : Localisation des stations hydrométriques et des caméras seules.

La page d'accueil présente les informations les plus importantes et elle contient :

- le niveau d'alerte;
- un bulletin émis, en lien avec une alerte (optionnel);
- un sommaire des précipitations récentes et prévues pour Saint-Raymond;
- un résumé des conditions actuelles aux différentes stations de mesures.



**Figure 12 :** Page prototype de cartes et graphiques pour la visualisation des données à la station (tirée de Turcotte et coll. 2016).

La plateforme est entièrement automatisée, à l'exception des alertes spécifiques qui doivent être rédigées par du personnel qualifié. Elle est composée de 79 routines distinctes créées spécifiquement pour la plateforme en plus de centaines d'autres faisant partie de bibliothèques disponibles sous format libre, totalisant près des 15 000 lignes de codes en 7 langages de programmation différents.

L'administrateur du site Web peut rédiger et envoyer les messages appropriés en fonction des conditions hydrométéorologiques analysées. Trois niveaux d'alertes peuvent être présentés : vert pour *aucune inondation prévue*, orange pour *avertissement d'inondation* et rouge pour *alerte inondation* (figure 13). L'identification et la diffusion du niveau d'alertes constituent le seul élément

qui requiert une mise à jour par une personne; les autres données sont mises à jour automatiquement.



**Figure 13 : Exemple des trois niveaux d'alerte avec deux messages rédigés.**

Pour chaque station, l'évolution du niveau d'eau est également qualifiée par un code de couleur à savoir :

- niveau d'eau baisse en vert (> 1 cm/h);
- niveau d'eau stable en vert (0 à 1 cm/h, baisse ou hausse);
- niveau en hausse en orange (1 à 2 cm/h);
- niveau en forte augmentation en rouge (> 2 cm/h).

### 3.2.3 Installation

L'installation et la programmation des stations ont été principalement réalisées en 2016 et 2017. Ces stations comprennent plusieurs composantes fixées sur un arbre (figure 14) tandis que d'autres se retrouvent sous la surface de l'eau de la rivière, généralement protégés des glaces par des blocs rocheux existants. Dans certains cas, une nacelle a pu être utilisée pour faciliter l'installation en hauteur. Toutefois, la plupart des stations ne sont pas directement accessibles en véhicule, mais leur accès n'est pas contraignant. Cependant, en période hivernale, certaines stations sont difficiles d'approches sans motoneige.



**Figure 14 : Stations hydrométriques en rive droite de la rivière Sainte-Anne.**

### 3.2.3 Suivi et efficacité

Le système d'alerte précoce constitue un outil essentiel au RRI. Ce dernier représente les yeux et les oreilles de la population pour mobiliser les services d'urgence qui détiennent ainsi la possibilité de joindre chaque citoyen par des moyens électroniques, téléphoniques ou physiques. En cas de défaillance les services publics sont directement impliqués dans un plan de mesures d'urgence adapté aux conditions de gestion des risques d'inondations.

Ce dernier demeure toutefois encore fragile, et ce, en fonction des éléments suivants :

- Sa gestion doit obligatoirement être sous supervision d'un ingénieur qualifié en raison de la complexité liée à l'interprétation des données et de nombreux bris d'équipements. Pannes de batteries, accès aux caméras défectueuses contraignants en hiver, vandalisme;
- Cet outil doit être bien compris pour planifier l'affaiblissement préventif du couvert de glace;
- Sa programmation informatique devra être standardisée dans sa deuxième génération pour rendre le système plus convivial;
- Faciliter l'entretien des équipements et caméras par des sous-traitants jusqu'à l'atteinte d'une pleine autonomie par le personnel technique de la ville;
- Les stations devront être implantées sur des bases permanentes en béton afin d'assurer leur pérennité;
- Ses frais annuels d'opération représentent actuellement plusieurs milliers de dollars et pourraient être optimisés.

En bref, les composantes humaines et techniques du système d'alerte précoce ont été à la base des mesures d'interventions et de suivi des activités réalisées depuis 2016. Ces données consolident et complètent les mesures des chercheurs et permettent d'établir le rendement des différents aménagements.

### 3.3 Stabilisation de la rive gauche entre les PK 7,1 et 6,7

#### 3.3.1 Description

En 2018, une intervention a permis de stabiliser un segment de 394 m de la rive gauche de la rivière Sainte-Anne entre les PK 7,1 et 6,7, dans le secteur de l'avenue Beaulieu et de la rue Saint-Joseph (carte 2). La hauteur des talus riverains stabilisés varie entre 4 et 9,5 m. Dans la partie amont, un glissement de terrain s'était formé dans le dépôt de silt-argileux (Simard et Jean 2018) et menaçait l'intégrité de la résidence située à 5,5 m du talus ainsi que la sécurité de ses occupants (figure 15). Plus en aval, la résidence du 740 avenue Beaulieu était située à 1 m de la crête du talus riverain affecté par une érosion de sévérité élevée (figure 16).

La rive a été stabilisée par la mise en place d'un enrochement de calibre 300-800 mm. En deux endroits totalisant 70 m de longueur, un matelas de branches de saule et de cornouiller a été utilisé au-dessus de l'enrochement afin de redonner un caractère plus naturel à la rive, aux endroits où les conditions hydrodynamiques le permettent (Simard-Robitaille et Beaulieu 2018).



Figure 15 : Talus affecté par un glissement de terrain à moins de 6 m de la résidence #789-791.



**Figure 16 : Crête du talus érodé à 1 m de la résidence #740 avenue Beaulieu.**

### 3.3.2 Travaux

Les travaux ont été réalisés en octobre et novembre 2018 par l'entreprise Rochette Excavation. La surveillance de leur conformité aux plans et devis et les nécessaires ajustements au chantier ont été assurés par Simon Bélanger et Claude Beaulieu. Les travaux ont exigé l'utilisation de 14 250 tonnes de pierres, 2 150 tonnes de sable et gravier en plus de 190 m<sup>2</sup> de matelas de branches et 740 m<sup>2</sup> de géotextile biodégradable anti-érosion de type BioD-Mat 90.

Pour permettre le transport de la pierre et le travail de l'excavatrice en présence de hauts talus, une berme a été aménagée à mi-hauteur du talus à l'aide de la pierre de l'enrochement et de tout venant de calibre 0-300 mm temporairement utilisé comme surface de roulement (figure 17).



**Figure 17 : Berme de travail aménagée sur une partie de l'enrochement (25 octobre 2018).**

Durant la dernière semaine de mise en place de l'enrochement, la production massive et précoce de frazil dans les rapides de la rivière Sainte-Anne plus en amont a ralenti le temps d'exécution des travaux sans toutefois les arrêter complètement (figure 18).



**Figure 18 : Apport de frazil ayant ralenti des travaux le matin du 15 novembre 2018.**

Après la construction de l'enrochement, l'entrepreneur a procédé au reprofilage du haut de talus, à la mise en place de terre végétale graveleuse et du matelas de branches (figure 19). La mince couche de sol alors gelé a pu être enlevée lors de l'excavation du talus, ce qui a permis l'enfoncement des piquets de bois dans le sol. Ces piquets servent à fixer le BioD-Mat 90 qui stabilise le talus riverain durant la période de 2 à 3 ans requise pour le développement des arbustes.



**Figure 19 : Travaux d'amendement du sol sous le matelas de branches, le 19 novembre 2018.**

La photographie de la figure 20 montre l'intervention de stabilisation une fois complétée, vers la fin de la crue de la crue printanière suivante en mai 2019.



**Figure 20 : Talus riverain de 394 m stabilisé. Photo prise vers la fin de la crue, le 29 mai 2019.**

Les travaux ont impliqué des coûts de 653 000\$, avant les taxes, en dollars de 2018. Les frais ont été partagés par le MSP, la Ville et les propriétaires des terrains.

### 3.3.3 Aspects environnementaux

Les interventions ont exigé une démarche usuelle d'obtention d'autorisations environnementales et de compensations. Cependant, ces interventions ont modifié de manière particulièrement marquée un aspect de l'environnement, soit la disponibilité en sédiments en aval du site. Ces modifications contribuent à optimiser le fonctionnement déficient du réservoir du barrage de Saint-Raymond (X0001840) utilisé pour la prévention des inondations.

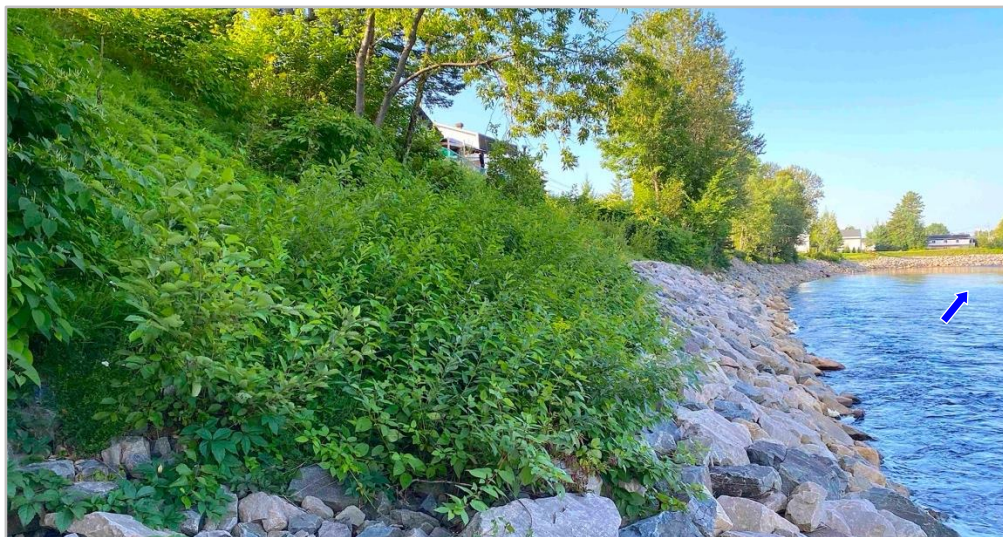
Les interventions de stabilisation de rive ont éliminé une importante source de sédiments transportée par la rivière, principalement des sédiments grossiers de la taille de galets, cailloux, gravier et sable grossier (Bélanger 2022). Sous l'influence des vitesses d'écoulement élevées en période de crue (Simard-Robitaille et Beaulieu 2018), les matériaux sont mobilisés par le transport en charge de fond ou par charriage (Carrier et coll. 2017). La figure 21 représente les volumes de matériaux érodés sur le talus riverain avant les interventions. On constate qu'entre 2011 et 2018, 4 700 m<sup>3</sup> de matériaux ont été érodés et transportés vers l'aval. Ces sédiments devenaient susceptibles de se déposer dans le réservoir du barrage de Saint-Raymond ou de passer par-dessus en s'accumulant dans le bief aval localisé vis-à-vis du centre-ville. L'augmentation de la

vitesse de l'eau dans un réservoir comblé par les sédiments nuit à la formation d'un couvert de glace hâtif favorable à la captation du frasil en provenance des rapides situés en amont du PK 13,5. (Morse et Turcotte 2014 et 2015). Ces caractéristiques de l'hydraulique fluviale et de la dynamique des glaces seront expliquées davantage à la section 3.11 traitant du dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond.



**Figure 21 : Érosion et transport vers l'aval de matériel érodé entre 2011 et 2018, avant la stabilisation.**

Enfin, l'utilisation de matelas de branches sur deux segments à contribuer à améliorer la qualité de 190 m<sup>2</sup> de milieu riverain en développant des arbustives riveraines composées d'espèces indigènes à la région, principalement le saule à tête laineuse et le cornouiller stolonifère (figure 22).



**Figure 22 : Reprise du matelas de branches à l'extrémité amont de la stabilisation, le 24 août 2022.**

### 3.3.4 Suivi et efficacité

La rive stabilisée a fait l'objet d'observations et de prise de photographies entre 2019 et 2023. Aucune érosion de la rive n'a pu être observée, ce qui confirme l'efficacité des interventions. La reprise de la végétation au-dessus de l'enrochement se poursuit (figure 22).

La stabilisation de la rive n'a pas interféré avec l'écoulement des glaces, incluant celui du frazil. En raison de la présence d'une large plaine inondable, la réduction de la section d'écoulement par l'espace occupé par l'enrochement dans la rivière a induit un rehaussement négligeable et inférieur aux limites de précision offertes par la modélisation hydraulique (Simard-Robitaille et Beaulieu 2018). L'impact de la stabilisation sur les niveaux d'eau montre une différence de -0,02 à +0,07 m sur les cotes d'élévation des crues pour l'ensemble des débits analysés (Q 2 ans à Q 100 ans). Ces variations sont toutefois difficilement dissociables de l'incertitude associée au modèle hydraulique.

## 3.4 Estacade flottante au PK 24

### 3.4.1 Fonctions recherchées

Les fonctions recherchées pour l'estacade flottante sont principalement de retenir un maximum de frazil et d'initier prématurément la formation d'un couvert de glace hâtif. Ainsi, l'estacade flottante permet de réduire les quantités de frazil susceptibles d'atteindre le centre-ville de Saint-Raymond situé 18 kilomètres plus en aval (Morse et coll. 2021). Ce contrôle d'un phénomène naturel permet également de réduire le volume du barrage consolidé de frazil qui en résulte généralement et qui peut causer des inondations par sa seule présence ou en favorisant la formation d'un embâcle par l'accumulation des trains de glaces.

Au site du PK 24, l'estacade flottante agit comme une passoire ou un peigne captant le frazil transporté par le courant. Ceci permet la formation d'un barrage de frazil susceptible de remonter graduellement vers l'amont. Au-delà d'une certaine distance, le couvert de glace s'appuie sur les rives, s'épaissit et devient plus résistant pour amortir pendant un certain temps les trains de glaces en transit lors de la débâcle printanière. Ainsi, les contraintes appliquées sur le câble et les ancrages de l'estacade s'avèrent limitées. Cette action permet de causer un déphasage dans le temps entre la vague d'eau et celle de la glace. Ce déphasage écrête la crue ressentie au centre-ville, situé 18 kilomètres en aval. De plus, un couvert de glace formé tôt en saison joue un rôle d'isolant qui protège l'eau du froid et prévient la formation de grande quantité de frazil. La majorité du volume

de glace épargné dans le secteur du centre-ville s'avère être du frasil qui n'a pas été créé en raison d'un couvert de glace dont la formation est devancée.

L'estacade flottante du PK 24 agit sur l'origine et l'ampleur des bouchons de frasil en transit vers l'aval. Plus on retient de frasil en amont du PK 24, moins celui-ci devient disponible pour obstruer le tronçon voisin du centre-ville de Saint-Raymond.

### 3.4.2 Choix du site

Le site du PK 24 est situé dans un environnement forestier (carte 1). La pente, la morphologie de la rivière et leurs effets sur l'hydrodynamique et la formation des glaces contribuent à déterminer le choix d'un site favorable à l'implantation de l'estacade flottante.

En amont du PK 24, l'écoulement est trop rapide ( $> 0,7$  m/s) pour permettre de capter le frasil sans une reconfiguration importante de la rivière. En aval, l'écoulement est soit trop rapide ou bien les tronçons plus lenticulaires sont trop éloignés d'une route d'accès favorable à la mise en place saisonnière de l'estacade. Cependant, le PK 24 est situé dans un bief aux vitesses d'écoulement plus lentes et il est facilement accessible par une route existante.

Au PK 24, le bassin versant de la rivière Sainte-Anne possède une superficie de  $550 \text{ km}^2$  comparativement à  $760 \text{ km}^2$  vis-à-vis du centre-ville (Morse et coll. 2021). La largeur de la rivière est de 47 m au droit de l'estacade.

### 3.4.3 Description

L'estacade flottante amovible reliant une rive à l'autre est constituée de deux ancrages en acier, d'un câble flottant auquel sont fixés plusieurs têtes d'épinettes ou de sapins ainsi que des flotteurs de plastique visant à maintenir une flottabilité optimale en présence de frasil et même parfois de débris légers transportés par le courant. Ce dispositif placé en travers de la rivière sert à retenir le frasil en amont immédiat lors de sa progression vers l'aval. Avec la poussée du courant, le câble adopte la forme d'une parabole sous tension.

Le câble de 60 mm prend la forme d'une corde souple de type D12 plus SK78 distribuée par Marlow Ropes de Vancouver. Elle est faite de fibre très résistante en polyéthylène de type *Dyneema*<sup>TM</sup> qui la rend aussi résistante que l'acier, mais suffisamment légère pour lui permettre tout juste de flotter. Le câble possède en effet une charge de travail de 24,75 tonnes et une charge de rupture de

99 tonnes (Lafleur et Morse 2017). Elle est munie d'un œil de fixation épaissi aux deux extrémités pour faciliter son attache à une manille elle-même fixée à une chaîne en acier. Le câble est ancré chaque automne à une dizaine de mètres de chacune des rives, sur la terrasse fluviale.

Les dispositifs d'ancrage ont été mis en place en forant un trou dans le sol à un angle de 45° incliné vers l'aval. Un tube protecteur est inséré dans le trou afin d'y glisser une tige métallique par la suite cimentée avec un coulis approprié. En rive gauche, le dispositif d'ancrage est inséré dans le dépôt de sable, de till, puis dans le roc sous-jacent, jusqu'à une profondeur de 4,5 m. En rive droite, l'ancrage est inséré jusqu'à de 26 m de profondeur dans les dépôts meubles, sans toutefois avoir atteint le roc du Bouclier canadien.

Le dispositif d'ancrage peut résister à des contraintes ou des forces supérieures de 30 % à celle du câble afin de le protéger en cas de dépassement de sa capacité. Le lien entre l'ancrage dans le sol et le câble est assuré par une chaîne d'une force de rupture de 131 t, une maille fusible de 73 t et une manille, toutes trois en acier (Lafleur et Morse, 2017, figure 23).



**Figure 23 : Ancre, manille, joint fusible et chaîne. En médaillon, texture du câble sous tension.**

Les têtes d'épinettes sont coupées peu de temps avant leur mise en place afin qu'elles soient munies de leurs aiguilles avec leurs tiges jeunes, flexibles et résilientes afin de résister favorablement et en souplesse aux contraintes mécaniques. Des flotteurs en plastique contribuent à augmenter et maintenir en surface le câble avec les épinettes (figure 24). Le dispositif joue le rôle ainsi d'une passoire de retenue du frasil qui flotte à la surface toute en laissant l'eau circuler en dessous (figure 25).



**Figure 24 : Estacade flottante avec câble, sapins et flotteurs en plastique (12 novembre 2020).**



**Figure 25 : Estacade de rétention du frasil fait d'un câble flottant et d'épinettes (9 décembre 2016).**

#### 3.4.4 Travaux

Les travaux ont été réalisés en décembre 2016 sous la supervision de l'équipe de l'UL. L'installation des ancrages a été réalisée par l'entrepreneur Cimota et son sous-traitant Samson et Frères pour forer le sol, entre les 5 et 8 décembre 2016.

La mise en place du câble se fait chaque automne par les employés du service des Travaux publics de la Ville. L'assemblage du câble estacade avec les têtes d'épinettes ou de sapin et les flotteurs en plastique se fait hors de la rivière, sur le chemin d'accès dont le tracé a été orienté pour faciliter ce travail. Une canne à pêche avec une corde à lancer est d'abord utilisée pour faire traverser une petite corde (3 mm) à la rivière. La petite corde à lancer est par la suite attachée à une seconde

corde de taille moyenne de 13 mm et utilisée pour traverser la rivière. Cette corde moyenne sert à tirer le gros câble flottant en le tractant avec une camionnette aux quatre roues motrices. Tout le travail de mise en place saisonnier requière 8 ou 9 personnes disposées sur les deux rives et il est réalisé en 2 heures.

Lors de l'enlèvement de l'estacade, l'utilisation d'une tractopelle de type « pépinière » est généralement nécessaire en raison de la présence de débris coincés après le câble. Cette machinerie sert à tirer l'estacade, mais également à enlever, défaire et transporter les amas de débris de bois et de sable agglomérés autour du câble. (figure 26)

En dollars de 2016, le coût d'installation des ancrages était de 24 500\$ et celui du câble avec ses attaches connexes de 17 600\$. Avec les salaires et les honoraires, le coût total est de l'ordre de 70 000\$. À noter que les honoraires du professeur Brian Morse pour la conception et la gestion du projet ne sont pas pris en compte dans le montant total présenté dans l'étude de Lafleur et Morse (2017).



**Figure 26 : Amas de débris et de sables agglomérés autour du câble estacade le 10 mai 2021.**

Afin d'améliorer l'effet de l'estacade flottante, l'aménagement d'un barrage de neige artificielle a été testé au début des hivers 2017-18 et 2018-2019. L'idée ici était d'excéder la capacité locale de transport de la rivière afin de forcer la rétention du frasil et de la neige artificielle produite sur le site. Ce barrage de neige a été produit à l'aide d'un canon à neige en utilisant l'eau pompée de la rivière Sainte-Anne en continu pendant plusieurs jours. Plusieurs tonnes de neige par heure ont été soufflées sur le couvert de glace nouvellement formé en amont de l'estacade flottante (figure 27).

L'amas de neige artificielle a par la suite été replacé sur la glace avec une excavatrice pour former un barrage de neige durcie, perpendiculaire à la rivière (figure 28).

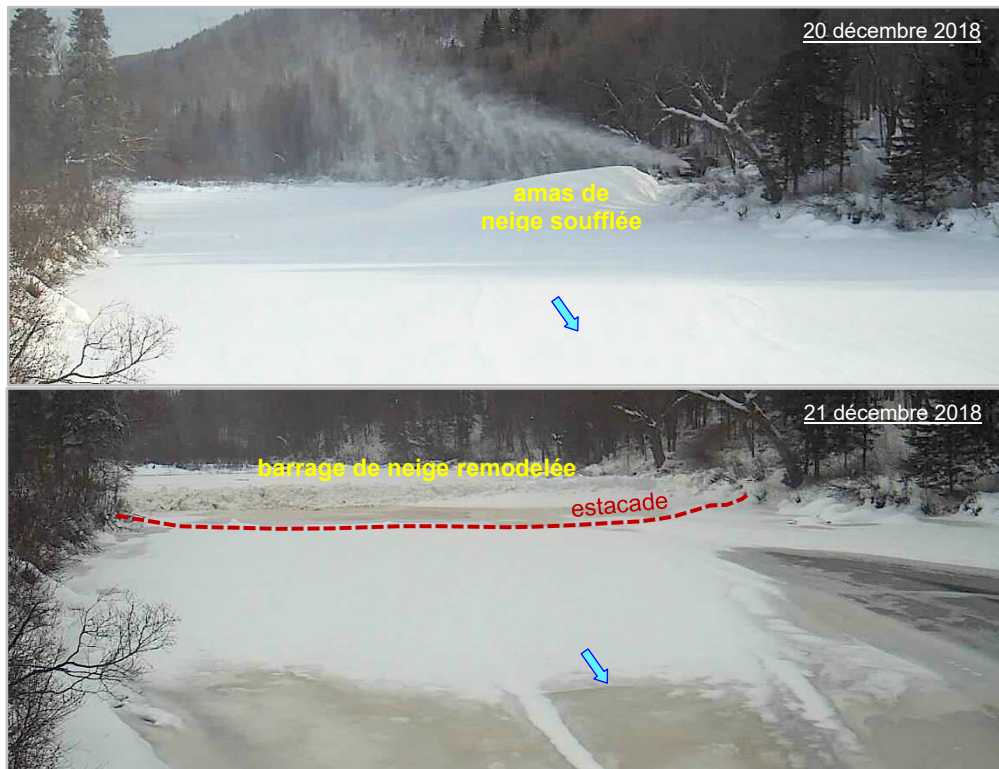


Figure 27 : Amas de neige soufflée et barrage de neige remodelé par la machinerie le lendemain.

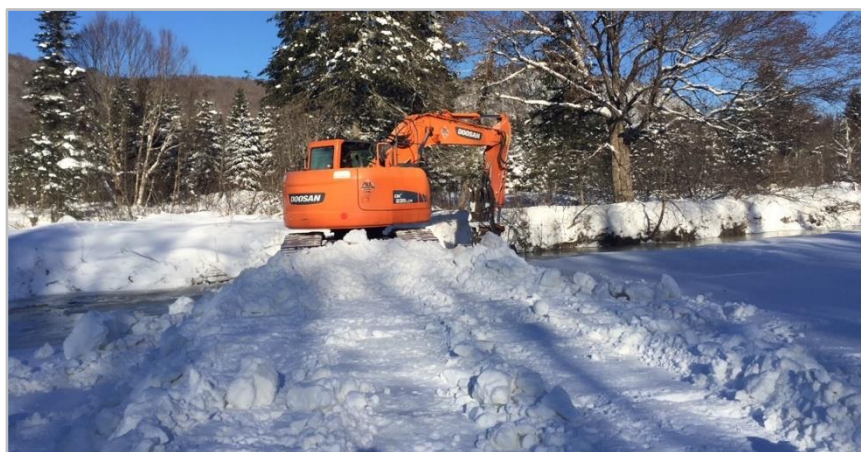


Figure 28 : Aménagement du barrage de neige par une excavatrice (15 décembre 2017).

#### 3.4.5 Aspects environnementaux

La mise en place de l'estacade flottante a fait l'objet d'une demande d'autorisation au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC) en août 2016. Cependant, cette demande incluait initialement l'aménagement d'un seuil de gros blocs rocheux à l'aval de l'estacade et son traitement par le MDDELCC demandait plusieurs mois. En 2016, l'estacade flottante n'étant pas assujettie à une demande de permis complexe, la décision a été prise de reporter la construction du seuil.

Il convient de mentionner que les employés de la VSR préparent méticuleusement et réalisent chaque installation et désinstallation de l'estacade en prenant toutes les mesures nécessaires afin de protéger la qualité du milieu aquatique.

#### 3.4.6 Suivi et efficacité

L'estacade flottante mise en place au PK 24 a fait l'objet d'un suivi de son efficacité dès sa mise en place en décembre 2016. Une caméra de surveillance alimentée par un panneau solaire a notamment été installée sur un arbre à l'aval du seuil et orientée vers l'amont. Les images de cette caméra sont régulièrement observées par le spécialiste en dynamique des glaces, surtout durant la formation du couvert de glace par la rétention du frasil, mais également durant l'hiver et lors des débâcles, qu'elles soient au début, au milieu de l'hiver ou au printemps. Cette station possède également les instruments suivants en plus de la caméra:

- une sonde à pression du niveau et de la température de l'eau;
- une sonde à neige;
- un pluviomètre;
- une sonde à pression, température et humidité de l'air.

Avant même l'installation de l'estacade, l'analyse hydraulique réalisée en 2017 statuait que les conditions nécessaires à la rétention du frasil n'étaient pas respectées environ 90 m en amont, retardant ainsi la propagation du couvert à l'amont (Simard-Robitaille et coll., 2019). Ainsi, dès la conception de l'estacade, l'aménagement d'un seuil rocheux en aval s'avérait nécessaire pour obtenir le rendement attendu.

En utilisant le modèle de formation de glace de Turcotte et Morse (2016) et les observations des photos de la station, il a été possible de déterminer le nombre de jours nécessaires pour former un couvert de glace complet et arrêter le transit du frasil en aval, le débit moyen journalier et le nombre

de degrés-jour de gel cumulé (DJGC). Ce modèle a permis de paramétrer les effets des aménagements au PK 24 pour ensuite les comparer à la simulation sans aucun aménagement pour ces mêmes années. Ainsi, on peut simuler la masse de glace épargnée plus en aval, soit au bief voisin du centre-ville de Saint-Raymond. Les résultats sont présentés au tableau 2.

**Tableau 2 : Performance de l'estacade seule au PK 24**

Hiver	Aménagement	Nombre de jours avant la fin du transport de frasil	Débit moyen journalier à Chute-Panet (m <sup>3</sup> /s)	DJGC <sup>1</sup> associé	Masse de glace épargnée au centre-ville (kilotonnes)
2014-2015	Aucun	25	25	141	-
2015-2016	Aucun	48	23	134	-
<b>Moyenne 2014-2016 :</b>		<b>37</b>	<b>24</b>	<b>138</b>	-
2016-2017	E	9	18	162	0
2017-2018	E + N	32	21	197	65
2018-2019	E + N	28	16	217	3
<b>Moyenne 2016-2019 :</b>		<b>23</b>	<b>18</b>	<b>192</b>	<b>23</b>

<sup>1</sup> : DJGC : Degré-jour de gel cumulé

E : Estacade flottante de conifères

E + N : Estacade flottante de conifères et seuil de neige artificielle

L'estacade flottante a démontré une efficacité mitigée entre décembre 2016 et 2018. La moyenne de la masse de glace évitée dans le bief du centre-ville est de 23 kilotonnes. Cela représente moins de 10 % de la masse moyenne annuelle du barrage consolidé de frasil. De plus, le nombre de jours avant la fin du transport de frasil en aval du PK 24 n'a pas été sensiblement diminué par rapport aux deux hivers de référence (2014-2015 et 2015-2016). D'ailleurs, le nombre de DJGC est en moyenne plus élevé après l'aménagement de l'estacade seulement. Cela signifie que l'hiver était plus avancé lors de ces hivers que pour les hivers de référence. La discussion sur ces résultats est ventilée davantage à la section 3.5.5. Concernant l'aménagement de barrage de neige artificielle dans la rivière en amont de l'estacade, il a été conclu que cette approche était trop coûteuse et peu efficace (Turcotte et Morse et coll., 2018).

À la suite de débâcles mi-hivernales, il a été observé que les conifères fixés à l'estacade perdent leurs aiguilles et quelques branches. Dans certains cas, c'est toute une section de conifère qui est arrachée. De plus, chacune des 3 bouées peut être emportée lors des débâcles. Il en résulte que la capacité de rétention du frasil lors de la reprise des glaces diminue.

Les observations lors des suivis rappellent l'importance de surveiller les divers aménagements et d'y apporter, au besoin, les mesures correctrices appropriées (figure 29). Dans un milieu naturel, il peut s'avérer difficile de prédire toutes les situations qui pourraient porter préjudice à un tel aménagement (accumulation de débris, vandalisme, broutement, etc.). Notons que la durée de vie du câble est estimée de 15 ans.



**Figure 29 : Usure du câble de l'estacade par le frottement contre une tige d'arbuste (12 juin 2019).**

### **3.5 Seuil de blocs rocheux au PK 24**

#### **3.5.1 Fonctions recherchées**

Le rôle du seuil est de former un plan d'eau plus calme pour favoriser la rétention du frazil par l'estacade flottante. La vitesse de l'écoulement passe ainsi de 0,7 m/s à 0,25 m/s permettant d'obtenir un nombre de Froude inférieur à 0,1 sur une distance de 700 m en amont du seuil (Simard-Robitaille et coll. 2019). L'installation de l'estacade flottante correspond finalement aux conditions hydrométéorologiques choisies pour créer des conditions hydrauliques favorables à la formation d'un couvert de glace hâtif.

Le couvert de glace formé par le complexe seuil-estacade permet également de freiner temporairement les trains de glace qui descendent la rivière en amont du PK 24. Ce phénomène crée un déphasage entre l'onde de crue qui amorce une débâcle et les trains de glace associés (Morse et coll. 2021). Ceci a pour effet de limiter la quantité de glace susceptible d'arriver prématurément au centre-ville et prévenir la formation d'un embâcle, ou, à tout le moins, la taille de l'embâcle.

### 3.5.2 Description

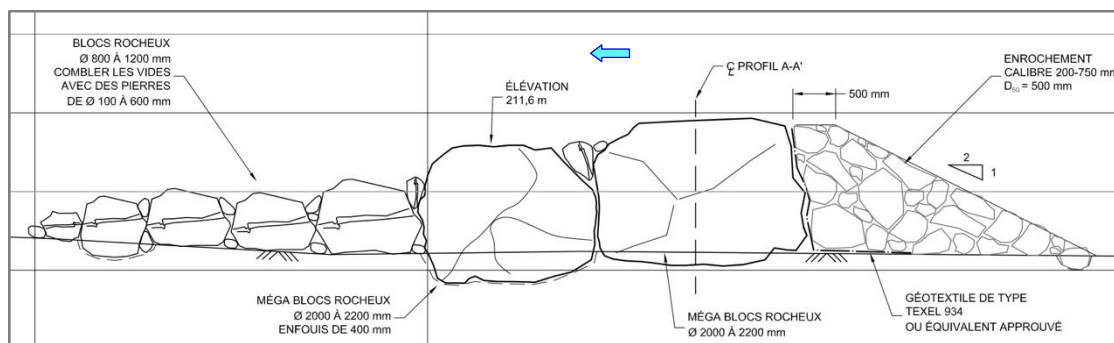
Le seuil en question est placé en travers de la rivière et mesure 55 m de longueur. Il est situé à environ 15 m en aval de la parabole formée par l'estacade flottante. Pour augmenter sa résistance aux contraintes mécaniques induites par l'écoulement des eaux et des glaces, l'ouvrage prend la forme d'une arche pointant vers l'amont et appuyée sur les rives (figure 30). Il est constitué de deux rangées de mégablocs de granite dont les plus gros mesurent 1,8 m de hauteur et pèsent environ 10 tonnes (figure 31). Un géotextile placé à la verticale à l'amont des mégablocs en assure l'étanchéité. La géométrie et la granulométrie des éléments situés en amont et en aval de l'ouvrage permettent la libre circulation du poisson pendant les étiages estivaux.

Mentionnons que les rives voisines du seuil sont stabilisées par un enrochement de calibre 200-750 mm pour prévenir leur érosion et le contournement possible de l'ouvrage. En rive gauche, le replat surmontant le talus riverain est stabilisé par une natte de type BioD-Mat 90. L'ensemencement et la plantation d'arbustes favorisent la végétalisation et la stabilisation du sol (figure 30).

L'ingénierie du projet a été complétée par les auteurs qui ont ajusté le concept, précisé les formes de l'aménagement, préparé les plans et devis, coordonné sa réalisation et obtenu les permis.



**Figure 30 : Seuil de blocs rocheux destiné à réduire la vitesse de l'écoulement (5 septembre 2020).**



**Figure 31 : Vue en coupe du seuil de blocs rocheux du site du PK 24.**

### 3.5.3 Travaux

La construction du seuil de mégablocs rocheux a été réalisée en deux phases, soit à l'automne 2019 et durant l'été 2020. Mentionnons que le certificat d'autorisation a été délivré le 1<sup>er</sup> novembre 2019 par MELCC. Un avis précisant la future date de délivrance avait été obtenu quelques jours auparavant permettant l'amorce des préparatifs et de certains travaux hors des zones réglementées.

La première phase a débuté le 31 octobre et s'est terminée 7 novembre 2019. En raison de la date tardive et considérant les besoins en prévention des inondations, cette première phase visait à mettre en place une partie des blocs rocheux du seuil sous la forme d'une berme de travail qui offrait malgré tout une partie de l'effet recherché par le seuil avant l'hiver 2019-2020. Ainsi, le seuil a pu être complété durant une période plus favorable de l'été 2020 suivant, notamment à l'aide d'une partie des matériaux déjà en place.

Le 31 octobre a été consacré à des travaux d'aménagement d'un chemin d'accès hors de la bande riveraine. L'aménagement du chemin d'accès s'est terminé le lundi 4 novembre après 3 jours de travail. De fortes pluies avaient provoqué une crue débutant le vendredi et se poursuivant durant la fin de semaine, avec une pointe de 430 m<sup>3</sup>/s voisine d'une crue de récurrence 2 ans, selon l'enregistrement de la station de Chute-Panet à 25,3 km plus en aval.

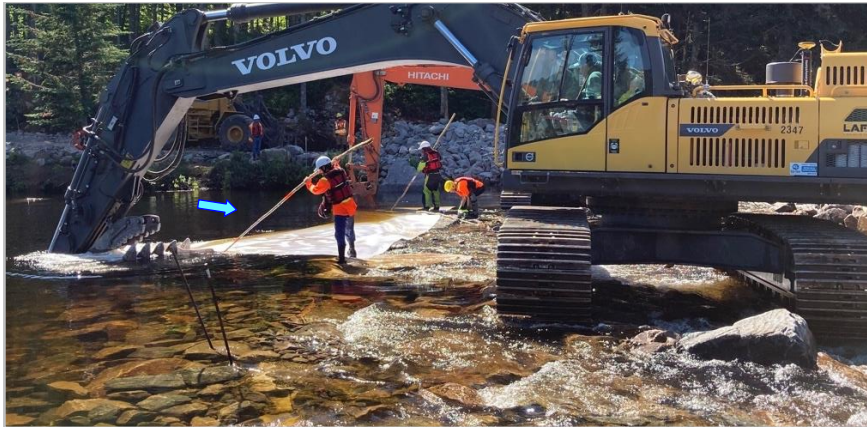
La mise en place des blocs rocheux et le façonnement de la berme de travail ont été réalisés du 3 au 7 novembre à l'aide d'un chargeur sur roues et d'une excavatrice de 50 tonnes munies d'un ponce (figure 32). La température sous le point de congélation et les chutes de neige ont forcé l'arrêt des travaux mettant un terme à leur première phase.



**Figure 32 : Mise en place des blocs rocheux sous la forme d'une berme de travail le 7 novembre 2019.**

La seconde phase des travaux s'est déroulée du 30 juin au 15 juillet 2020. La stabilisation des rives et la construction du seuil ont nécessité 5 jours de travail à partir de la berme de travail déjà existante, depuis l'automne précédent. La remise en état du site et l'aménagement de la petite terrasse voisine de la rive gauche, en vue de sa végétalisation, se sont déroulés les 8 et 15 juillet.

La majorité des mégablocs et blocs rocheux d'un calibre variant de 800 à 2 200 mm a été déposée sur le lit de la rivière. Des pierres plus petites sont placées pour combler les vides entre les mégablocs et entre les blocs. Une seconde excavatrice de 21 tonnes s'est jointe à celle de 50 tonnes afin d'accélérer les travaux. Un géotextile de fort calibre a été mis en place sur la face amont des mégablocs à l'aide de l'excavatrice et de perches en bois afin d'augmenter l'imperméabilité du seuil pour favoriser le rehaussement du niveau d'eau en périodes d'étiage sévère (figure 33). Le géotextile contribue aussi à augmenter la cohésion entre les diverses composantes du seuil; sa solidité en est accrue. Le rabat de géotextile appuyé sur le lit est stabilisé par un enrochement de pierres de calibre 150 à 750 mm.



**Figure 33 : Installation du géotextile à l'amont des blocs rocheux le 2 juillet 2020.**

Les deux rives ont été stabilisées de part et d'autre du seuil pour protéger les endroits excavés et prévenir l'affouillement à l'interface entre le seuil et les rives. Pour assurer un bon appui à l'endroit le plus sollicité en rive gauche, le seuil se prolonge dans la terrasse fluviale jusqu'au dépôt de till plus solide. À cet endroit, une natte de fibre de coco biodégradable de fort calibre de type BioD-Mat 90 est installée sur le sol afin d'assurer sa stabilité lors des fortes crues et durant la période de rétablissement de la végétation par des plants d'arbustes d'espèces indigènes et des herbacées ensemencées.

La construction du seuil et la stabilisation des rives ont exigé 1 480 tonnes de pierres, blocs et mégablocs.

Les travaux ont été exécutés selon la méthode des dépenses contrôlées par le Service des travaux publics de la Ville. L'entreprise Excavation Lafontaine a réalisé la mise en place, tandis que la pierre et les blocs ont été principalement fournis par Pax Excavation. Une douzaine de mégablocs de taille provenaient cependant d'une carrière de l'entreprise Granicor à Rivière-à-Pierre. La gestion du camionnage a été confiée à Excavation Lafontaine. Les travailleurs en rivière et la sécurité aquatique ont été fournis par l'équipe d'experts en eau vive Sauvetage Nautique SRS. Les travaux de mise en place du BioD-Mat 90 et de végétalisation ont été faits par Pépinière et paysages Marcel Marin. La surveillance ainsi qu'une partie du travail de contremaître et de manœuvre sur la rivière a été assurée par Simon Bélanger d'ENI.

Les travaux ont impliqué des coûts de 267 000\$, avant les taxes, en dollars de 2019 et 2020. Ces coûts excluent les frais pour la préparation des plans et devis, des demandes d'autorisation, la compensation monétaire environnementale et le suivi de la libre circulation du poisson qui s'élèvent, en date de 2023, à 90 851\$, sans les taxes. À ceci s'ajoutent 5 % de frais de gestion pour un total

d'environ 376 500\$ (Morse et coll., 2021). Tous ces frais ont été partagés par le MSP (75 %) et la Ville de Saint-Raymond (25 %).

### 3.5.4 Aspects environnementaux

Les deux aspects environnementaux d'intérêt pour le seuil concernent la dynamique sédimentaire ainsi que la circulation des poissons et les modifications de son habitat.

#### ***Dynamique sédimentaire***

Lors des crues, des sédiments grossiers, comme des galets et des sables se sont accumulés en amont du seuil, principalement par le transport en charge de fond. Nos observations de la dynamique sédimentaire de la rivière Sainte-Anne suggèrent que ces accumulations ne combleront qu'une partie du « réservoir » en amont du seuil, soit moins de la moitié de la profondeur, peut-être le tiers. Les vitesses d'écoulement en présence de cette accumulation de sédiments ne seront que légèrement accélérées par rapport à un réservoir sans déposition. Ceci maintiendra les vitesses en deçà des valeurs recherchées de l'écoulement pour la rétention du frasil. Les conditions propices à la formation d'un couvert de glace précoce seront maintenues sur plusieurs centaines de mètres en amont du seuil.

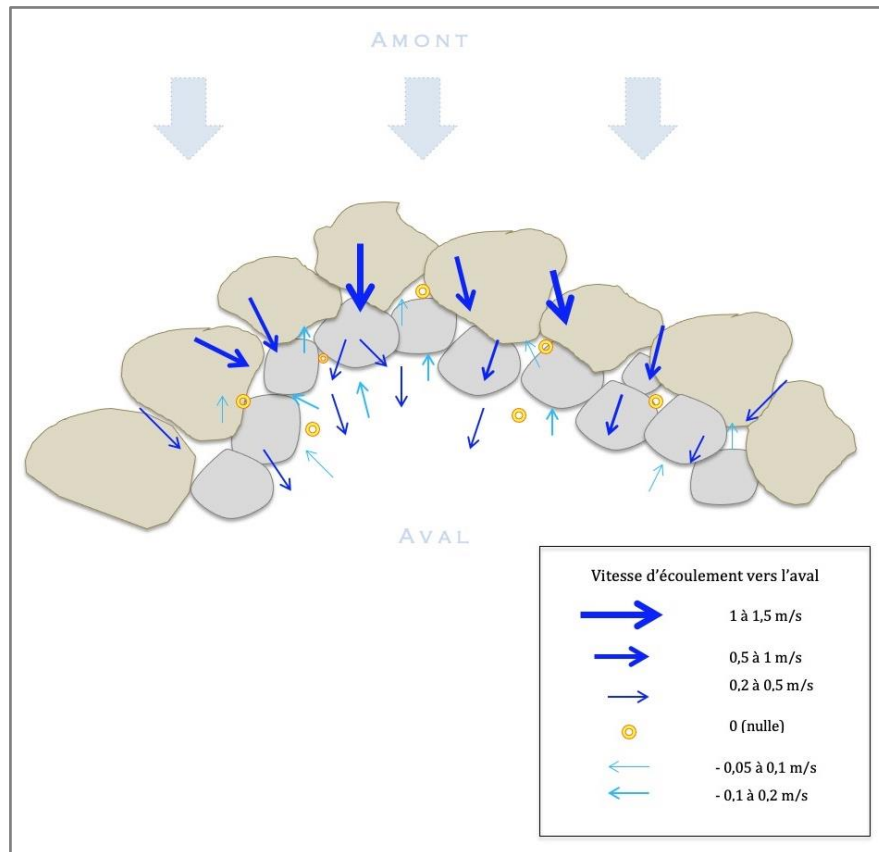
#### ***Poisson et son habitat***

Le seuil est situé dans une mouille ou une fosse. La majorité de la partie aval du seuil est toujours inondée par une profondeur d'environ 1 m, même en étiage. Le poisson y circule sans encombre et il peut alors accélérer pour franchir le petit rapide formé par le seuil.

Une échancrure légèrement plus basse concentre les eaux sur une largeur de 8 m pour en assurer une plus grande profondeur en étiage. La simulation à l'aide du logiciel HEC-RAS précise que la lame d'eau, lors d'un débit exceptionnellement faible de 2,5 m<sup>3</sup>/s, aura une hauteur de 18 cm, ce qui demeure suffisant pour permettre la circulation du poisson. Un suivi de l'état des conditions de montaison du poisson a été réalisé par un biologiste, notamment un mesurant les vitesses d'écoulement sur le seuil et à sa proximité (Goulet, 2021). Son étude révèle que les conditions d'écoulement ne constituent pas un obstacle pour la remontée du seuil par l'omble de fontaine durant la période clé de ses déplacements, la fraie de septembre et octobre.

Par ailleurs, le déversoir formé par le seuil n'est pas uniforme, mais présente plutôt de multiples microvariations de formes et de hauteurs. Les conditions d'écoulement sont alors fort variables sur de courtes distances et très changeantes selon les variations de débits, et ce, fréquemment durant une même journée. Les grandes variabilités des conditions d'écoulement sont schématisées sur la

figure 34. Cette variabilité offre des conditions propices à la remonter du seuil par les poissons qui trouveront un endroit et des conditions d'écoulement qui leur conviennent, notamment des contre-courants, de microfosses pour accélérer avant de franchir les obstacles et autres.



**Figure 34 : Représentation schématique des microconditions d'écoulement sur un seuil de blocs.**

Par ailleurs, le seuil a contribué à diversifier l'habitat du poisson en créant, à l'amont, un milieu calme ou lentique qui est plutôt rare dans le secteur (figure 35). La superficie du milieu aquatique a été augmentée de 14 500 m<sup>2</sup> (1,45 ha) ce qui a augmenté d'autant l'habitat aquatique. La zone calme aménagée par le seuil procure une aire d'alevinage favorable à plusieurs espèces de poisson, notamment à l'omble de fontaine. Les productivités primaire et secondaire du milieu aquatique devraient augmenter. Les conditions sont de plus favorables à l'expansion d'un petit herbier aquatique épars existant dans la partie aval d'un chenal de crue. Il s'agit d'un gain net pour l'environnement naturel.

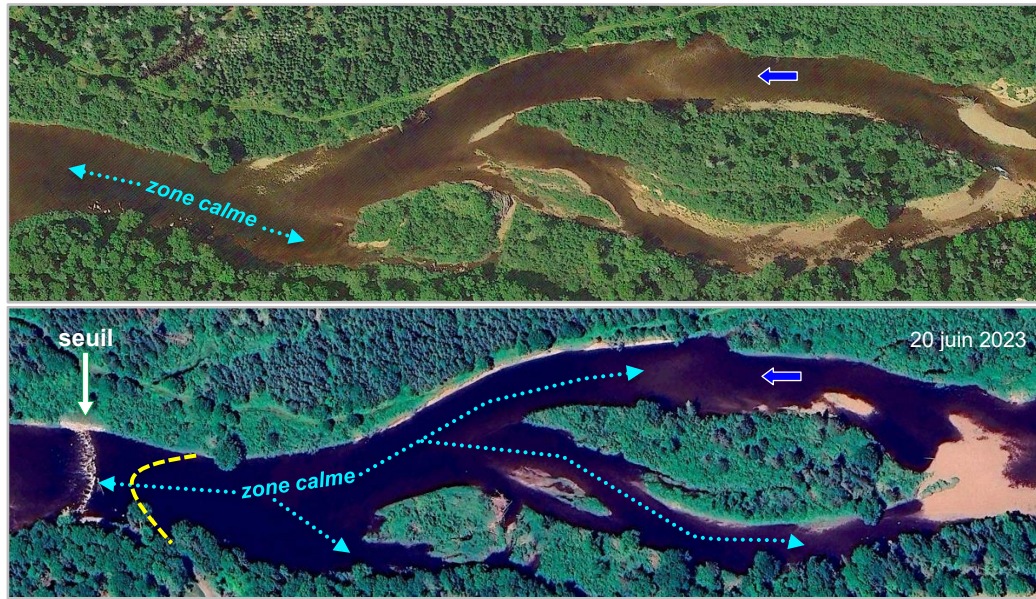


Figure 35 : Images satellitaires montrant la zone calme formée par le seuil (tirées de Google Earth).

### 3.5.5 Suivi et efficacité

#### ***Rétention du frasil***

La présentation des résultats des suivis et de l'efficacité doit considérer les périodes d'opération des différentes interventions. À ce sujet, le tableau 3 facilite la compréhension pour la période couvrant 9 hivers, qui s'étend de l'automne 2016 au printemps 2025. Les résultats des premières années ont été rapportés du tableau 2 à des fins de comparaison. Bien que ce bilan ne tienne compte que des interventions réalisées entre 2014 et 2023, il a été décidé d'y intégrer les données des hivers 2023-2024 et 2024-2025 en raison de leur intérêt pour établir un meilleur calcul du rendement.

Le suivi de la performance et de l'efficacité du seuil du PK 24 est présenté en détail dans l'étude (Morse et coll. 2021) pour les deux premiers hivers suivant sa mise en place, soit celui de 2019-20, avec une berme temporaire, et celui de 2020-2021 après son aménagement complet. On y retrouve également les résultats de suivi pour l'estacade seule, entre 2016 et le printemps 2019. La continuation du suivi de la performance a été assurée par Thomas S. Robitaille d'Environnement Nordique pour les 4 hivers suivants.

**Tableau 3 : Performance des aménagements au PK 24**

Hiver	Aménagement	Nombre de jours avant la fin du transport de frasil en aval	Débit moyen journalier associé à Chute-Panet (m <sup>3</sup> /s)	DJGC <sup>1</sup> associé	Masse de glace épargnée au centre-ville (kilotonnes)
2014-2015	Aucun	25	25	141	-
2015-2016	Aucun	48	23	134	-
<b>Moyenne 2014-2016 :</b>		<b>37</b>	<b>24</b>	<b>138</b>	-
2016-2017	E	9	18	162	0
2017-2018	E + N	32	21	197	65
2018-2019	E + N	28	16	217	3
<b>Moyenne 2016-2019 :</b>		<b>23</b>	<b>18</b>	<b>192</b>	<b>23</b>
2019-2020	B + E	1	36	44	62
2020-2021	S + E	6	31	7	6
2021-2022	S + E	11	23	65	98
2022-2023	S + E	2	29	28	353
2023-2024	S + E	6	25	33	77
2024-2025	S + E	6	16	45	365
<b>Moyenne 2019-2025 :</b>		<b>5</b>	<b>27</b>	<b>37</b>	<b>160</b>

<sup>1</sup> : DJGC : Degré-jour de gel cumulé

E : Estacade flottante de conifères

E + N : Estacade flottante de conifères et seuil de neige fabriquée artificiellement par un canon

B + E : Berme de travail et estacade flottante de conifères

S + E : Seuil rocheux et estacade flottante

Selon Morse et coll. (2021) l'aménagement seuil-estacade (S+E) offre le rendement espéré initialement lors de sa conception, car il a réussi à former un couvert de glace rapidement en interceptant le frasil lors de son transport vers l'aval (figure 36).

L'impact de la réduction des vitesses d'écoulement au PK 24 par le seuil rocheux est significatif. La moyenne du nombre de jours nécessaires pour former un couvert de glace stable qui stoppe le transit du frasil en aval est passée de 37, avant l'aménagement de l'estacade flottante, à 23 après celle-ci : un gain de 38 %. Puis à seulement 5 jours suivant l'aménagement du seuil, pour des gains de 86 % et de 78 %, respectivement en comparaison avec les conditions pré-2016 et pré-2019. Le couvert a même pu être formé avec des débits supérieurs alors que cela n'avait pas été constaté avec l'estacade seulement. Le nombre de DJGC associé à la date à laquelle le transport de frasil était achevé a considérablement diminué, passant d'une moyenne de 165 entre 2014 et 2019, soit les 5 premiers hivers d'observations, peu importe l'aménagement, à seulement 37 : une réduction de 79 %. En d'autres mots, **pour tous les tronçons en amont du PK 24, la fin de la prise des glaces a été devancée d'en moyenne 23 jours** selon les données des 11 derniers hivers. C'est

une semaine de plus que ce qui était attendu avant l'aménagement du tandem seuil – estacade flottante.

L'impact du rendement du PK 24 ressenti dans le tronçon du centre-ville se chiffre par la masse de glace épargnée (en kilotonnes, soit des milliers de tonnes). L'ajout de l'estacade sans le seuil avait épargné 23 kilotonnes en moyennes. L'aménagement combiné avec le seuil rocheux permet d'avoir un **rendement 7 fois supérieur**, en épargnant en moyenne **160 kilotonnes** de glace au centre-ville. D'ailleurs, l'impact a été déterminant lors des hivers 2022-2023 et 2024-2025 en évitant d'accumuler plus de 350 kilotonnes. Sans les aménagements au PK 24, la situation aurait été critique au centre-ville entre janvier et avril en rendant ce tronçon vulnérable de déborder à la moindre augmentation du débit.

Ainsi, cet ouvrage procure le meilleur rendement des activités permanentes réalisées à ce jour, avec la gestion de 20 à 25 % de la masse totale moyenne hivernale (400 000 tonnes) de glace/frasil en amont de la ville de Saint-Raymond. Il est primordial d'assurer son entretien.



**Figure 36 : Formation précoce du couvert de glace en amont de l'estacade le 14 novembre 2019.**

L'hiver 2020-2021 a été le premier en présence du système estacade-seuil complété avant la période de gel. À la suite d'une légère chute de neige et d'une seule 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 37).



**Figure 37 : Formation rapide du couvert de glace les 17 et 18 novembre 2020.**

Seulement 6 jours plus tard, le 24 novembre 2020, d'importantes quantités de frasil ont été retenues par le dispositif seuil-estacade, comme le montre bien la photographie aérienne prise par drone à la figure 38. On remarque également l'absence de glace à l'aval du dispositif de retenue. Le même phénomène s'est observé les autres années de suivi (figure 40). Cependant, s'il survenait une débâcle complète ou partielle lors de la prise des glaces, la reprise de rétention du frasil pouvait s'étirer sur une plus longue période, quoique modeste comparativement aux conditions avant 2019.



**Figure 38 : Vue aérienne de l'accumulation du frasil et de la prise des glaces le 24 novembre 2020.**

Certains hivers, une fonction secondaire du couple seuil-estacade s'est manifestée en offrant un avantage au-delà de ce qui était visé lors de la conception. La rétention du couvert de glace, même pendant quelques heures seulement, intervient sur la célérité, en séparant les vagues d'eau et de glace. Ce phénomène est montré à la figure 39. Ainsi, les conséquences de la débâcle sont écrêtées et amoindries dans le bief du centre-ville, 19 km en aval. En d'autres mots, cela réduit le risque d'engendrer des niveaux d'eau plus élevés à cet endroit.



**Figure 39 : Retenue des glaces au PK 24 lors de la crue printanière de 2022 entre (A) 14 avril 9h30, (B) 15 avril 9h30 et le départ des glaces peu avant 15h00 (C), respectivement, alors que les glaces étaient mobilisées en aval.**

Le tableau 4 montre les observations réalisées lors des débâcles mi-hivernales et printanières entre 2019 et 2025. En analysant ces résultats, le **seuil de mobilisation** du couvert de glace pourrait se situer maintenant à un débit équivalent de **190 m<sup>3</sup>/s** à Chute-Panet, lorsque le couvert a atteint sa résistance maximale quelques semaines après la fin de la période de prise des glaces. Ce seuil de mobilisation semble être moins affecté par une dégradation modérée du couvert lors de la débâcle printanière; il demeure résistant à ce débit malgré quelques mouvements locaux. Les observations de l'équipe de l'UL avaient déterminé qu'il s'établissait à 80 m<sup>3</sup>/s avant les aménagements. Cela permet de réduire la fréquence de débâcle pour ce secteur, résultant à des embâcles de moindre envergure pour tous les biefs en aval. Entre 2019 et 2025, les glaces ont été contenues lors de 4 événements de débâcles mi-hivernales, supérieures à un débit de 80 m<sup>3</sup>/s. En aval, la rivière était pratiquement libre de glace lors de ces crues.

**Tableau 4 : Effets des plus importantes crues mi-hivernales et printanières sur le couvert de glace au PK 24 depuis l'hiver 2019-2020**

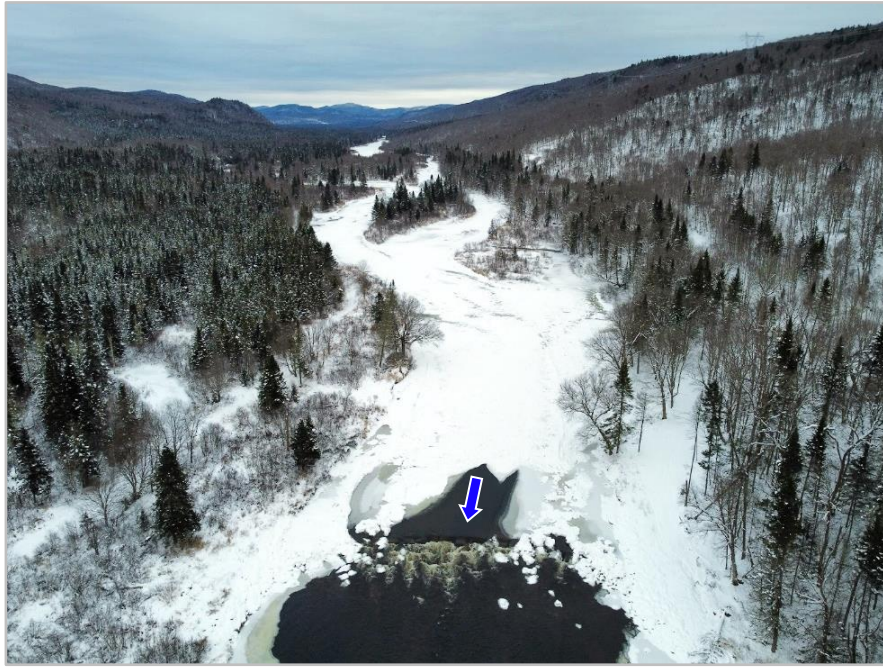
Date	Débit (m <sup>3</sup> /s)*	Résultat	Temps de rétention avant le départ
15 décembre 2019	120	Rétention	-
14 avril 2020	352	Mobilisation	0,5 jour
1-2 décembre 2020	355	Mobilisation	< 0,1 jour
25 décembre 2020	975	Mobilisation	< 0,1 jour
7 avril 2021	61	Fonte in situ	11,5 jours
12 décembre 2022	81	Rétention	-
15 avril 2022	170	Mobilisation	1,25 jours
7 décembre 2022	240	Mobilisation	1,25 jours
1 <sup>er</sup> janvier 2023	187	Rétention	-
18-19 décembre 2023	977 ‡	Mobilisation	< 0,1 jour
16 avril 2023	187	Mobilisation	1 jour
5 avril 2024	25	Fonte in situ	8 jours
30 décembre 2024	176 †	Rétention	-
14 avril 2025	50 ‡	Fonte in situ	6 jours

\* Débit maximal instantané enregistré à la station 050408 de Chute-Panet

† Événement équivalent à une crue standard d'environ **195 m<sup>3</sup>/s**, selon une répartition de la pluie équitable entre les bassins versants des rivières Sainte-Anne et Bras du Nord.

‡ Valeur provisoire. La valeur de décembre 2023 est évaluée à 977 m<sup>3</sup>/s par la DEH. Les auteurs de ce rapport ont la conviction que le débit maximum atteint a dépassé le millier de mètres cubes par seconde selon les observations réalisées sur le terrain pendant et après la crue, comparativement à celles du 25 décembre 2020 à 975 m<sup>3</sup>/s.

Les glaces se sont aussi mobilisées lors de 7 crues mi-hivernales ou printanières. Lors de ces événements, les glaces ont été retenues en amont entre moins d'une heure et jusqu'à 30 heures. Lors des débâcles printanières de 2021, 2024 et 2025, le couvert de glace a littéralement fondu *in situ*. Les glaces ont ainsi été retenues en amont de Saint-Raymond pendant entre 6 et 11,5 jours, soit 144 et 276 heures, respectivement. Pendant ce temps, le tronçon du centre-ville s'était libéré de ces glaces, permettant un transit sans obstruction des glaces morcelées provenant du nord du bassin versant. Le risque d'inondation par embâcle a donc été considérablement diminué. En effet, seules les glaces du bassin versant en aval du PK 24 peuvent être mobilisées pour un débit sous le seuil de mobilisation au PK 24. Cela réduit la fréquence du volume de glace des embâcles potentiellement menaçant pour le centre-ville de Saint-Raymond.



**Figure 40 :** Vue aérienne de l'accumulation du frasil et de la prise des glaces le 24 novembre 2022.

### ***Entretiens réalisés***

Quelques mois après la mise en place du seuil de blocs, une débâcle et une forte crue de la rivière Sainte-Anne sont survenues le jour de Noël 2020. Une pluie de 113 mm et une température chaude sont à l'origine de cette crue du 25 décembre avec un débit d'environ 980 m<sup>3</sup>/s enregistré à la station de Chute-Panet, soit un événement d'une récurrence d'environ 1:70 ans. Une telle crue a eu des effets sur le replat de la rive gauche dont la végétalisation ne faisait que débuter. La natte de type BioD-Mat 90 a subi des dommages, comme le montre la figure 41.



**Figure 41 :** Bris partiel du BioD-Mat et érosion du sol constatés en décembre 2020 et juin 2021.

Pour rendre le secteur de la rive gauche moins vulnérable à l'érosion, une intervention légère du type génie végétal avec des rangs de plançons a été tentée à l'automne suivant, en novembre 2021, durant la période de dormance des arbustes. Cette technique doit impérativement se faire durant la dormance des arbustes et, évidemment, hors de la crue printanière. Les aménagements ont été réalisés en une seule journée, le 4 novembre 2021, à l'aide d'une excavatrice de 15 tonnes et le travail de 3 personnes (figure 42). Le coût de cet aménagement était d'environ 7 000\$.



**Figure 42 : Mise en place du BioD-Mat 90 et des rangs de plançons le 4 novembre 2021.**

Toujours à la suite de la crue de Noël 2020, de gros débris de bois se sont accumulés sur le seuil et en amont de celui-ci. Certains ont pu être enlevés avec les équipements de la Ville lors de l'enlèvement du câble-estacade, mais la plupart étaient trop gros ou trop ancrés au lit de la rivière. Ils ont été enlevés avec une excavatrice-araignée spécialement mobilisée à cette fin de l'entreprise ExPente, le 19 août 2021 durant l'étiage estival (figure 43). Cette excavatrice-araignée utilise uniquement des huiles et graisses entièrement biodégradables selon les normes européennes les plus sévères. De plus, aucun aménagement, berme de travail ou autre n'est requis pour permettre l'accès et le travail en rivière. Ces deux aspects limitent au minimum les impacts potentiels sur le milieu aquatique.



**Figure 43 : Enlèvement de débris de bois et d'arbres entiers au site du PK 24 le 19 août 2021.**

La présence de l'excavatrice-araignée au site du PK 24 a également permis de replacer quelques blocs rocheux qui avaient été déplacés l'hiver précédent (figure 44). Le coût de l'enlèvement des débris et du remplacement des blocs était d'environ 3 100\$.



**Figure 44 : Mise en place de quelques blocs rocheux au seuil du PK 24 le 19 août 2021.**

Les observations d'avril 2024 ont permis de constater que la protection offerte par le BioD-Mat 90 n'a pas été suffisante pour résister aux contraintes induites par une seconde crue comparable à celle de Noël 2020, soit de 972 m<sup>3</sup>/s le 19 décembre 2023 (débit à la station de Chute-Panet). Puisque biodégradable, le BioD-Mat avait débuté sa décomposition et ainsi perdu une partie de sa résistance (figure 45). Les retiges de saule issues des rangs de plançons sont toujours vivantes, mais pas suffisamment développées pour amortir les vitesses d'écoulement et stabiliser les sols. Une autre intervention de stabilisation devra être mise en œuvre.



**Figure 45 :** Dommages à la petite intervention de génie végétal au PK 24 le 25 avril 2024.

### **3.6 Enlèvement de caissons de drave en aval**

#### **3.6.1 Fonctions recherchées**

L'enlèvement des caissons de drave dans la rivière Sainte-Anne à l'aval du centre-ville visait à éliminer un obstacle à la libre circulation de la glace vers l'aval. Les 42 caissons n'étaient plus utilisés depuis fort longtemps et l'entrave formée n'avait aucune utilité. Leur nombre exact, avant l'enlèvement de 2020, est difficile à préciser, car certains ont subi des dommages majeurs et pouvaient être issus d'un seul ouvrage ou d'un amalgame. Cette intervention a rapidement été identifiée comme prioritaire par l'équipe de l'Université Laval (Morse et Turcotte 2014). Les caissons étaient reconnus pour favoriser la formation d'embâcles de glace et augmenter les risques d'inondation au centre-ville (figure 46).



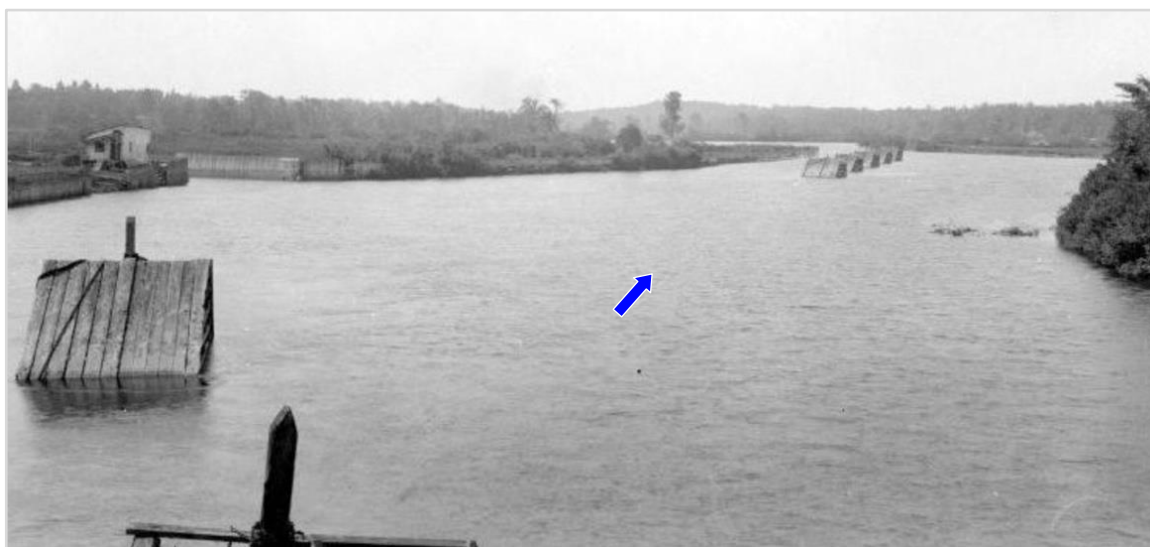
**Figure 46 :** Obstacles à l'évacuation des glaces par des caissons, le 31 mars 2015

Tout ce qui peut freiner l'évacuation des glaces dans ce secteur engendre l'augmentation du risque de former un embâcle dans les tronçons dans la zone de refoulement pouvant remonter également dans le Bras du Nord. Ainsi, la fonction principale recherchée favorise l'évacuation de la glace vers l'aval.

### 3.6.2 Description

Les anciens caissons de drave étaient situés légèrement en amont du barrage de Chute-Panet du PK 0,1 jusqu'au PK 3,5, immédiatement en amont du pont de la piste cyclable (carte 1).

Les caissons étaient composés de billes de bois assemblées en forme de boîtes remplies de pierres et de galets (figure 47). Avant leur enlèvement, ils étaient plus ou moins démantelés dû à l'exposition aux intempéries et aux poussées des glaces flottantes (figure 48). Plusieurs de ces caissons avaient été construits à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, à partir de 1898; ils avaient donc jusqu'à 122 ans au moment des travaux. Certains caissons de bois étaient entièrement détruits et seuls de la pierre ou des galets étaient présents sur le lit de la rivière (figure 49). Des caissons émergeaient au-dessus de l'eau en été et ceux, plus abimés, étaient immergés sous la surface de l'eau toute l'année.



**Figure 47 : Caissons photographiés en 1927 (Société historique de Saint-Raymond).**

Les travaux ont aussi impliqué le déplacement et le confinement des pierres et des galets dans la rivière, près des rives, de même que l'évacuation des pièces de bois et des composantes d'acier. Les composantes d'acier étaient principalement constituées de gros clous et des chaînes rouillées. La taille des caissons variait généralement de 6 x 6 x 4 m à environ 3 x 4 x 1,5 m pour les plus

petits. Ici, la plus petite dimension représente la hauteur au-dessus du lit de la rivière. Le volume cumulé des caissons et de leurs amas de pierres résiduels était d'environ 3 000 m<sup>3</sup>.



**Figure 48 :** Caisson de drave émergeant au-dessus de l'eau en août 2019.



**Figure 49 :** Pierres d'un caisson de drave en partie démantelé et sous l'eau en août 2019.

L'ouverture de la vanne du barrage de Chute-Panet a permis un abaissement du niveau d'eau du réservoir et des prises de photographies aériennes géoréférencées par un drone le 7 juillet 2020 (figure 50).



**Figure 50 :** Vue aérienne des caissons à la suite de l'abaissement du niveau d'eau, le 7 juillet 2020.

### 3.6.3 Travaux

Les travaux en rivière ont été réalisés du 10 août au 10 septembre 2020 par l'entreprise Pronex Excavation. La remise en état du site, notamment par l'ensemencement des sols, a été complétée le 21 septembre. Les plans et devis ont été préparés par ENI tandis que la surveillance des travaux au chantier a été assurée par Alain Desrosiers et Claude Beaulieu.

L'enlèvement des composantes des caissons a été fait par excavation. Cette dernière a été réalisée à l'aide d'une excavatrice de 20 tonnes montée sur un module de barges flottantes spécialement conçu au Québec pour des travaux en rivière et en faible profondeur. Une photographie de cet équipement avec sa barge de transport est présentée à la figure 51. Le dispositif utilisé comprenait deux barges d'environ 3 m sur 12 m solidement fixées ensemble et munies de 2 moteurs à turbine de 300 forces chacun. Ces moteurs, distancés l'un de l'autre, permettent à chaque barge de pivoter sur elle-même.

Pour permettre l'excavation, une des barges était munie de deux puissants stabilisateurs hydrauliques coulissants permettant un solide ancrage sur le lit de la rivière. Le tirant d'eau de la barge avec son excavatrice demeurait faible à seulement 40 cm. L'excavatrice est munie d'un DGPS permettant de positionner le godet à l'endroit voulu à quelques centimètres près. Les profondeurs d'excavation sont donc directement contrôlées par l'opérateur.



Figure 51 : Enlèvement des caissons avec l'excavatrice montée sur une barge (11 août 2020).

Le transport des matériaux a été complété avec la barge de transport (figure 52), spécialement conçue pour divers types de travaux en rivière. Une benne munie d'un mur poussoir du côté opposé à son ouverture permet de déposer avec précision les matériaux excavés.



**Figure 52 : Barge avec sa benne munie d'un mur poussoir (26 août 2020).**

Pour se vider, le mur poussoir de la benne est actionné pour permettre aux matériaux de glisser lentement vers l'ouverture et assurer le déchargement en pied de talus, sur la rive (figure 53). Une bavette d'acier inclinable oriente la sortie des matériaux à la hauteur désirée, pour placer les pierres et galets lentement sur le lit afin de réduire au minimum la turbulence et la remise en suspension de sédiments. Ainsi, les pierres ont été relocalisées et confinées le long des rives à sept endroits sélectionnés pour ne pas nuire au transit de la glace.



**Figure 53 : Mur poussoir actionné. Photo d'un autre projet prise en 2019 au lac Saint-Louis.**

Pour évacuer le bois, les pièces d'acier et les arbustes, la barge dotée d'une excavatrice s'est déplacée vers la rampe de mise à l'eau, au site de Chute-Panet, plus en aval. Un site d'entreposage temporaire permettant de compléter le tri, la valorisation et la disposition des matériaux à l'extérieur du site a été aménagé avec l'accord du propriétaire du terrain. Dans le cadre de cette intervention, aucune construction n'a été réalisée en rivière.

Les plans et devis prévoyaient initialement l'enlèvement de 28 des 40 caissons de drave inventoriés et qui formaient les principales entraves à l'évacuation des glaces. Parmi ces 28 caissons, deux sont presque complètement détruits et situés à l'embouchure de rivière Bras du Nord, dans une zone de faible profondeur (< 0,4 m). Le tirant d'eau plus grand des barges n'a pas permis d'y accéder pour les enlever. Le nombre de caissons à enlever était alors de 26. L'abaissement du niveau d'eau du réservoir en juillet 2020 et la prise de photographies aériennes par drone ont permis de reconsidérer la priorisation des caissons à enlever. Une modification aux autorisations environnementales a été demandée et obtenue au mois d'août 2020. Ainsi, l'enlèvement de 6 caissons supplémentaires a été autorisé pour un total de 32. Ces caissons supplémentaires ont pu être enlevés sans interruption des travaux.

Les travaux ont impliqué des investissements de 358 885\$, avant les taxes, en dollars de 2020. À ceci s'ajoutent les frais associés à la bathymétrie, la préparation des plans et devis, les études et les demandes d'autorisation environnementales ainsi qu'à la surveillance des travaux. Le montant total est alors de 524 807\$ avant taxes. Les frais ont été partagés entre le MSP et la Ville de Saint-Raymond.

#### 3.6.4 Aspects environnementaux

Les autorisations environnementales ont été délivrées en novembre 2019, tant pour le MELCC, le MFFP que le ministère des Pêches et Océans (MPO). À la mi-novembre, les glaces débutent leur formation dans la rivière Sainte-Anne et il était alors trop tard en saison pour amorcer les interventions de retrait des caissons. Les travaux ont donc été réalisés à la fin de l'été suivant, lors de conditions hydrologiques et météorologiques plus favorables.

Outre les mesures visant à éviter une contamination accidentelle de l'eau lors des travaux, peu d'enjeux environnementaux notables sont associés à l'enlèvement des caissons de drave. Pour l'habitat du poisson, mentionnons que le substrat de la zone d'étude est essentiellement sableux et que la pierre des caissons contribuait à une certaine diversification du milieu aquatique (BC2

Groupe Conseils 2019). Le confinement de la pierre en plusieurs sites en grande partie inondée, même en étiage, a contribué à conserver une certaine diversité de l'habitat aquatique (figure 54).



**Figure 54 : Pierre des caissons confinée au bas de la rive (26 août 2020).**

### 3.6.5 Suivi et efficacité

Lors de la débâcle printanière de 2019, la rétention des glaces par les caissons a été observée : les caissons ont dirigé les poussées du couvert directement vers la rive droite près du PK 1,1, freinant l'inertie du train de glace dans le réservoir du barrage de Chute-Panet. L'embâcle a perduré et les niveaux sont demeurés critiques en amont jusqu'au centre-ville et dans le Bras du Nord. L'efficacité de l'intervention d'enlèvement des caissons est difficilement mesurable. Cependant, les ingénieurs hydrauliciens spécialisés en dynamique des glaces qui ont travaillé plusieurs années sur la rivière Sainte-Anne sont convaincus du bien-fondé de l'intervention. Il s'agit de Benoît Turcotte (PhD), de Thomas Simard Robitaille (M.Sc.) et de Brian Morse (PhD).

L'enlèvement des 32 caissons de drave semble avoir été déterminant pour permettre l'évacuation des glaces lors de la montée de crue observée le 25 décembre 2020 ( $\pm 975 \text{ m}^3/\text{s}$ ), selon nos observations. L'agencement des caissons créait une obstruction significative à mi-parcours dans le réservoir du barrage de Chute-Panet (figure 46), le ralentissement de la glace sur ces derniers pendant cette débâcle hâtive aurait présenté un risque d'inondation accru associé à des dommages majeurs.

## 3.7 Stabilisation du talus riverain et reconstruction de la digue vers le PK 5,4

### 3.7.1 Fonctions recherchées

Le projet de stabilisation du talus riverain et la reconstruction de la digue vers le PK 5,4 avait deux objectifs. Assurer une protection supplémentaire contre les inondations en reconstruisant une digue

anti-débordement en décrépitude avec de nombreuses cavités (figure 55). Arrêter par la suite l'érosion du talus riverain qui supporte la digue. Celle-ci protège le secteur nord de Saint-Raymond, qui est occupé par 1 000 résidents et quelques commerces.

Une étude géotechnique réalisée par Englobe (Jean et Lévesque 2020) avait démontré que les talus riverains étaient susceptibles d'être affectés par un glissement de terrain. En effet, le talus silteux et argileux, dans sa partie inférieure, possédait des facteurs de sécurité variant de 0,65 à 0,95 selon les endroits, tandis qu'ils auraient dû être d'au moins 1,3 pour supporter de façon acceptable la digue anti-débordement.



**Figure 55 : Cavités dans l'ancienne digue en pierre vers le PK 5,4.**

### 3.7.2 Description

La digue possédait une hauteur d'environ 1,2 m et sa reconstruction était requise sur segment de 94 m de longueur. Peu d'espace est disponible entre le haut du talus et la rue Monseigneur-Vachon. Ainsi, la digue devait être étroite, mais suffisamment solide pour résister aux différentes contraintes mécaniques induites par la rivière lors des crues et par la dynamique des glaces particulières de la rivière Saint-Anne. La figure 56 montre des blocs de frasil consolidé surmontés de glace, le tout d'une dimension de 3 par 10 m (Turcotte et Morse 2015).



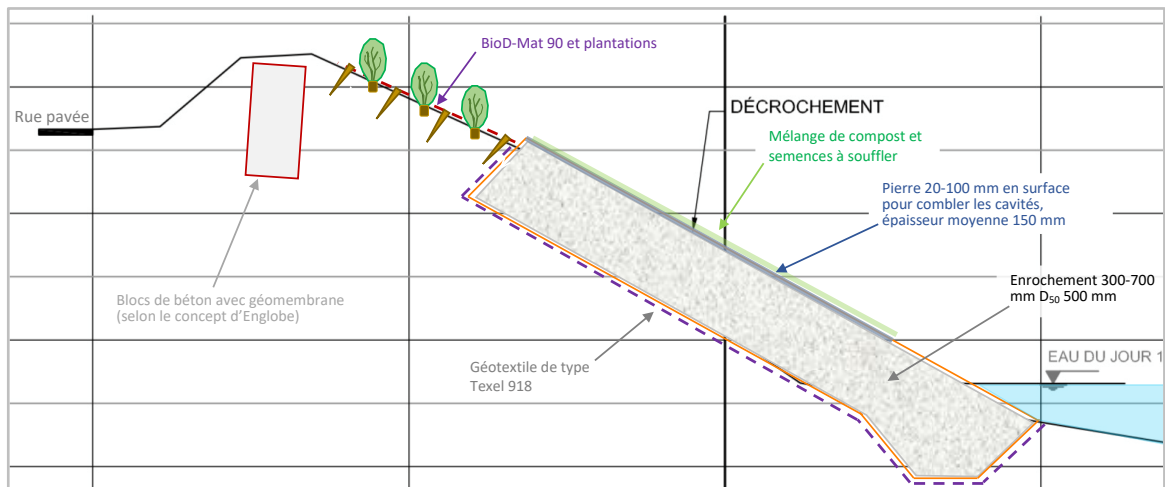
Tirée de Turcotte et Morse (2015)

**Figure 56 : Blocs de glace et de frazil consolidé (photo du 21 avril 2014 prise par David Godin).**

La stabilisation du talus riverain implique pour sa part deux segments de rive d'une longueur cumulée de 140 m (120 + 20 m). La hauteur moyenne du talus riverain varie de 6 à 9 m. Dans la partie aval, la rivière est plus profonde et près du tiers de la hauteur des talus est située sous l'eau, même en étiage (Bélanger et Desrosiers 2019). Dans la partie centrale et la partie aval, l'enrochement construit en 2020 possède une épaisseur de 1,5 m, une pente de 30° (1H : 1,75V) et une clé d'une profondeur de 1 m (figure 57). Pour sa part, l'enrochement plus court de la partie amont possède la même géométrie, mais son épaisseur est moins grande, soit de 1,2 m (figure 58). Les caractéristiques distinctes de l'enrochement dans la partie amont s'expliquent par une dynamique fluviale plus forte.



**Figure 57 : Creusage d'une clé par une excavatrice munie d'un bras de 26 m, le 23 septembre 2020.**



**Figure 58 : Vue en coupe des interventions dans la partie amont, la moins sollicitée.**

La partie centrale et aval est davantage exposée aux contraintes hydrauliques et mécaniques que la partie amont, car elle prend la forme d'une courbe externe de la rivière. Le talus riverain qui atteint plus de 6 m de hauteur est sollicité plus directement par la glace et par des vitesses de l'écoulement d'environ 3 m/s en crue (Fortier et Gauthier et 2009). Ces conditions exigent la mise en place d'un enrochement de fort calibre de 300 à 900 mm sur toute la hauteur du talus, sur le plus long segment de rive de 120 m de longueur (figure 57). L'élévation de la crête supérieure de cette partie de l'enrochement, ainsi que celle de la digue, passe de 138,3 m en amont à 138,1 m en aval. Ces élévations sont conformes aux recommandations du professeur retraité Brian Morse, de l'UL et correspondaient, selon les données disponibles en 2019, à une crue de récurrence 200 ans.

Pour sa part, l'élévation de la crête supérieure de la partie amont de l'enrochement est de 137,2 m, mais celle de la digue est plus haute à 138,5 m. Le calibre de l'enrochement est ici de 200 à 700 mm. La partie supérieure du talus riverain est tout de même protégée, mais par des aménagements de contrôle de l'érosion différents, qui évolueront vers des milieux riverains naturels. En effet, entre les élévations 137,2 et 138,5 m, le haut du talus a été protégé par une natte biodégradable de fort calibre de type BioD-Mat 90 et végétalisé par la plantation d'arbustes et par l'ensemencement d'herbacées indigènes.

Sur les deux parties constituées d'enrochements, les cavités présentes en surface ont été comblées de gravier de 2 à 10 cm de diamètre afin de favoriser une végétalisation partielle de l'ouvrage (figure 59). Sur ce gravier, un mélange de compost et de semences a été soufflé afin de fournir un substrat plus favorable à l'implantation et la croissance des végétaux (figure 60).



**Figure 59 : Enrochement recouvert de gravier afin de favoriser sa végétalisation le 8 octobre 2020.**



**Figure 60 : En A, compost et semences. En B, BioD-Mat et plantation sur la partie amont de la digue.**

Pour la digue, le concept retenu a été développé quelques années auparavant spécifiquement pour le secteur voisin localisé plus en amont afin d'assurer une stabilité et une étanchéité bien adaptées au milieu à un coût raisonnable (Charrois et Jean 2017). Une vue en coupe de la digue provenant du plan EN19-258 d'ENI est montrée à la figure 61. Elle est constituée d'un noyau prenant la forme d'un mur de blocs de béton superposés avec emboîtures, pour augmenter sa stabilité mécanique et d'une géomembrane étanche. Cette géomembrane est protégée contre l'abrasion et les perforations, surtout lors de la construction, par deux géotextiles placés de part et d'autre (figure 62). Le mur de blocs de béton est incliné de 8° vers la rivière pour mieux résister à la poussée

de la glace et aux pressions exercées par l'eau. Le mur, recouvert de sable et gravier, est densifié, puis végétalisé ou bien protégé par l'enrochement, selon les endroits.

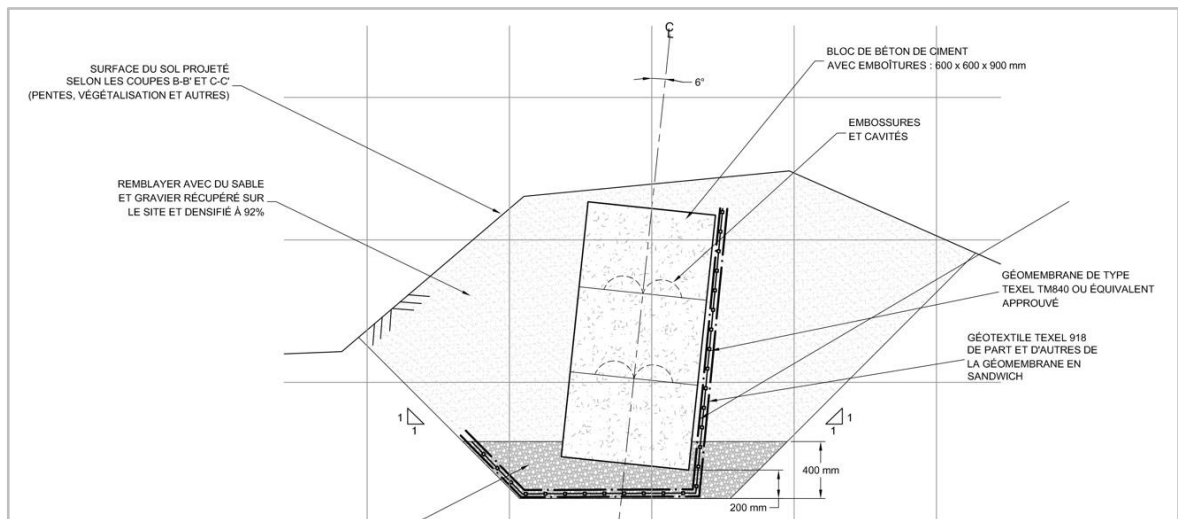


Figure 61 : Vue en coupe de la digue du plan d'Environnement Nordique de Bélanger et Beaulieu.



Figure 62 : Digue anti-débordement en construction le 25 septembre 2020.

### 3.7.3 Travaux

Les travaux ont été réalisés du 9 septembre au 28 octobre 2020 par l'entreprise Rochette Excavation. La surveillance de leur conformité aux plans et devis a été assurée par Simon Bélanger. Les travaux ont exigé l'utilisation de 5 470 tonnes de pierres, 94 m de mur de blocs de béton avec

ses géomembranes, 160 m<sup>2</sup> de BioD-Mat 90, la mise en terre de 55 plants d'arbustes et l'application du mélange de compost et semences sur une superficie de 2 100 m<sup>2</sup> (figures 60 et 65).

La hauteur importante du talus, son inondation potentielle sur une hauteur de plus de 3 m par endroits et la proximité d'une résidence ont posé certains défis à l'entrepreneur. Le creusage de la clé au pied du talus inondé et la mise en place de l'enrochement ont requis l'abaissement temporaire du replat du talus et l'utilisation d'une excavatrice puissante munie d'une flèche et d'un balancier (bras) hors norme, de 26 m de longueur (figure 57). Celle-ci a été mobilisée depuis de la région de l'Outaouais.

En raison du manque d'espace près d'un garage qui n'a pas pu être déplacé comme anticipé, un contrefort en acier d'environ 5 m de longueur a dû remplacer le remblai de sable et gravier pour offrir l'appui nécessaire au mur de blocs de béton de la digue, du côté opposé à la rivière (figure 63).



**Figure 63 : Contrefort en acier appuyant la digue (8 octobre 2020).**

Les coûts des travaux étaient de 544 644\$, avant les taxes (2020) (tableau 7, à la section 5.4). Des frais supplémentaires de 196 582\$ s'ajoutent au montant des travaux. Ils sont associés aux relevés, aux études géotechniques, à la préparation des plans et devis, à l'achat d'un petit terrain désormais non constructible, aux études et aux demandes d'autorisation et aux compensations environnementales ainsi qu'à la surveillance des travaux. Le montant total atteint 741 213\$ avant taxes. Les coûts ont été assumés à 75 % par le MSP et 25 % par la Ville de Saint-Raymond.

### 3.7.4 Aspects environnementaux

Les interventions ont exigé l'obtention d'autorisation environnementale selon la procédure en vigueur avant l'adoption du REAFIE. Un montant de 26 345\$ a été versé par la Ville à titre de compensation monétaire pour une modification du milieu aquatique par l'enrochement.

Une grande boîte en acier a été utilisée par l'entrepreneur afin d'éviter de mélanger de la terre avec la pierre. Comme le montre la figure 64, les camions-bennes reculent dans la boîte pour y verser leur chargement qui y demeure confiné jusqu'au moment où le godet de l'excavatrice se remplit de pierre. Cette mesure devrait être généralisée et imposée au devis, car elle permet d'atteindre quatre objectifs, soit :

1. réduire la mise en suspension de matières à texture fine (sédiments) dans la rivière afin d'en préserver la qualité;
2. limiter la durée des travaux et celle de leur impact sur le milieu aquatique en facilitant le remplissage du godet de l'excavatrice;
3. augmenter la solidité de l'enrochement en réduisant l'apport de sol fin qui forme une boue lubrifiante entre les pierres;
4. réduire les coûts en diminuant significativement le temps d'exécution.



**Figure 64 :** Boîte en acier pour éviter de mélanger de la terre avec la pierre. Cette mesure accélère aussi la réalisation des travaux et limite la durée de leur impact.

L'application du mélange de compost et semences a permis une végétalisation partielle, mais souhaitable de l'enrochement par des plantes herbacées (figure 65). À long terme, cette mesure devrait également favoriser la colonisation de l'enrochement par des arbustes et quelques arbres en offrant un substrat nécessaire à leur implantation. La végétation ainsi implantée, même

partiellement, procure de l'ombrage à l'enrochement, ce qui réduit d'autant le réchauffement de l'eau de la rivière.



**Figure 65 : Enrochement en partie végétalisé par le compost et les semences, le 21 octobre 2021.**

### 3.7.5 Suivi et efficacité

Le suivi de l'intégrité des interventions est réalisé par des examens visuels. Ces examens ont été complétés simultanément par les représentants de la Ville, les concepteurs d'Environnement Nordique, les membres du Comité Rivière de Saint-Raymond et les citoyens du secteur. Dans la mesure où les aménagements ne montrent pas de signes d'instabilité ou d'exfiltration d'eau au travers de la digue lors des fortes crues, les interventions sont considérées comme étant efficaces, selon le niveau de protection utilisé comme critère de conception, soit l'élévation de la crue de récurrence de 200 ans.

La première visite de suivi et une mise à l'épreuve de la digue sont survenues très peu de temps après les travaux. En effet, une débâcle et une forte crue de la rivière Sainte-Anne sont survenues le jour de Noël 2020. Une pluie de 113 mm et une température chaude sont à l'origine de cette crue observée le 25 décembre 2020. Un débit d'environ 980 m<sup>3</sup>/s a été enregistré à la station de Chute-Panet, après l'évacuation de la plupart des glaces. Le niveau de la rivière a été observé à environ 20 cm de la crête de la digue nouvellement construite, comme la montre la photographie de la figure 66. Aucune altération ni déformation de la digue n'ont été notées après l'événement (figure 67). Seuls quelques graviers sur la partie aval de l'enrochement ont été déplacés par le courant. N'eût été la reconstruction de cet ouvrage de protection combiné à l'enlèvement des caissons évoqué à la section 3.6 et à la mise en œuvre du dispositif anti-refoulement de la rue Jacques-Labranche à la section 3.8, la ville de Saint-Raymond aurait subi des dommages considérablement plus importants que ceux subis lors de cet événement. Les travaux et

investissements réalisés sur la rivière Sainte-Anne avant le début de 2021 ont prouvé rapidement leur efficacité lors des crues majeures en eau libre.

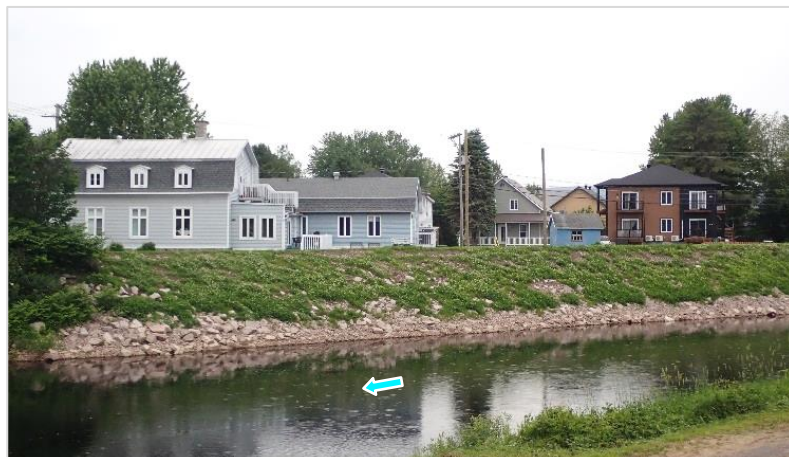


**Figure 66 :** Haut niveau d'eau lors de la crue de Noël 2020 en amont du pont Tessier.



**Figure 67 :** Digue et enrochement deux jours après la crue de Noël 2020 (27 décembre).

Lors des visites de suivi subséquentes, la digue et le talus en enrochement sont demeurés en bon état et pleinement fonctionnels (figure 68).



**Figure 68 :** État de la digue et du talus le 21 juin 2022

### 3.8 Dispositif anti-refoulement de la rue Jacques-Labranche au PK 6,05

#### 3.8.1 Fonctions recherchées

Depuis plusieurs années, les émissaires pluviaux qui rejettent leurs eaux dans la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond ont été munis de dispositifs anti-refoulement comprenant notamment un clapet et une pompe automatique. Ces dispositifs ont démontré leur efficacité pour empêcher l'eau de la rivière Sainte-Anne de refouler dans les conduites, faire résurgence et inonder le centre-ville lors de la remontée des niveaux d'eau par les embâcles de glace ou les fortes crues. Jusqu'à l'automne 2020, le secteur résidentiel de la rue Jacques-Labranche au nord-est du centre-ville n'était pas protégé contre les refoulements du réseau pluvial. Bien que les niveaux atteints en eau libre dans les simulations au débit centennal n'inondaient pas le secteur, des inondations sont survenues en présence d'embâcles dans les 13 dernières années. Ces inondations de courte durée causaient des dommages suffisamment importants pour justifier la protection de ce quartier.

Le dispositif anti-refoulement de la rue Jacques-Labranche est situé à environ 100 m en retrait de la rivière au PK 6,05 et vise à protéger 20 résidences des inondations dans le secteur de l'avenue Alexis-Cayer et de la rue Jacques-Labranche (carte 2).

#### 3.8.2 Description

L'émissaire pluvial du secteur de la rue Jacques-Labranche est de gros calibre avec un diamètre de 1 200 mm. À partir du dispositif anti-refoulement, la conduite de béton de cet émissaire suit un parcours perpendiculaire à la rivière de 101 m jusqu'à la rive gauche, vers le PK 6,05 (figure 69). Une représentation schématique simplifiée du dispositif est illustrée à la figure 70.

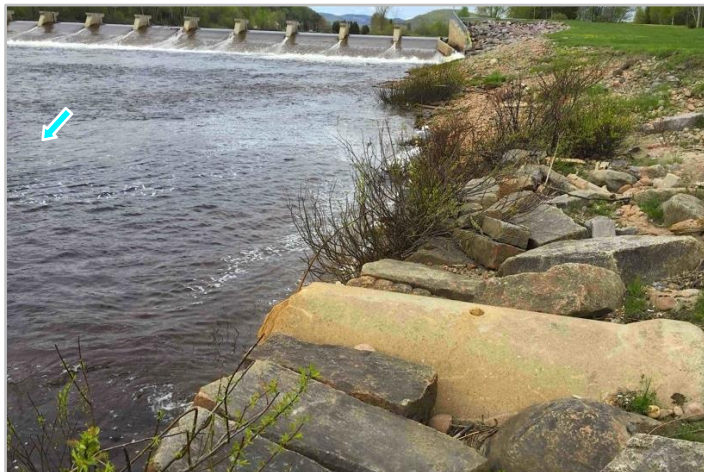


Figure 69 : Émissaire de la rue Jacques-Labranche de type TBA 1200 mm en rive (29 mai 2019).

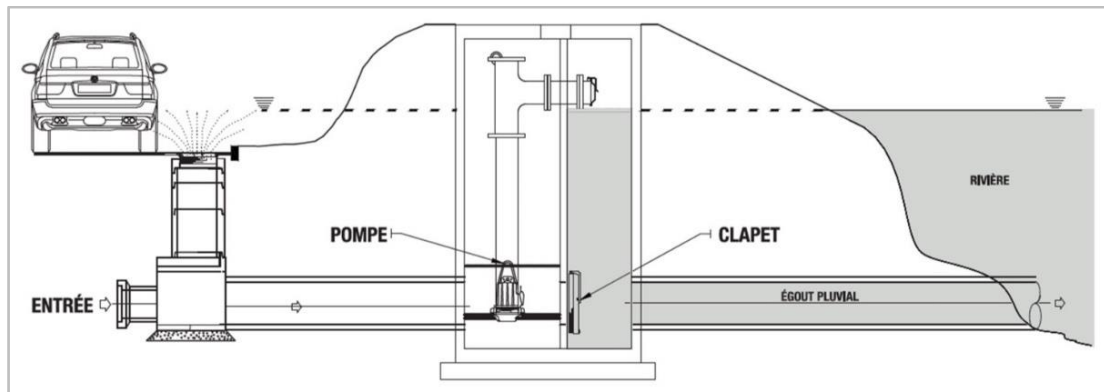


Figure 70 : Représentation schématique de l'anti-refoulement de la rue Jacques-Labranche.

Le dispositif anti-refoulement est équipé d'appareils de contrôle automatique. Il possède des capteurs qui mesurent les niveaux d'eau et amorce le fonctionnement du clapet et des pompes. Le dispositif inclut une chambre en béton, un conduit de refoulement, un événement, des pompes et divers éléments mécaniques (figure 71). Le clapet antiretour est de type Ultraflex de l'entreprise américaine Red Valve.

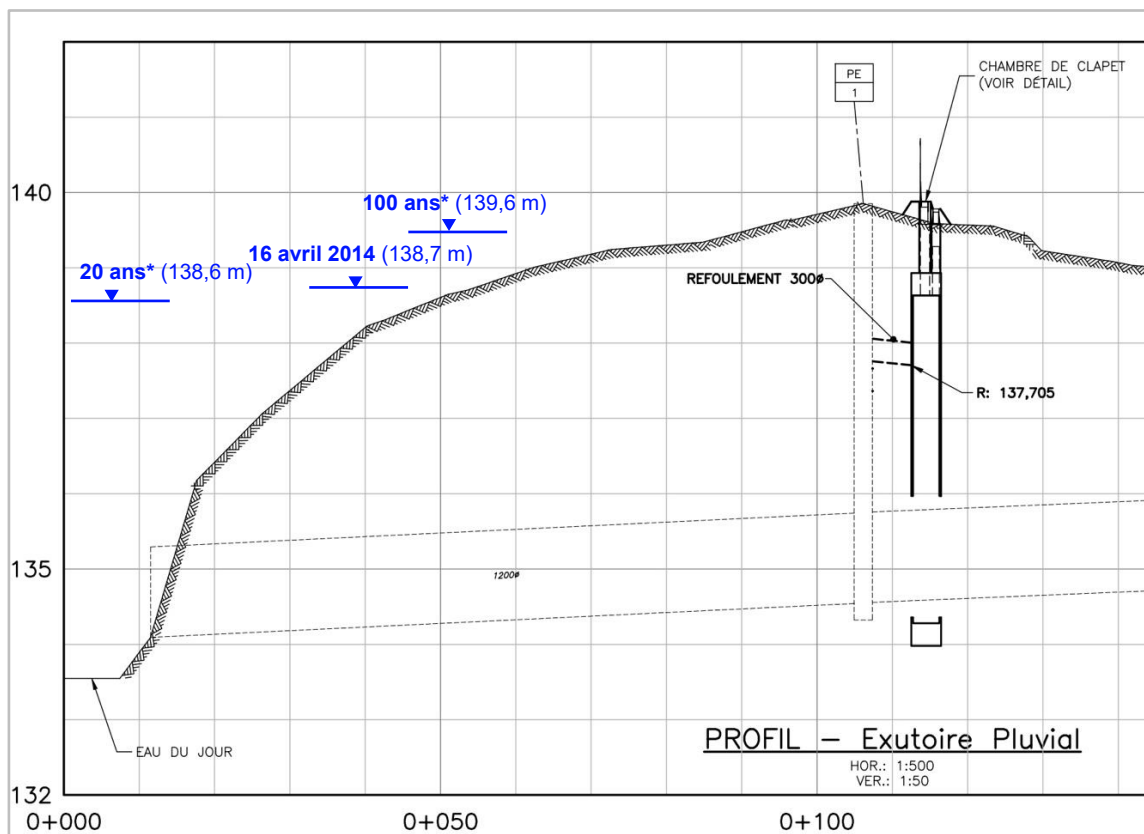


Figure 71 : Vue en coupe montrant la chambre de clapet et la conduite par rapport à la rivière. Extrait du plan de TetraTech numéro A1-40579TT-C-0001.

À noter que, sur la figure 71, les niveaux de récurrences 20 ans et 100 ans tiennent compte également des inondations en présence de glace (EMB, BCF), tirées des calculs de Turcotte et coll. (2021). Il est normal que ces valeurs soient supérieures à celles officielles qui ne concernent que les événements en eau libre. De plus, lors d'un événement de crue dynamique, les niveaux d'eau mesurés vis-à-vis la chambre du clapet sont légèrement supérieurs en raison du refoulement des eaux pluviales. Ainsi, le quartier résidentiel près de la rue Jacques-Labranche a tout de même été touché par les inondations de 2012 et 2014, entre autres.

### 3.8.3 Travaux

Les travaux ont été réalisés à l'automne 2020 (figure 72), après réceptions de toutes les autorisations. Les plans et devis ainsi que la demande d'autorisation environnementale ont été préparés par Tetra-Tech QI inc. au montant de 86 231,25\$ avec taxes.



**Figure 72 : Dégagement de la conduite pluviale lors des travaux le 2 octobre 2020.**

Le clapet anti-refoulement a été fourni par les Contrôles Provan & Associés pour une valeur de 48 289,50\$ avec taxes. Une pompe pour évacuer l'eau en refoulement provient de Xylème inc. au montant de 56 751,69\$ avec taxes.

Le coût de construction du dispositif anti-refoulement à l'émissaire pluvial de la rue Jacques-Labranche est de 365 815\$ (2020).

### 3.8.4 Suivi et efficacité

À peine deux mois après sa mise en service (figure 73), la débâcle du 25 décembre 2020 (975 m<sup>3</sup>/s) suivi d'une inondation en eau libre a sollicité le clapet. Sans celui-ci, les niveaux refoulés dans le réseau pluvial auraient pu engendrer des dommages. Bien que la crue du 2 mai 2023 n'ait pas engendré des niveaux problématiques pour le quartier (760 m<sup>3</sup>/s), lors de notre visite, la pompe du clapet était en fonction en continu. Cela signifiait que l'eau de la conduite pluviale aurait été refoulée dans le réseau.

Un embâcle s'est formé directement vis-à-vis la sortie de la conduite pluviale lors de la débâcle du 1<sup>er</sup> janvier 2023. Cet embâcle a engendré des niveaux importants dans le secteur. Cet événement s'est apparenté à d'autres débâcles vécues dans les dernières années où l'eau avait inondé le quartier pendant quelques heures.



**Figure 73 :** Clapet Jacques-Labranche, le 12 novembre 2020, avant la complétion des travaux de végétalisation au printemps 2021.

Depuis sa mise en service en novembre 2020, aucune panne du dispositif ne s'est produite. Prochainement, l'installation d'un système de télémétrie permettra un suivi en temps réel. Lorsque certaines situations se produiront, des alertes seront envoyées aux responsables du Service des travaux publics.

### 3.9 Reconstruction de l'émissaire de la rue Saint-Hubert au PK 4,9

#### 3.9.1 Fonctions recherchées

La réfection de l'émissaire pluvial de la halte de la rue Saint-Hubert visait à réduire les risques de formation d'embâcle de glace qui causent des inondations. Le mur de tête en saillie au bas du talus riverain formait un obstacle partiel au transit de la glace vers l'aval (figures 74 et 75). En étant situé dans une courbe externe, un train de glace pouvait se coincer sur le mur de tête en saillie, favorisant ainsi l'amorce d'un embâcle lorsque d'autres conditions étaient déjà propices à l'accumulation de la glace.



Figure 74 : Émissaire avec mur et maçonnerie de béton en saillie, haute de 2,4 m, le 29 mai 2019.



Figure 75 : Émissaire et mur de tête haut de 2,4 m vus de la rive opposée, le 19 juin 2019.

### 3.9.2 Description

L'émissaire de la rue Saint-Hubert est situé dans la partie aval du centre-ville de Saint-Raymond, au PK 4,9 (carte 2). Il se trouve en rive gauche et en bordure d'un petit parc nommé *halte de la rue Saint-Hubert*. Le talus riverain possède une pente relativement forte et sa partie supérieure prend la forme d'un vieux mur de maçonnerie d'environ 1,5 m de hauteur. La partie supérieure de ce mur forme également une petite digue anti-inondation, car elle excède la surface du sol du parc, sur une hauteur d'environ 50 cm.

L'émissaire pluvial en béton possède un diamètre de 900 mm et il est supporté par un mur de tête en béton de 2,4 m de hauteur complétés, latéralement, par une maçonnerie de pierre et de béton. La saillie constituée par le mur de tête et la maçonnerie favorisaient le blocage de la glace.

Les plans et devis ont été préparés par Simon Bélanger et Claude Beaulieu d'Environnement Nordique. Gilles Bordeleau de Gradian Experts-conseils a fourni de judicieuses recommandations sur l'ajustement de la jonction entre la conduite pluviale existante et une nouvelle structure en béton à mettre en place.

### 3.9.3 Travaux

Les travaux ont été réalisés du 21 octobre au 1<sup>er</sup> novembre 2021 par l'entreprise Pax Excavation. La surveillance de leur conformité aux plans et devis au chantier a été assurée par Simon Bélanger et Charles-Antoine Bordeleau. Les travaux ont exigé l'utilisation de 5 grandes dalles de granite taillées, d'une extrémité biseautée femelle pour conduite de 1 200 mm (3 t), de 171 tonnes de pierre de calibre 150-600 mm pour l'enrochement et d'environ 30 tonnes de pierre nette de calibre 20-100 mm. À ceci s'ajoutent du ciment à prise rapide, de la mousse d'uréthane, des tiges d'armature en résine et fibre de verre et un coulis d'ancrage à béton.

Les travaux ont débuté par le démantèlement d'une partie du mur de maçonnerie présent en haut du talus riverain pour permettre l'atteinte du pied de la rive avec le godet de l'excavatrice. Par suite, l'entrepreneur a procédé au démantèlement du mur de tête, de la maçonnerie et d'une section de la conduite en béton de 900 mm de diamètre. De l'excavation a permis la préparation des assises pour recevoir les 5 grandes dalles de granite superposées, mais décalées en marche d'escalier de manière à épouser la pente du talus riverain voisin (figures 76 et 77).



Figure 76 : Mise en place d'une troisième dalle de granite le 21 octobre 2021.

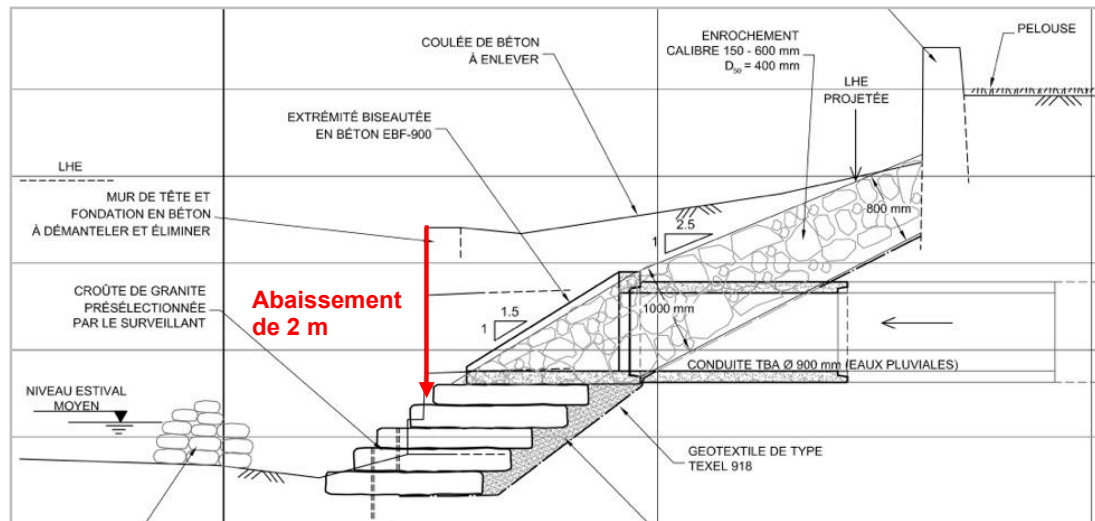


Figure 77 : Extrait du plan montrant une vue en coupe des interventions.

Une extrémité biseautée femelle (EBF) en béton était prévue au plan pour une conduite en béton de 900 mm de diamètre (figures 77 et 78). Toutefois, la conduite en béton ancienne (1978) possède une forme non compatible avec les EBF d'aujourd'hui. Une EBF plus grande de 1200 mm a alors été utilisée. Le joint entre l'EBF 1 200 mm et la conduite a été adapté en construisant un appui au tiers inférieur en forme de berceau avec du ciment haute performance coulé sur place. La partie supérieure de la jonction a été comblée avec une mousse expansive en uréthane. La figure 79 montre le résultat.



**Figure 78 :** Insertion de l'extrémité biseautée en béton le 21 octobre 2021.



**Figure 79 :** Extrémité biseautée jointée avec du ciment et de la mousse d'uréthane, le 28 octobre 2021.

Ce joint en ciment en bas et en mousse d'uréthane en haut offre par ailleurs un avantage intéressant dans un secteur affecté par les embâcles de glaces. En effet, si l'EBF venait à être déplacée par la glace, sa solidarité partielle avec la conduite éviterait probablement le bris de la conduite et celle du mur de maçonnerie situé au-dessus. Dans un tel cas, l'EBF en question pourrait être remplacé avec une excavatrice et le joint refait, le tout à faible coût et en quelques heures de travail.

Autour de l'extrémité de béton, un enrochement de calibre 150-600 mm a été mis en place pour stabiliser l'ouvrage et assurer une jonction stable avec la rive existante de part et d'autre. En haut du talus, le mur de maçonnerie a été reconstruit à l'aide d'un même type de pierre.

Aujourd'hui, la nouvelle structure à l'extrémité de l'émissaire pluvial épouse la forme du talus riverain sans former d'obstacle à la libre circulation de la glace (figure 80).



**Figure 80 : Nouvel émissaire avec EBF sans saillie en rive, le 28 octobre 2021.**

Le coût des travaux est de 75 640\$. À ceci s'ajoutent les frais de 21 044\$ associés à la préparation des plans et devis, à la demande d'autorisation environnementale ainsi qu'à la surveillance des travaux. Le montant total est alors de 97 383\$. Les frais ont été partagés entre le MSP et la Ville de Saint-Raymond.

#### 3.9.4 Aspects environnementaux

Aucun enjeu environnemental digne de mention n'est associé à la réfection de l'émissaire de la halte de la rue Saint-Hubert.

#### 3.9.5 Suivi et efficacité

Les observations réalisées régulièrement montrent que la nouvelle extrémité biseautée en béton est demeurée bien en place. Celle-ci n'a pas interféré avec l'écoulement des glaces depuis sa mise en place au début de l'hiver 2021-2022. Toutefois, comme le montre la figure 81, quelques pierres de l'enrochement ont été mobilisées par la glace et ont été remplacées manuellement.



Figure 81 : Pierres de l'enrochement déplacées par la glace à replacer (photo du 25 avril 2024).

### 3.10 Inspection et défrichage des digues

#### 3.10.1 Fonctions recherchées

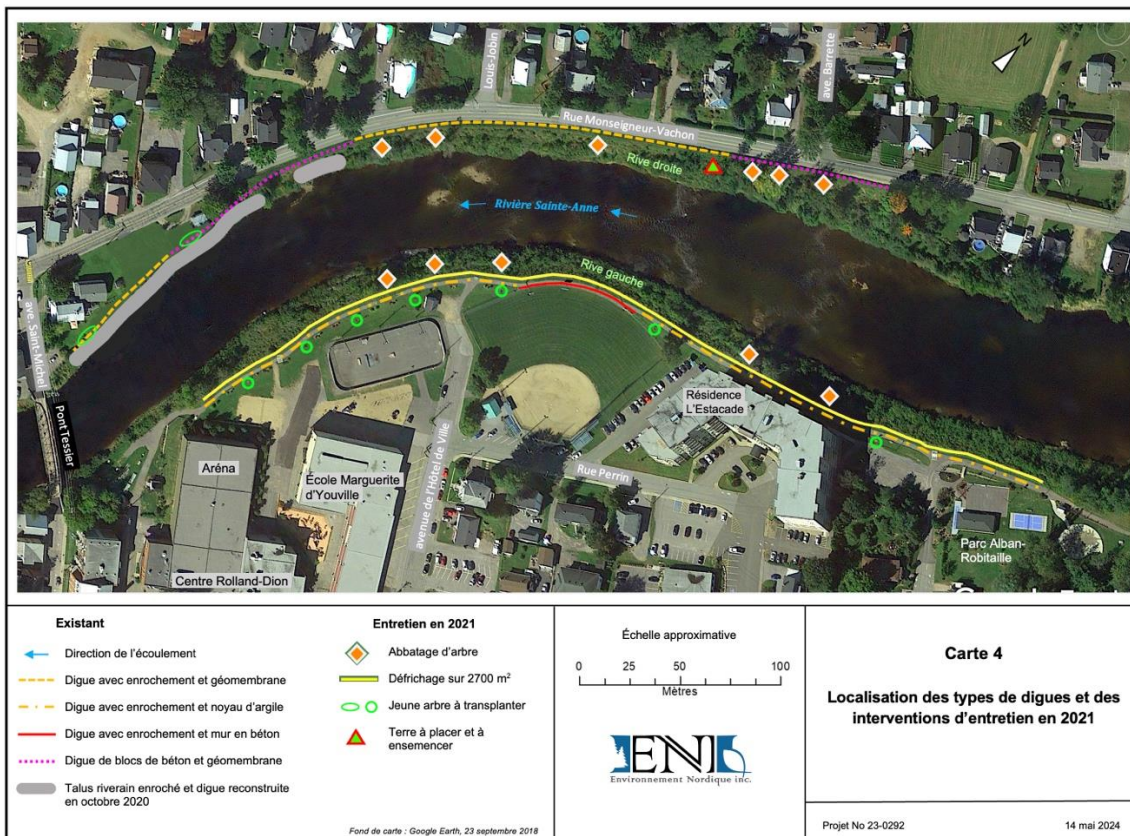
L'inspection et le défrichage des digues situées près du centre-ville visent principalement à éviter la formation de cavités qui pourraient éventuellement altérer leur étanchéité et leur solidité. À ces fins, divers guides d'entretien des digues proposent des interventions de contrôle de la végétation, notamment ceux de *Fisheries and Oceans Canada* (1999), de Mériaux et coll. (2004) pour la France et du *US Army Corps of Engineers* (2014). La revue et la synthèse des informations présentées dans ces guides ne font pas partie des objectifs du présent rapport. Soulignons seulement que les interventions d'entretien visent principalement celle de la végétation sur les digues pour les raisons suivantes :

- Prévenir la formation de cavités par les racines qui peuvent faciliter la circulation de l'eau à travers une digue que l'on souhaite imperméable et éliminer les risques de perturbations structurales des remblais lors du renversement des arbres (chablis). Après la mortalité d'un arbre, la pourriture des racines offre des cavités qui peuvent favoriser la circulation de l'eau, induire des tassements, des fissures et autres dans les remblais des digues.
- Faciliter les inspections visuelles qui permettent de vérifier la présence de déformations dans les remblais de la digue et les terriers d'animaux fouisseurs.
- Réduire l'attrait du milieu comme habitat faunique pour les animaux fouisseurs (marmotte, renard, castor, souris et autres).
- Offrir un accès rapide à la digue et la rivière en cas d'interventions d'urgence, notamment avec de la machinerie.

L'inspection vise par ailleurs à vérifier la présence de cavités, de terriers d'animaux ou même de déformations des sols, comme une fissure ou un décrochement.

### 3.10.2 Description

Les activités d'inspection et de défrichage s'étendent le long d'un tronçon de 600 m de la rivière Sainte-Anne, près du centre-ville. Plus précisément, elles se situent entre le pont Tessier, à l'aval, et le parc Alban-Robitaille, à l'amont (cartes 2 et 4).



**Carte 4 : Localisation des types de digues et des interventions d'entretien en 2021.**

Les caractéristiques détaillées des digues sont présentées dans le rapport expliquant le résultat de leur inspection et la nature des travaux d'entretien à mettre en œuvre (Bélanger 2022a). Mentionnons par ailleurs que la hauteur des digues est de l'ordre de 1,2 m sur la rive droite, tandis qu'elle varie de 1,3 à 2 m en rive gauche, du côté du centre-ville.

La section 3.7.2 a présenté une digue constituée d'un mur de blocs de béton et d'une géomembrane étanche enfouis sous un remblai, sur une partie de la rive droite. Ce type de digue est représenté

par une ligne pointillée mauve sur la carte 4. Toujours en rive droite, les autres parties de la digue prennent la forme d'une butte de sable et gravier avec un enrochement d'un calibre 0-300 mm du côté de la rivière. L'étanchéité de cette dernière a été assurée par une géomembrane placée entre deux géotextiles afin de prévenir sa perforation (figure 82). Cette digue a été reconstruite par la Ville en 2011.



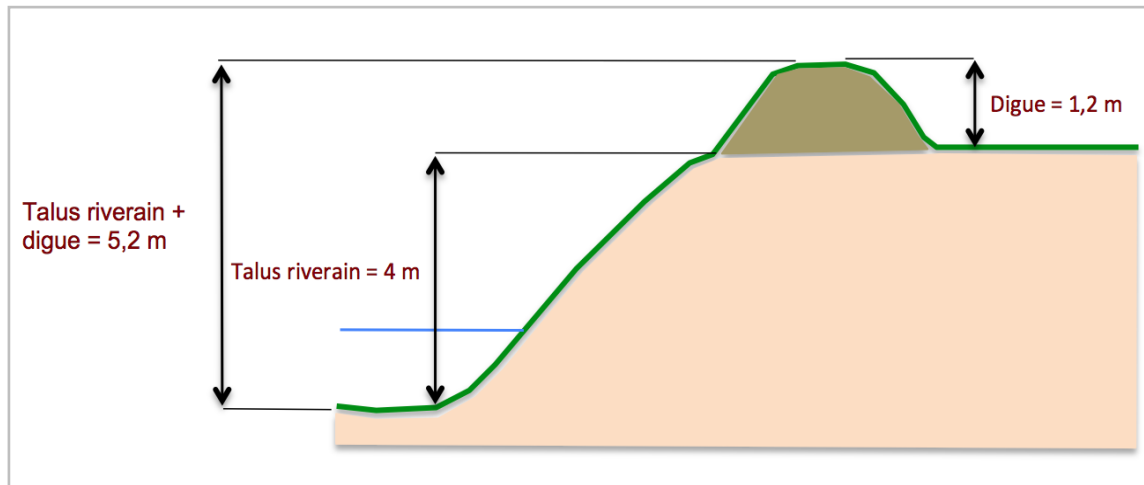
**Figure 82 : Digue de la rive droite faite d'un enrochement et d'une géomembrane.**

En rive gauche, du côté du centre-ville, la digue est constituée d'un enrochement avec un noyau d'argile (figure 83). Ce type de digue est réparti en deux segments, l'un en aval et l'autre en amont du terrain de baseball (carte 4). Leurs longueurs sont respectivement de 195 m et de 242 m pour un total de 437 m. Afin de ne pas réduire la taille du terrain de baseball, la digue voisine est supportée par un mur de béton du côté intérieur.



**Figure 83 : Construction de la digue avec enrochement et noyau d'argile en rive gauche, en 2009.**

Pour des raisons d'ingénierie et d'entretien des digues, il est nécessaire de distinguer la partie de terrain propre au **talus riverain** de celle qui forme la **digue**, tel qu'illustré à la figure 84.



**Figure 84 :** Vue en coupe qui illustre la distinction entre le talus riverain et la digue voisine.

La limite inférieure d'une digue construite immédiatement sur la crête d'un talus riverain est souvent difficile à localiser lorsqu'on désire mettre en œuvre un plan d'entretien (Bélangier 2022a). À cet égard, la figure 84 présente distinctement la partie érigée de la digue localisée sur la terrasse du talus riverain. L'entretien végétal de la digue est nécessaire alors que le talus riverain peut tolérer une végétation arbustive et arborée.

### 3.10.3 Observations à l'inspection

Une inspection de la rive et des digues a été réalisée le 13 octobre 2021. Aucun terrier ni aucune cavité n'ont été observés sur les digues. Il n'y avait pas de cavités ni de fissures de la surface du sol. Cependant, deux petites dépressions d'environ 2 m<sup>2</sup> chacune ont été observées dans la partie inférieure de la digue en rive droite, du côté de la rivière. Elles sont désignées par un triangle rouge et vert sur la carte 3. La profondeur apparente de ces dépressions est faible, soit de l'ordre de 30 à 40 cm. L'origine de ces petites dépressions remonte probablement au moment de construction de la digue, bien que l'érosion puisse les avoir accentuées.

En rive droite, la surface de la digue du côté urbain est recouverte d'une pelouse. Sur les terrains privés localisés plus en aval, elle est tondue régulièrement. En amont, les employés de la Ville tondent la pelouse à quelques reprises durant la saison de croissance (figure 85). Ainsi, le contrôle de la végétation semble régulier du côté urbain et ne comporte pas d'enjeux. La digue de la rive

droite est occupée par des cornouillers, ces arbustes ont été plantés après sa reconstruction, entre 2010 et 2018 (figure 85). Ces derniers jouent un rôle stabilisateur pour protéger la digue contre les poussées glacielles. Leurs racines plutôt superficielles ne devraient pas altérer la géomembrane étanche qui est protégée par un géotextile et un empierrement de calibre 0-300 mm. En raison de leur rôle stabilisateur important, les arbustes doivent donc être conservés. Les arbres, inexistant pour le moment, mais qui se développeront plus tard sur la digue, devront être coupés. Près de la limite entre la digue et les talus, 26 arbres à abattre ont été marqués.



**Figure 85 : Digue de la rive droite avec des cornouillers du côté de la rivière (25 avril 2024).**

En rive gauche, la surface de la digue du côté urbain est recouverte d'une pelouse régulièrement tondue. Le contrôle de la végétation y est donc régulier. Toutefois, de jeunes chênes devraient être abattus, car ils sont désormais trop gros pour être transplantés (figure 86a). Du côté rivière, la végétation est en friche et se compose d'herbacées, d'arbustes et de jeunes arbres (figure 86b). Après la mortalité des arbres, la pourriture des racines pourrait, en principe, favoriser la circulation de l'eau sous la surface du sol, ce qui doit être évité pour préserver l'étanchéité de la digue. Près de la limite entre la digue et les talus, 34 petits arbres à abattre ont été marqués.



**Figure 86 : Végétation de la digue située en rive gauche (13 octobre 2021).**

#### 3.10.4 Travaux

Le défrichage de la digue en rive gauche, du côté rivière, a été réalisé une première fois le 16 novembre 2021 et chaque année par la suite (figure 87). Le premier défrichage de novembre 2021 a été réalisé par une débroussailleuse déportée jumelée à un tracteur par l'entreprise d'Olivier Hamel de Saint-Basile au coût d'environ 500\$.



**Figure 87 : Défrichage de la digue de la rive gauche le 16 novembre 2021.**

Plus bas, près de la limite entre la digue et le talus, les employés des travaux publics devront procéder à l'abattage de 34 petits arbres, d'un diamètre situé entre 12 et 20 cm.

Sur la rive droite, près de la limite entre la digue et les talus, 26 arbres ont été abattus par les employés des travaux publics.

### 3.10.5 Aspects environnementaux

Outre la perte d'arbres et d'arbustes près de la rive, il n'y a pas d'enjeu environnemental particulier.

### 3.10.6 Suivi et efficacité

Chaque année, les employés du Service des travaux publics procèdent au défrichage des digues. Comme ce travail est réalisé régulièrement, les arbres ne se développeront plus et des abattages ne seront plus requis.

## 3.11 Dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond (PK 6,15 à 6,35)

### 3.11.1 Fonctions recherchées

L'efficacité du barrage de Saint-Raymond pour réduire la fréquence et l'importance des embâcles était remise en question par plusieurs ingénieurs et scientifiques (Morse et Turcotte 2015, Morse 2019, Beaulieu et Simard-Robitaille, 2025). La fonction initiale du barrage construit vers 1975 était de permettre au couvert de glace flottante formé dans son réservoir de résister aux poussées des trains de glaces (Morse et coll. 2006).

Le réservoir du barrage, déjà petit à l'origine, se remplit de sédiments grossiers diminuant sensiblement sa capacité à stocker du frasil avant son arrivée dans le tronçon voisin du centre-ville (Morse 2019). La vitesse de l'écoulement trop élevée à l'eau libre ( $> 0,6$  m/s et  $Fr > 0,1$ ) pour former rapidement un couvert de glace stable devenait un enjeu demandant une nouvelle intervention (Turcotte et Morse 2015, Beaulieu et Simard-Robitaille 2025). Le dragage du réservoir devenait une alternative simple pour diminuer rapidement la vitesse de l'écoulement et favoriser la retenue du frasil sous un couvert de glace hâtif.

Selon les études de Carrier et coll. 2017 ainsi que celle de Morse et Turcotte 2019, il est estimé que ces travaux de dragage permettraient de réduire le transport en charge de fond, au site du barrage, durant une période estimée à 30 ans. De ce fait, ces travaux redonneraient au barrage et à son réservoir une nouvelle fonction hydraulique pour plusieurs dizaines d'années, soit la rétention du frasil et la formation d'un couvert de glace précoce. Toutefois, les résultats des suivis présentés à la section 3.11.5 nous rappellent que la dynamique sédimentaire a été perturbée depuis 1975 dans les tronçons immédiatement en amont. Tant que la situation ne tend pas vers l'équilibre, la charge de sédiments sera plus importante que prévu initialement et l'entretien du réservoir devra être devancé. Le dragage du réservoir, combiné à la gestion active des vannes du barrage,

permettait d'améliorer la formation des embâcles en amont du PK 6,1. Cette proposition permettrait de libérer ainsi le centre-ville d'une partie de son engorgement en frazil et constituer un butoir, avec le SRG du PK 10,5 (section 3.12), amortissant et freinant les trains de glace en débâcle au printemps ou lors de certains redoux hivernaux.

La Direction générale des barrages (DGB), gestionnaire de l'ouvrage, a mis en place à la suggestion de l'équipe de l'UL en 2016, un protocole visant à faire une gestion dynamique du niveau de l'eau en amont du barrage de Saint-Raymond. Les suivis ont démontré que cette initiative représentait un potentiel de rétention du frazil significatif. Une étude récente déposée auprès de la DGB souligne qu'une meilleure gestion de l'eau à partir de nouvelles vannes serait susceptible d'améliorer les conditions de formation du couvert de glace dans le réservoir du barrage de Saint-Raymond dès le début de l'hiver (Beaulieu et Simard-Robitaille, 2025).

### 3.11.2 Description

Le barrage de Saint-Raymond mesure 101,5 m de longueur, mais est prolongé en rive gauche par une digue de 138 m de longueur. Près de la rive droite, le barrage en béton est muni de deux vannes de 1,38 m de hauteur totalisant 16 m de longueur (Godin et coll. 2020). Le seuil inférieur des vannes, permettant d'abaisser le niveau d'eau du réservoir, se situe à l'élévation 135,94 m.

La zone d'intervention pour le dragage est située dans la partie aval du réservoir, entre les PK 6,15 et 6,35, sachant que la limite amont du réservoir se situe vers le PK 7,1 (carte 2). La surface draguée s'étend sur une longueur de 210 m, une largeur maximale de 75 m et couvre une superficie de 10 260 m<sup>2</sup> (Bélanger 2022b). Dans sa partie amont, un îlot colonisé par des arbustes a été enlevé de même qu'un haut-fond, plus en aval (figures 88 et 89). L'abaissement du niveau d'eau du réservoir par l'ouverture des vannes du barrage rend plus visibles le haut-fond et la majeure partie de la surface à draguer (figure 89). Les élévations des surfaces à draguer varient entre 136,3 et 137,9 m.

Les matériaux dragués sont formés, dans l'ordre, des granulométries suivantes : galets, gravier, sable grossier et blocs (figure 90). L'épaisseur moyenne des matériaux dragués est de 1,1 m, mais atteint 2 m au droit de l'îlot.



**Figure 88 :** Image satellitaire de 2018 montrant l'îlot en rive gauche avant les travaux, en jaune, une partie du haut-fond plus en aval, en rouge, et la surface draguée en 2022, en blanc.



**Figure 89 :** Haut-fond visible après l'abaissement du niveau d'eau du réservoir (10 août 2021).



**Figure 90 :** Dépôt récent d'alluvions dans le réservoir du barrage de Saint-Raymond (10 août 2021).

### 3.11.3 Travaux

La description détaillée des travaux a fait l'objet d'un rapport distinct (Bélanger 2022b) pour répondre aux demandes du MELCC et du MPO. Seuls les éléments clés sont repris ici.

Les travaux de dragage ont été réalisés par l'entrepreneur MVC Océan inc. et son sous-traitant Technisol inc. pour la végétalisation, tous deux de Trois-Rivières. Les travaux ont été séparés en deux périodes distinctes en raison de leur nature. La première phase concerne essentiellement le dragage et elle a débuté le 15 août pour se terminer le 12 septembre 2022. Un total de 19 jours ouvrables a été consacré à l'exécution des travaux de dragage lors de cette première phase. La seconde phase s'est déroulée du 13 au 21 septembre pour stabiliser la rive au point d'accès à la rivière, végétaliser la bande riveraine et remettre le site en état. L'accès au réservoir s'est fait par la rive gauche depuis la rue Alexis-Cayer et un champ engazonné.

Préalablement aux travaux, le niveau du réservoir du barrage de Saint-Raymond a été abaissé grâce à l'ouverture de ces vannes par les employés de la Direction générale des barrages du MELCCFP. Avant de débiter les travaux, la bathymétrie de la zone de la zone à draguer a été obtenue par arpentage. Des mesures de la même zone ont été complétées après les travaux afin de quantifier les volumes excavés.

Une aire d'égouttement des déblais a été aménagée dans le champ voisin sur la rive gauche. Afin de faciliter les travaux et limiter les impacts sur le milieu aquatique, les travaux en rivière ont débuté par le confinement de la première zone de travail en édifiant un andain de matériaux provenant du lit de la rivière. Dans les endroits soumis aux plus fortes pressions exercées par l'écoulement, des blocs de béton du type New Jersey ont été utilisés (figure 91). Dans les zones plus calmes, l'entrepreneur a plutôt opté pour des rideaux de turbidité constitués de toiles étanches.



**Figure 91 : Andain de galets et blocs issus du lit de la rivière avec quelques blocs de béton.**

Les sédiments grossiers ont été creusés à l'aide d'excavatrices circulant et travaillant directement sur le lit. L'excavation a débuté par les endroits les plus éloignés pour se terminer plus près de la voie d'accès à la rivière en rive gauche. Les excavatrices se trouvaient en quelque sorte à reculer vers la sortie en laissant, devant elles, les secteurs « dragués » et plus profonds d'environ 1 m. Les matériaux excavés ont été soit placés directement dans la benne des camions hors routes, soit mis en pile pour être par la suite chargés dans ces mêmes camions (figure 92). Les camions hors routes se dirigeaient par la suite vers l'aire de travail et d'égouttement.



**Figure 92 : Dragage par excavation du lit de la rivière et chargement des camions hors routes.**

De gros blocs (> 600 mm) plus abondants qu'anticipé dans la partie amont ont été triés et valorisés différemment des autres matériaux.

À l'aide d'une pelle chargeuse, les déblais une fois égouttés ont été placés dans les camions bennes et transportés vers leur site de valorisation par concassage destiné à la construction des rues et autres infrastructures urbaines locales.

Au point d'accès à la rivière, un enrochement a été construit sur une longueur de 18 m à l'aide des blocs récupérés lors de l'excavation du lit. Du matériel excavé sur la rive et composé de sable, gravier et galets a été par la suite placé sur l'enrochement afin de lui redonner un aspect plus naturel. Les conditions d'érosion sont faibles dans le secteur du chemin d'accès, ce qui limite le déplacement par les courants des matériaux de recouvrement de l'enrochement. Par la suite, un BioD-Mat 90 et des plants d'arbustes ont été utilisés pour restaurer la végétation du replat suprariverain (figure 93).



**Figure 93 : Stabilisation et restauration de l'accès en rive gauche (16 septembre 2022)**

Le coût des travaux a été estimé et payé au montant de 441 441\$, avant les taxes (2022). D'autres frais de 333 571\$ s'ajoutaient à celui des travaux. Ils sont associés aux relevés, à la préparation des plans et devis, aux études et aux demandes d'autorisation, aux compensations environnementales à l'élaboration et l'obtention d'un décret gouvernemental pour éviter une étude d'impact ainsi qu'à la surveillance des travaux. Dans le cadre de ce projet, le montant des compensations environnementales est particulièrement élevé en raison de la grande superficie affectée par les travaux dans la rivière (10 260 m<sup>2</sup>), soit 267 562\$. Le montant total atteint de ce fait 775 012\$ avant taxes. Les coûts ont été initialement assumés par le MSP et la Ville. Toutefois, le Gouvernement du Québec, à titre de propriétaire du barrage, a par la suite remboursé à la Ville les frais de compensation environnementale et les honoraires couvrant les études, les demandes d'autorisation et la préparation des plans et devis au montant de 469 032 \$.

#### 3.11.4 Aspects environnementaux

Plusieurs mesures de protection de l'environnement aquatique ont été mises en œuvre durant les travaux de dragage. La réalisation des travaux en 3 phases en fait partie. Elle visait trois objectifs à savoir :

- limiter la réduction de la section d'écoulement, le rehaussement du niveau d'eau en amont et l'accélération des vitesses en aval immédiat;
- réduire la dispersion des sédiments fins à l'aval du site;
- permettre la capture et la relocalisation des poissons confinés dans la zone des travaux, afin de limiter leur mortalité.

Le rapport de la relocalisation des poissons indique que 297 individus représentés par 8 espèces ont été capturés et relocalisés dans une zone sécuritaire à plus de 100 m en amont (Daoust 2022). Ces captures incluent plusieurs larves de 3 cm de longueur et une majorité de petits poissons communs de la famille des cyprins. Aucune mortalité a été observée.

Après les travaux, le dragage procure des impacts positifs sur le milieu aquatique et sur les poissons. En effet, la plus grande profondeur contribue à maintenir une eau plus fraîche avec une teneur plus élevée en oxygène. Celle-ci favorise une meilleure épuration de l'eau et facilite les processus de respiration des poissons. Le dragage augmente également le volume d'habitat aquatique disponible au bénéfice de nombreuses espèces de poissons.

### 3.11.5 Suivi et efficacité

#### **Accumulation de sédiments**

Afin de mesurer les volumes de sédiments accumulés après le dragage du réservoir, des relevés bathymétriques ont été effectués en 2023 et 2024.

*A priori*, une seule prise de mesure par année était prévue durant l'été, après la crue printanière. En 2023, un relevé bathymétrique a été effectué en juin à la faveur d'un étiage précoce. Toutefois, la forte crue de 760 m<sup>3</sup>/s observée le 11 juillet 2023 a justifié une seconde série de mesures au mois d'août. Avec cette reprise, il a été possible de quantifier les apports attribuables à chaque période et, en grande partie, aux crues concordantes.

Le premier relevé bathymétrique a été réalisé du 22 juin 2023 avec un débit de 25 m<sup>3</sup>/s à la station de Chute-Panet (050408). Les relevés ont été réalisés en marchant directement sur le lit du réservoir (figure 94) ou depuis une embarcation légère pour les secteurs les plus profonds.



**Figure 94 : Dépôt de sédiments relevé deux fois en 2023, lors de l'ouverture des vannes du barrage.**

Le secteur voisin de la rive gauche, localisé à plus de 130 m en amont du barrage de Saint-Raymond, est favorable à l'accumulation des sédiments grossiers. Un dépôt de cailloux, de gravier et de sable grossier s'accumule donc à cet endroit (figure 95).



**Figure 95 : Comparaison des accumulations avant les travaux en 2018 et une année après en 2023.**

Le dépôt accumulé entre septembre 2022 et août 2023 représente 1 876 m<sup>3</sup> de matériaux. De ce nombre, 1 167 m<sup>3</sup> de sédiments se sont accumulés entre septembre 2022 et juin 2023, principalement durant la crue printanière de mai 2023.

Entre le 22 juin et le 28 août 2023, la bathymétrie comparée révèle que 709 m<sup>3</sup> de sédiments se sont déposés. Le seul événement marqué par un débit suffisant pour permettre un tel volume de sédiments grossier correspond à la crue de 760 m<sup>3</sup>/s survenue le 11 juillet 2023.

Le relevé bathymétrique de 2024 a été effectué le 17 octobre 2024. Cette année encore, le dépôt accumulé entre la fin août 2023 et octobre 2024 (13 mois) représente une accumulation additionnelle de 1 808 m<sup>3</sup> de sédiments.

L'étude de Morse et Turcotte (2019) estimait que la quantité de sédiments grossiers qui transite annuellement par le réservoir du barrage de Saint-Raymond est de l'ordre de 585 tonnes, soit environ 325 m<sup>3</sup> pour une crue moyenne annuelle. Les volumes accumulés deux années consécutives représentent 1 876 m<sup>3</sup> et 1808 m<sup>3</sup> de sédiments respectivement, soit 577 % et 556 % du volume annuel moyen estimé par les chercheurs Morse et Turcotte (2019 et 2022).

L'enregistrement des débits des dernières années semble démontrer une augmentation de la fréquence et/ou de l'ampleur des crues supérieures à 600 m<sup>3</sup>/s, voire 900 m<sup>3</sup>/s à l'eau libre. Les pourcentages de 5 à 6 fois plus élevés de sédiments accumulés récemment dans le réservoir sont induits par ces fortes crues récentes et témoignent du déséquilibre de la dynamique sédimentaire dans les tronçons en amont. Ces valeurs sont nettement supérieures à la moyenne historique des débits de crues de 430 m<sup>3</sup>/s et au débit de calibrage de 415 m<sup>3</sup>/s utilisé par Morse et Turcotte (2019).

### ***Accumulation du frasil***

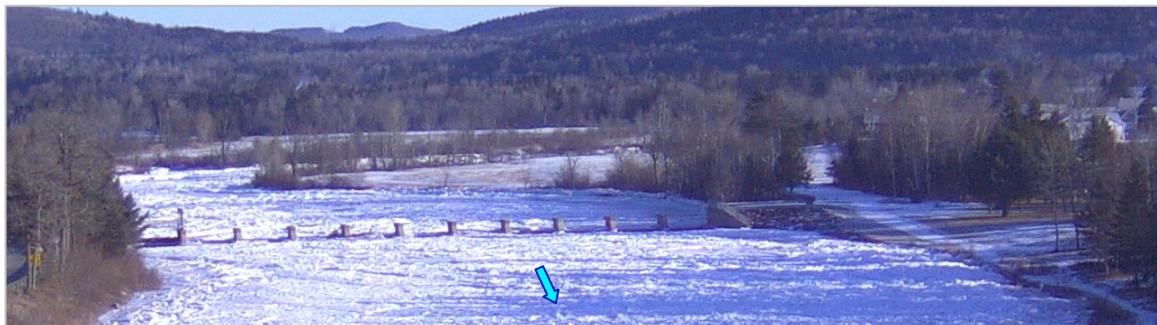
En ce qui concerne l'accumulation précoce de frasil dans le réservoir, des observations issues des suivis hivernaux de 2023, 2024 et 2025 confirment que les attentes anticipées dans la présente section étaient valables. L'opération dynamique des vannes du barrage de Saint-Raymond a démontré des bénéfices pour la gestion du couvert de glace, confirmant que la diminution de la vitesse et du nombre de Froude est favorable à la formation d'un couvert de glace précoce et souhaitable en amont du PK 6,15.

Lors de la prise des glaces en novembre 2023, l'opération des vannes combinée aux conditions hydrauliques et cryologiques favorables a permis de débiter la formation d'un couvert de frasil en une seule nuit (figure 95b), dès le 19 novembre, en ne cumulant que 28 degrés-jour de gel. La formation hâtive du couvert a permis de garder des niveaux bas en aval du barrage, sans obstruction par le frasil.



**Figure 96 : Formation du couvert de glace entre le 18, 19 et le 30 novembre 2022, respectivement.**

Le jeune couvert de glace a réussi à contenir les glaces lors des deux premières crues le 1<sup>er</sup> décembre et le 4 décembre 2022 (79 m<sup>3</sup>/s et 76 m<sup>3</sup>/s, respectivement). Cependant, le couvert n'a pas pu résister à la crue des 7-8 décembre culminant à 240 m<sup>3</sup>/s. La reprise de formation du frazil s'est amorcée massivement lors de la décrue, alors que les débits étaient trop élevés pour retenir le frazil dans le réservoir. Le bief s'est rempli d'un BCF en seulement trois nuits (figures 97 et 98).



**Figure 97 : Bief engorgé et barrage refoulé par un BCF dès le 12 décembre 2022.**

La prise des glaces en 2023 et 2024 s'est faite rapidement et l'opération des vannes a été un succès. Cependant, les couverts de glace dans le réservoir ont également été complètement mobilisés par des débâcles mi-hivernales les 18-19 décembre 2023, puis le 31 décembre 2024. Néanmoins, dans les jours qui ont suivi, les conditions hydrométéorologiques n'ont pas engendré d'engorgement du bief du centre-ville. Ainsi, le dragage du réservoir a légèrement amélioré la plage de débits dans laquelle les conditions hydrauliques permettent la rétention du frazil.

Cependant, force est de constater que des épisodes de légères crues tôt en hiver sont à l'origine de la destruction précipitée du couvert de glace initial, ce que l'on souhaite éviter. À l'exemple des conditions de gestion observées au PK 24 et des calculs complétés pour l'étude de Beaulieu et Simard-Robitaille (2025), le retour aux conditions hydrauliques favorables pendant la décrue, concurremment au retour du grand froid, présentent autant de difficultés pour capter tout le volume de frazil voulu en amont du barrage de Saint-Raymond. À cet égard, le frazil est généré de nouveau dans les rapides nouvellement dégagés en amont de Saint-Raymond.

Dans son état actuel, le barrage de Saint-Raymond est maintenant considéré comme étant désuet et non conforme aux nouvelles normes de génie civil et de géotechnique. Des enjeux d'infiltration d'eau et de résurgence en rive gauche ainsi que de capacité portante des sols ont été identifiés (Godin et coll. 2020). Il faudra prendre en considération que les divers scénarios de remplacement

ou d'enlèvement du barrage actuel demanderont des activités de dragage d'entretien, ce que les propositions faites dans Beaulieu et Simard-Robitaille (2025) soulignent.



Figure 98 : Frasil dans le réservoir du barrage de Saint-Raymond, le 14 décembre 2022.

### 3.12 Système de retenue des glaces au site du PK 10,5 (SRG)

#### 3.12.1 Fonctions recherchées

Le système de retenue des glaces (SRG) du PK 10,5 a pour rôle de ralentir l'arrivée prématurée des trains de glace au centre-ville. En retenant la glace en débâcle suffisamment longtemps en amont, au PK 10,5, l'onde de crue est susceptible de libérer, plus en aval, le tronçon voisin du centre-ville de ses glaces. En raison de la configuration du site au PK 10,5, le surplus d'eau lors de la montée de crue passe par de part et d'autre du SRG, dans la vaste plaine inondable de 260 m de largeur. Le SRG est conçu pour retenir les trains de glace durant un certain temps, jusqu'à un débit de 250 à 325 m<sup>3</sup>/s à Chute-Panet, lorsque la résistance du couvert de glace en amont est atteinte.

Une fonction secondaire du SRG consiste à fragmenter certains blocs de glace, lors de redoux ou de fonte thermique au printemps. Ainsi, les blocs de glace devenus plus petits sont moins propices à former de gros embâcles plus en aval.

Ceci nous amène à préciser les paramètres qui ont guidé le choix du site du PK 10,5 par l'équipe de l'UL et celle d'Environnement Nordique pour implanter le SRG.

### 3.12.2 Critères de conception du SRG sur la rivière Sainte-Anne

Les paramètres associés à la conception de cet ouvrage font l'objet d'un rapport détaillé (Simard-Robitaille et Beaulieu, 2025) en complément au présent document. La liste présentée ci-dessous représente un résumé des principaux paramètres pris en compte dans la réalisation du SRG. Douze critères ont été retenus à savoir :

1. choisir un site propice aux objectifs, notamment avec une large plaine inondable;
2. limiter la réduction de la section d'écoulement et exploiter la plaine inondable;
3. tirer avantage de la formation d'un barrage suspendu de frasil au travers de la structure;
4. freiner efficacement les glaces dans leur progression vers l'aval;
5. résister aux poussées induites par les glaces;
6. bénéficier d'un aménagement flexible;
7. privilégier l'usage de matériaux d'usage courant;
8. limiter les coûts à un niveau acceptable;
9. conserver l'intégrité de la couche de silt argileux sous le lit;
10. limiter les perturbations du milieu naturel (continuité écologique et géomorphologique);
11. faciliter l'enlèvement des débris de bois et autres entretiens;
12. limiter les risques pour les usagers de la rivière (canoteur, motoneigiste, etc.).

Le site du SRG doit d'abord être impérativement situé en amont du centre-ville de Saint-Raymond, que l'on souhaite protéger. La présence d'une large plaine inondable constitue le critère de conception en hydraulique fluvial le plus important. Selon Morse et coll. (2006), une large plaine inondable permet d'augmenter de plus de 50 % l'efficacité d'une structure de retenue des glaces.

De plus, la profondeur d'eau doit être assez faible pour éviter d'avoir à mettre en place une structure haute et coûteuse. Le milieu physique doit également comporter un accès existant pour les camions, sinon des conditions favorables à son aménagement (capacité portante des sols, topographie, etc.).

En amont du SRG, dans la zone d'accumulation des glaces et de refoulement de l'eau, le milieu humain doit être peu développé. L'absence de bâtiments, de routes et d'infrastructures sensibles aux inondations et aux mouvements des glaces est recherchée.

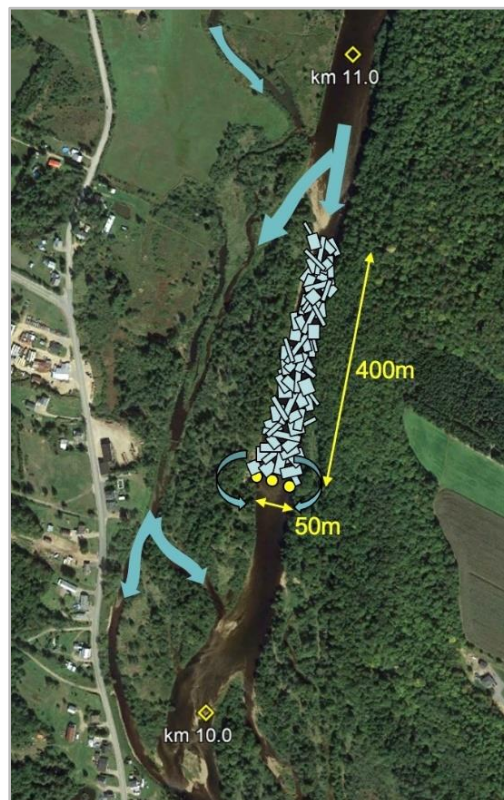
Des embâcles survenaient déjà naturellement environ une année sur deux au site du PK 10,5 (figure 99), ce qui confirme qu'il existait une prédisposition favorable à la rétention des glaces.



**Figure 99 :** Embâcle naturel au PK 10,5 avant l'aménagement du SRG (photo du 9 janvier 2020).

La prévalence naturelle des embâcles au droit du PK 10,5 a contribué à faciliter l'adhésion sociale au projet et l'obtention des diverses autorisations environnementales. L'aménagement est perçu par plusieurs comme étant près de la nature.

Le secteur du PK 10,5 possède une plaine inondable de 260 m de largeur avec plusieurs chenaux de crue, comme le montre la figure 100. La mouille en amont du SRG permet de stocker de la glace sur une longueur de 400 m et offre, en rive droite, un chenal favorable à l'évacuation de l'eau.



**Figure 100 :** Schématisation de la circulation de l'eau lors d'un embâcle de glace au site du PK 10,5.

Le caractère novateur du concept proposé sur la rivière Sainte-Anne devait permettre des modifications et des ajouts, à un coût raisonnable.

Dans l'éventualité où le SRG causait des dommages inattendus ou offrait un rendement trop faible, il se devait d'être amovible. Ainsi, l'utilisation de blocs de taille combinée à la mise en place d'un lit armé composé de matériaux naturels s'est avérée un choix judicieux tant sur le plan de la réalisation technique que sur le plan financier.

### 3.12.3 Description

Le SRG est principalement constitué des éléments suivants :

- trois rangées de gros blocs de taille en granite émergeant du lit de la rivière;
- huit blocs rocheux dynamités près des rives pour contenir les glaces;
- un segment de 34 m du lit renforcé par un matelas de pierre pour prévenir l'affouillement;
- la stabilisation de la rive gauche, la plus sollicitée;
- l'implantation d'une arbustaie à l'entrée du chenal de crue en rive droite;
- une végétalisation arbustive dense de la plaine inondable au site d'accès, en rive droite.

Les trois rangées de blocs de taille en granite sont placées plus ou moins perpendiculairement à la rivière, dans un lit renforcé de pierres anguleuses. Les blocs possèdent une masse de 17 tonnes chacun et sont munis de deux petits cubes de granite, de part et d'autre, pour augmenter leur stabilité tout en limitant la masse de l'ensemble (figure 101). Un bloc en forme de pyramide tronquée aurait été stable, mais trop lourd; il aurait fait augmenter les coûts de transport et d'installation.



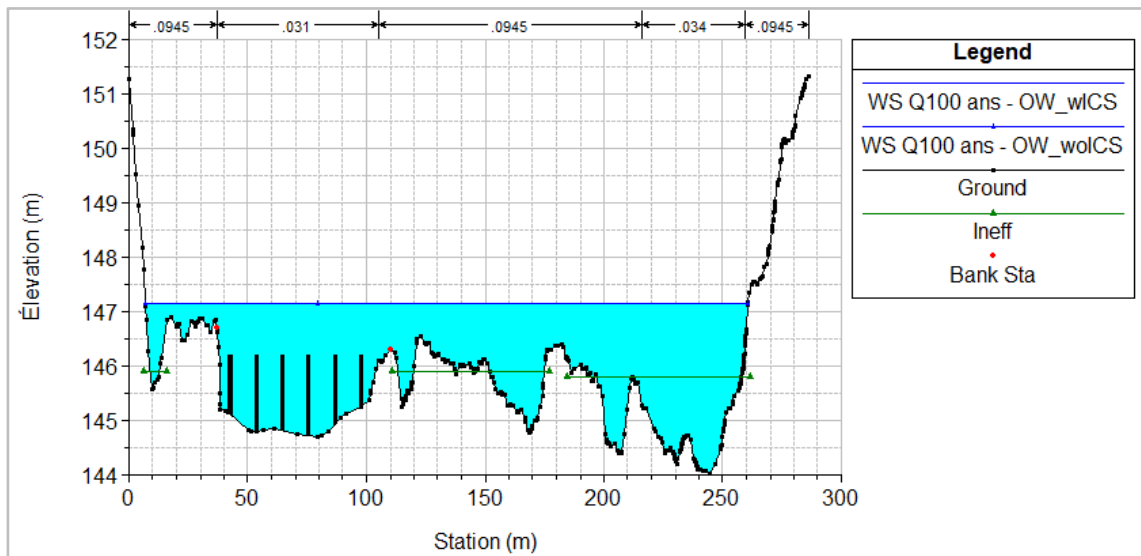
**Figure 101 : Levage d'un bloc de taille avec une excavatrice de 74 tonnes (25 août 2022).**

Bien que l'on désigne de manière usuelle leur composition comme étant du « granite », les blocs de taille sont en fait composés d'une roche de type gneiss ou gneiss granitique d'une masse volumique de 2,6, soit de 2 600 kg/m<sup>3</sup>. Ces blocs mesurent 2 m de hauteur et sont enfouis d'environ 0,8 m de manière à les laisser dépasser de la surface du lit de 1,2 m. Les blocs de chaque rangée sont placés en quinconce par rapport à ceux de la rangée voisine et l'eau circule alors entre les blocs de taille. Le patron de répartition et la distance entre les blocs ont été déterminés de manière à limiter l'accumulation des débris de bois tout en retenant les glaces dans leur transit (figure 102). Les trois rangées de blocs de taille en granite sont placées, dans un lit renforcé de pierres anguleuses. Ces blocs forment en quelque sorte une trémie destinée à retenir les embâcles de glace en amont du PK 10,5 et à retarder leur arrivée dans le tronçon voisin de la zone urbaine vers le PK 5,5.



**Figure 102 : Débris accumulé sur les piliers d'une estacade en ligne droite dans la rivière Duberger (11 juin 2020).**

Sur le plan hydraulique, mentionnons que le SRG occupe seulement 12 % de la largeur du lit mineur et 3 % de celle de la plaine inondable. L'élévation des niveaux d'eau en amont, par le refoulement de l'eau en crue, est plus faible que les limites de précision offertes par la modélisation hydraulique avec le logiciel HEC-RAS (< 10 cm). Par ailleurs, la modélisation démontre que, lors d'une crue de récurrence 100 ans, toute la plaine inondable est inondée (figure 103). De plus, l'ajout des blocs n'augmente pas significativement la vitesse moyenne de l'écoulement pour les débits de crues étudiées.



**Figure 103 : Section d'écoulement au SGR lors d'une crue de récurrence 100 ans.**

### 3.12.4 Travaux

Les travaux ont été réalisés en deux phases du 15 août au 7 novembre 2022 par l'entreprise Rochette Excavation et son sous-traitant Pépinière et Paysages Marcel Marin. La surveillance a été assurée par Simon Bélanger et Thomas Simard-Robitaille. La première phase des travaux du SRG a été complétée en 15 jours ouvrables, le 8 septembre 2022, a impliqué principalement la préparation de la voie d'accès et la mise en place de la pierre et des blocs rocheux dans la rivière. Pour sa part, la deuxième phase consacrée à la stabilisation végétale en rive et dans la plaine inondable s'est terminée après 6 jours de travail le 7 novembre 2022, en période de dormance des arbustes. Au total, les travaux ont requis 21 jours, dont seulement 8 jours en rivière pour la construction du SRG.

Les travaux ont exigé l'utilisation de 3 740 tonnes de pierres dynamitées, 17 blocs de taille représentant une masse de 290 tonnes, 610 m<sup>2</sup> de BioD-Mat 90 et la mise en terre de 128 m de rang de plançons de saules et de cornouiller. Plusieurs des composantes du SRG sont illustrées sur l'extrait de plan des travaux de la figure 104.



**Figure 104 : Extrait du plan d'Environnement Nordique montrant le SRG.**

Trois excavatrices ont été utilisées pour réaliser les travaux efficacement et dans un court délai, considérant qu'ils doivent être réalisés lors de bas niveau d'eau. Le gabarit des excavatrices était de 20, 36 et 74 tonnes. Celle de 74 tonnes de type CTA 374D a dû être en partie démontée et réassemblée à proximité en raison de son poids qui excède les limites permises sur les routes publiques.

La capacité portante du chemin d'accès a d'abord été augmentée par la mise en place de pierre de calibre 0-300 mm et de gravier.

Pour accéder efficacement au centre de la rivière, l'entrepreneur a judicieusement installé un pont temporaire en acier d'environ 15 m de longueur fait de trois parties et assemblé sur le site (figure 105). En raison de l'espace restreint dans l'aire de virage pour les camions près du site des travaux, les composantes de ce pont ont dû être transportées sur une distance de 600 m en étant simplement glissé sur le chemin de gravier par une excavatrice.



**Figure 105 : Utilisation d'un pont temporaire en appui sur la rive gauche renforcée.**

Le lit a d'abord été excavé pour permettre la mise en place du matelas de pierre d'un calibre de 150 à 800 mm. La pierre dynamitée a été mise en place sur le lit excavé en débutant par les endroits qui ont permis aux excavatrices de circuler par la suite sur ce même matelas de pierre. Ceci visait à éviter de décohésionner le dépôt de silt sous-jacent à celui de galets et de petits blocs arrondis en surface.

Les blocs de taille ont été déchargés dans la sablière voisine pour être transportés, un par un, sur une distance d'environ 1 km avec une remorque dotée d'une petite plateforme (figure 101). L'utilisation de celle-ci a permis de réduire la longueur et la largeur requise pour l'aire de travail en rive gauche et de limiter les perturbations du milieu demandées par le MELCCFP.

Des fosses planifiées pour recevoir les 17 blocs de tailles ont été aménagées aux bons endroits et aux élévations requises, avec leurs assises de petites pierres de calibre 50-150 mm placées au godet de l'excavatrice (figure 106). Huit gros blocs rocheux dynamités ont été placés près des rives sur les surfaces plus élevées. Cette mesure a permis de limiter le nombre de blocs de taille dont les coûts sont plus élevés.



**Figure 106 : Installation d'un bloc de taille avec deux excavatrices, dont l'une munie d'un DGPS. Validation de la localisation et de l'élévation des blocs de taille par un arpenteur.**

À l'aval du SRG, un rang de gros blocs de calibre 900-1 200 mm avec un géotextile a été enfoui dans le lit de la rivière pour limiter le risque de déplacement des composantes du matelas de pierres. Le géotextile augmente la cohésion de l'aménagement et empêche une trop grande percolation de l'eau à travers le matelas de pierre (figure 107). On réduit ainsi localement l'écoulement hyporhéique à des fins environnementales, notamment pour les poissons.



**Figure 107 : Déroulage du géotextile appuyé sur la face amont du rang de blocs (6 septembre 2022).**

La stabilisation de la rive gauche a été faite par enrochement sur une longueur de 82 m. Pour sa part, le petit talus de la rive droite, moins sollicitée, est demeuré naturel. Toutefois, le matelas de pierres se prolonge du côté de la rive droite afin de stabiliser l'entrée d'un chenal de crue. Des rangs de plançons avec des amendements de sol appropriés ont été aménagés dans le matelas de pierre

(figures 108 et 109). Ces plançons se développent pour former des arbustives riveraines résilientes face aux perturbations par les glaces. Ces arbustives sont une composante vivante de l'ouvrage de génie que constitue le SRG avec une fonction hydraulique bien précise. En effet, une fois développées, elles augmenteront la friction qui limite l'écoulement de l'eau et des glaces vers l'entrée du chenal de crue, en rive droite (figure 104). Le SRG complété est présenté à la figure 110.



**Figure 108 : Mise en place des rangs de plançons de saules et de cornouiller (26 octobre 2022).**



**Figure 109 : Plançons protégés de la glace par des pierres de 150 à 800 mm (27 octobre 2022).**



**Figure 110 : SRG le 28 octobre 2022, en présence d'un débit de 45 m<sup>3</sup>/s à Chute-Panet.**

En rive gauche, l'aire de travail a été restaurée par la mise en place de rang de plançons, de BioD-Mat 90 et par l'ensemencement d'herbacés (figure 111). Comme à l'entrée d'un chenal de crue de la rive opposée, l'utilisation de rang de plançons vise à limiter l'écoulement de l'eau et de la glace, mais cette fois-ci sur la plaine inondable afin de limiter son érosion potentielle. À long terme, l'érosion de la plaine inondable pourrait creuser un nouveau lit mineur et favoriser le contournement du SRG par la rivière.



**Figure 111 : Restauration végétale de la plaine inondable en rive gauche.**

Le coût des travaux correspond à 1 086 511\$, avant les taxes. À ceci s'ajoutent les frais de 280 344 \$ associés aux diverses études, à la préparation des plans et devis, aux demandes d'autorisation environnementale ainsi qu'à la surveillance des travaux. Le montant versé au MELCCFP et à la CTPAQ est de 74 927\$ à titre de compensation pour les modifications des milieux hydriques et humides et pour le traitement des demandes. Le montant total est alors de 1 441 782\$ avant taxes. Les frais ont été partagés entre le MSP et la Ville de Saint-Raymond selon le ratio

usuel. Soulignons que cet ouvrage a été assujéti au même décret que les activités de cadre du dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond au PK 6,15.

### 3.12.5 Aspects environnementaux

Les interventions ont exigé une démarche peu commune d'obtention d'autorisations environnementales et de compensations décrétées par le MELCCFP en date du 9 mars 2022 (Décret n° 239-2022). Préalablement à l'obtention de ces autorisations, les questionnements les plus importants des analystes ont porté principalement sur deux aspects, l'un relevant de l'hydraulique fluviale et du comportement anticipé du SRG sur la glace et l'autre sur l'écologie aquatique et la géomorphologie.

En ce qui concerne les aspects de l'hydraulique et, comme nous l'avons déjà mentionné, il a été démontré par modélisation aux ingénieurs du MELCCFP que le SRG a très peu d'effet sur les niveaux d'eau tant en crue qu'en étiage. Les variations des vitesses d'écoulement par l'ouvrage sont très faibles. Malgré ceci, un suivi environnemental sur les profondeurs d'eau et les vitesses d'écoulement d'une durée de 7 ans a été imposé par le MELCCFP et le MPO. De plus, ce suivi doit porter sur l'évolution géomorphologique de la rivière sur un tronçon d'environ 700 m de longueur.

Lors des travaux, l'utilisation d'un pont temporaire en acier au-dessus du thalweg en rive gauche a été une bonne décision qui a permis de réduire considérablement le temps d'exécution des travaux et de limiter la durée des impacts sur le milieu. L'emploi d'une boîte à pierre a eu le même effet (figure 64, section 3.6.4).

Au sujet de l'écologie aquatique, les analystes ont voulu s'assurer que SRG permette la libre circulation du poisson en période d'étiage. Certains craignaient que la totalité de l'eau ne s'écoule entre les pierres lors de l'étiage. Comme le matelas de pierre est enfoui dans le lit, c'est la partie aval du lit qui contrôle principalement la circulation de l'eau au-dessus du matelas de pierre. À moins d'un changement majeur dans le profil du lit à l'aval, les débits d'étiage offriront une profondeur d'eau de plus de 30 cm sur le SRG, ce qui est plus que suffisant pour les déplacements des espèces de poissons présentes dans la rivière. De plus, le géotextile enfoui dans le lit de la rivière offre une barrière à l'écoulement et empêche une trop grande percolation de l'eau à travers les pierres (figure 107).

Afin de redonner autant que possible un substrat d'aspect plus naturel au lit de la rivière aménagée, le matelas de pierre de calibre 150-800 mm a été partiellement recouvert de galets et de petits blocs

arrondis issus des déblais provenant initialement du lit. En raison de la taille des interstices, ce sont surtout des galets qui ont été placés. Ces galets occupaient environ 40 à 50 % des surfaces à la fin des travaux (figure 112).



**Figure 112 : Galets arrondis mis en place sur le matelas de pierre (8 septembre 2022).**

### 3.12.6 Suivi et efficacité

#### ***Composantes techniques***

Une première visite de terrain pour vérifier la formation du couvert de glace au SRG s'est tenue le 24 novembre 2022, lors du premier épisode de prise des glaces (Bélanger et Simard-Robitaille 2024). En effet, deux épisodes de prises des glaces se sont produits durant l'hiver 2022-2023 en raison d'un redoux accompagné de pluie. Pendant un redoux, de fortes pluies provoquent fréquemment de petites débâcles au début de l'hiver, suivi d'un nouvel épisode de reprise de la glace. Le tableau 5 présente les dates de visites de terrain pour le suivi, les débits et les remarques pertinentes.

**Tableau 5 : Dates des visites de terrain au site SRG.**

<b>Date</b>	<b>Débit en m<sup>3</sup>/s *</b>	<b>Remarque</b>
13 septembre 2022	14,6	Relevé d'arpentage du SRG
13 octobre 2022	18,5	Relevé pré hivernal de la bathymétrie au DGPS
28 octobre 2022	43	Inspection du SRG complétée
24 novembre 2022	20 <sup>R</sup>	Première prise de la glace
8 décembre 2022	192 <sup>R</sup>	Crue à 240 m <sup>3</sup> /s avec débâcle précoce
14 décembre 2022	35 <sup>R</sup>	Début de la seconde prise de la glace
19 décembre 2022	26 <sup>R</sup>	Lente prise de la glace avec eau libre
22 décembre 2022	23 <sup>R</sup>	Par drone: lente prise de glace avec eau libre
1 <sup>er</sup> janvier 2023	130 <sup>R</sup>	Par drone: pointe de crue du 1 <sup>er</sup> janvier à 187 m <sup>3</sup> /s
9 février 2023	11 <sup>R</sup>	Prise de photos et inspection
17 mars 2023	12 <sup>R</sup>	Couvert de glace continue
28 mars 2023	13 <sup>R</sup>	Couvert de glace continue
14 avril 2023	73 <sup>R</sup>	Fonte, lente débâcle thermique
14 juin 2023	20	Étiage: mesure des vitesses et photos des rives
12 juillet 2023	477	Pointe à 760 m <sup>3</sup> /s le 11 juillet à 14h45
24 août 2023	39	Pour reprise de la stabilisation végétale
28 août 2023	29	Relevé après crue de la bathymétrie au DGPS
4 octobre 2023	15	Prise de photos et inspection
19 décembre 2023	972 <sup>P</sup>	Prise d'une vidéo par drone professionnel
28 février 2024	14	Mesure de l'épaisseur du couvert de glace
27 avril 2024	77	Observations et prise de photos
10 mars 2025	29	Observations et prise de photos

\* Débits moyens journaliers enregistrés à la station 050408 de Chute-Panet

R Refoulement par la glace en aval de la station

P Débit de pointe provisoire enregistré à la station 050408 de Chute-Panet

Des caméras fixées à des arbres en deux endroits distincts ont permis la prise automatique de photographies à intervalle d'une heure entre novembre 2022 et mai 2024. Ces photographies sont assemblées dans de courtes vidéos journalières.

Les nombreuses visites sur le terrain confirment que le SRG n'a pas favorisé l'accumulation significative de débris de bois (figure 113).



**Figure 113 : Petit arbre coincé sur le bloc voisin de la rive gauche le 12 juillet 2023.**

Durant la période couverte par le suivi, 5 événements de crues se sont produits pour la rivière Sainte-Anne, aux dates et aux débits instantanés précisés au tableau 6. Les pointes des 18 avril et 2 mai 2023 font partie du même événement que représente la crue du printemps 2023.

**Tableau 6 : Dates et débits de pointe des crues.**

Date	Débit en m <sup>3</sup> /s *
7-8 décembre 2022	240 d-r
1 <sup>er</sup> janvier 2023	187 d-r
18 avril 2023	359
2 mai 2023	760
11-12 juillet 2023	760
18-19 décembre 2023	977 d-r
13 avril 2024	549

\* Débits enregistrés à la station 050408 de Chute-Panet  
d-r : Débâcle et redoux

Il est intéressant de rappeler que les événements du 2 mai et celui du 12 juillet correspondent à des crues de récurrence légèrement inférieures à 20 ans, alors que celle du 18 décembre s'approche d'une récurrence de 70 ans (estimation, non calculée). Ces trois événements majeurs ont été répertoriés durant une période de 7 mois au cours de la seule année 2023. Même si les débits enregistrés durant l'hiver 2022-2023 sont inférieurs à ceux des crues majeures en eau libre, leur potentiel d'érosion et de modification géomorphologique demeure significatif en raison de la présence du couvert de glace et des embâcles qui induisent des obstructions (Turcotte et coll.,

2011). Même à faible débit, ces obstructions peuvent causer de l'érosion locale ou des rehaussements notables du niveau d'eau.

Les inspections du SRG ont permis de constater que ses diverses composantes sont demeurées stables, intègres et fonctionnelles durant les deux premières années de suivi réalisées. Les blocs de taille, les deux trios de gros blocs, les enrochements en rive et le matelas de pierres ont conservé leur position (figure 114).



**Figure 114 : Photo panoramique du SRG et de son rapide en aval, le 28 août 2023 à 29 m<sup>3</sup>/s.**

Le débit seuil à partir duquel la glace commence à transiter vers l'aval constitue le principal paramètre que nous cherchons à déterminer lors du suivi. Ce paramètre dépend de l'état initial du couvert de glace qui est, pour sa part, directement influencé par les conditions météorologiques. Depuis l'aménagement du SRG, jamais le couvert de glace n'a été optimal pour retenir efficacement la glace en amont de la structure lors des crues. Lors des débâcles mi-hivernales, soit le front de frazil se situait en aval, soit il venait tout juste de progresser en amont du SRG, aidé par une chute de neige. Lors des débâcles printanières, le couvert de glace était grandement dégradé thermiquement par les températures des jours précédents.

Lors de la débâcle printanière de 2023, la glace accumulée en amont du SRG et en partie dégradée thermiquement a majoritairement fondu en place avant de transiter vers l'aval. Ainsi, au printemps 2023, le SRG a été en mesure de retenir les glaces pendant environ 12 heures. Les glaces accumulées ont majoritairement fondu en place. Pendant ce temps, le tronçon voisin du centre-ville avait été libéré de sa glace; c'est l'effet recherché à l'origine du SRG. Le volume de glace retenu n'était toutefois pas suffisant pour créer des problèmes d'inondation au centre-ville.

L'hiver suivant, en décembre 2023, un redoux a provoqué une forte crue et une débâcle totale. Ainsi, le 18 décembre 2023, le couvert de glace n'était pas assez consolidé pour retenir les glaces au SRG. La figure 115 illustre cependant que les plaques de glaces non consolidées et stockées

en rive droite ont été retenues pendant une courte période en amont du SRG. L'aménagement a toutefois permis de fragmenter les blocs de glace en petits morceaux. Ce phénomène ne présente pas d'intérêt particulier pour le moment, le SRG étant conçu pour travailler avec des embâcles et/ou un barrage consolidé de frasil.



**Figure 115 : Fragmentation de la glace par le SRG le 19 décembre 2023. La rangée amont des blocs du SRG est surlignée en jaune.**

Dans le contexte propre au secteur du SRG de la rivière Sainte-Anne, la progression du couvert de glace vers l'amont est souhaitable aux fins de contrôle des inondations (Turcotte et Morse 2015). En effet, une fois formé en amont du SRG et en considérant la prochaine débâcle, le couvert de glace offre un butoir naturel permettant d'amortir les trains de glace durant leur transport rapide vers l'aval. À l'hiver 2022-2023, la progression du couvert de glace en amont du SRG a été possible grâce à l'embâcle formé sur cet ouvrage le 1<sup>er</sup> janvier 2023. Durant les semaines précédentes, les températures étaient trop clémentes pour former un barrage consolidé de frasil qui remonterait à l'amont du SRG. À l'hiver 2023-2024, le front de frasil a aisément progressé à l'amont du SRG à la suite de deux journées froides en début décembre. Cela confirme que le SRG n'entrave pas la progression du front de frasil vers l'amont; il s'agit d'un des rôles initialement prévus pour cet ouvrage.

Malheureusement, le couvert n'a pas été en mesure de bien s'épaissir naturellement et il a été emporté lors de la débâcle majeure du 18 décembre. Notons toutefois que le débit atteint lors de cet événement (972 m<sup>3</sup>/s) est supérieur au débit seuil pour retenir les glaces en amont. Selon nos observations, les glaces peu résistantes ont réussi à transiter en aval du SRG lorsque le débit se situait entre 150 et 200 m<sup>3</sup>/s. Pour un couvert stable et résistant, le débit seuil n'a pas pu être établi et sera précisé par les suivis à réaliser au cours des prochaines années.

L'hiver 2023-2024 a été l'un des plus doux des dernières décennies avec une température moyenne, durant les mois les plus froids de janvier et février, d'environ 5°C inférieurs à la normale établie par Environnement Canada. Malgré ce temps doux, un couvert de glace continu s'est formé en amont du SRG. Le 28 février 2024, une caractérisation du couvert de glace a été réalisée à l'aide de 12 sondages à la tarière de 10 à 200 m en amont du SRG (figure 116).



**Figure 116 : Sondage du couvert de glace, le 28 février 2024, à 20 m en amont du SRG.**

Le 28 février 2024, l'épaisseur du couvert de glace était généralement de 35 à 40 cm. Des accumulations d'épaisseur très variable de frasil non consolidé ont été mesurées sous ce couvert de glace.

Par la suite, des températures douces ont provoqué une lente dégradation thermique du couvert de glace. Dès le 30 mars, la majorité du couvert de glace avait fondu entre les PK 10 et 24. Lors de la crue printanière débutée le 11 avril avec un maximum le 13 avril, le couvert de glace avait complètement fondu sur place. Les conditions optimales d'utilisation du SRG n'ont donc pas été remplies à ce jour.

Souignons, par ailleurs, qu'une augmentation de la fréquence à former un BCF en amont du barrage de Saint-Raymond contribuerait assurément à optimiser l'effet du SRG. Cette opportunité a été invoquée à la section 3.11.5 et dans le rapport de Beaulieu et Simard-Robitaille (2025).

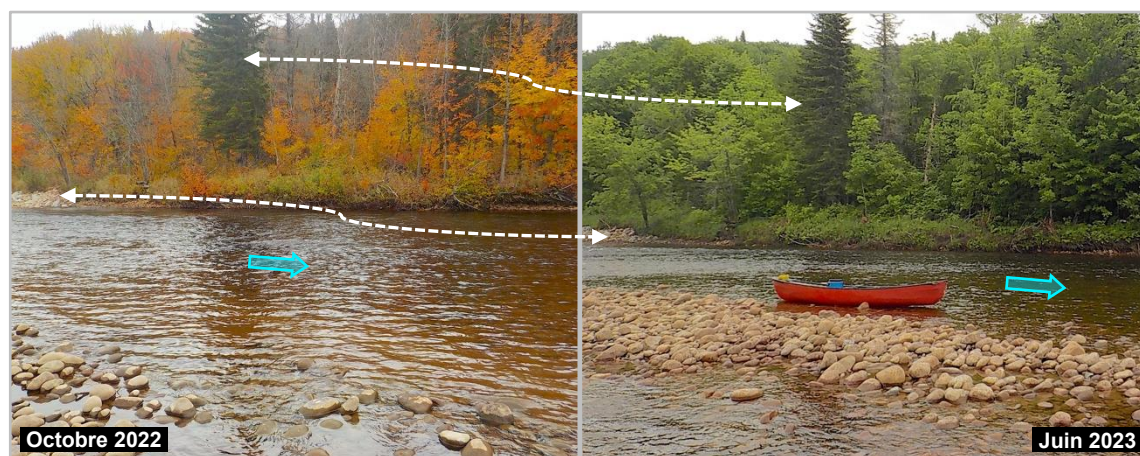
### **Composantes environnementales**

Les aspects environnementaux du suivi portent principalement sur l'érosion des rives et du lit de la rivière dans le secteur du SRG, sur la reprise de la végétation en rive et sur les conditions de déplacement du poisson après l'aménagement.

### **Érosion**

Pour documenter l'évolution et l'érosion des rives, des photographies de l'état de référence avaient été prises au préalable immédiatement après les travaux en octobre 2022. Lors de ces prises de photographies, les cadrages se chevauchaient légèrement afin d'offrir une vue complète pour permettre des comparaisons visuelles entre les différentes années. Les autorisations du MELCCFP et du MPO sont conditionnelles à ce que soient réalisées des observations et une prise de données aux années 1, 3, 5 et 7 après les travaux, soit en 2023, 2025, 2027 et 2029.

Le premier suivi des rives a été réalisé le 14 juin 2023 à la faveur d'un étiage précoce et plutôt inhabituel. La figure 18 illustre cette comparaison d'un même segment de la rive gauche prise à 8 mois d'intervalle. Aucun changement important affectant les rives n'a été noté (figure 117).



**Figure 117 : Photos comparées du même segment de la rive gauche à  $\pm 40$  m en aval du SRG.**

Aucun changement géomorphologique n'a été observé dans le chenal secondaire, du côté du rang du Nord. Il en va de même pour la plaine inondable. Le chemin d'accès au site du SRG est demeuré en bon état en raison notamment de sa texture grossière, soit de la pierre et du gravier d'une granulométrie bien étalé entre 0-200 mm.

Des relevés de la bathymétrie d'un tronçon de 700 m du chenal principal de la rivière ont été réalisés après l'aménagement du SRG, le 13 octobre 2022 et après les crues, le 28 août 2023 (figure 118). Le détail de ces relevés et de leurs résultats est présenté dans l'étude de Bélanger et Simard-Robitaille (2024).



Figure 118 : Relevé bathymétrique au DGPS le 13 octobre 2022 en aval immédiat du SRG.

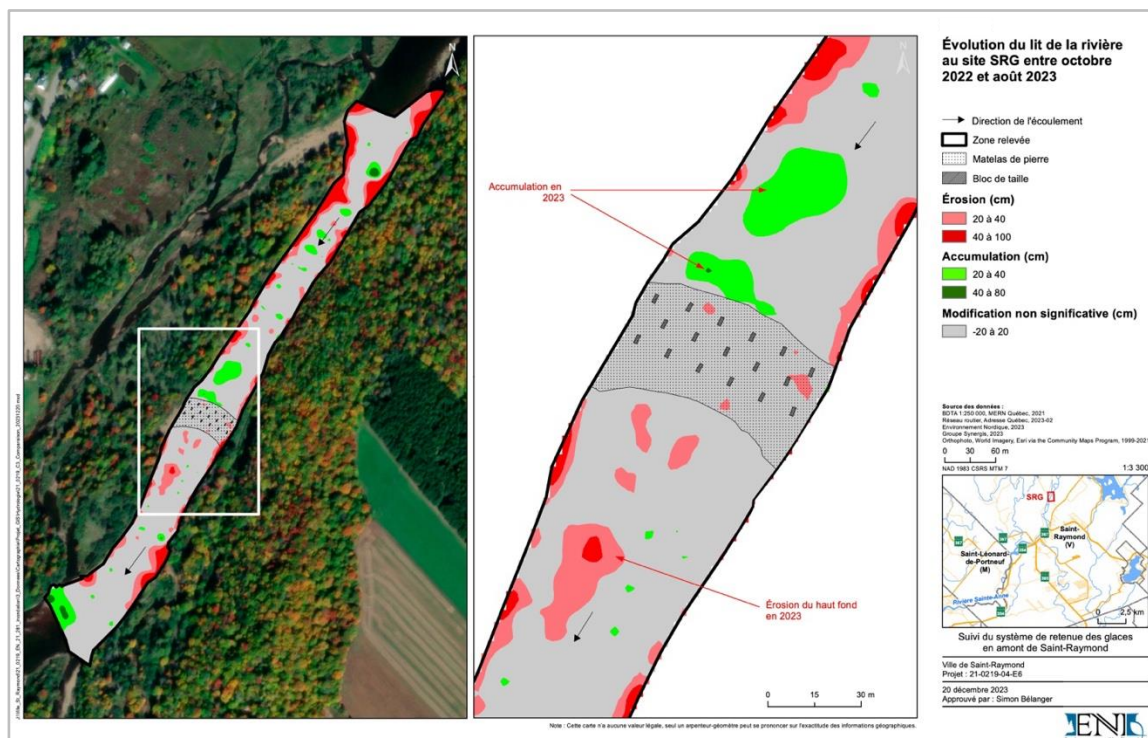


Figure 119 : Bathymétrie comparée extraite du rapport de Bélanger et Simard-Robitaille (2024).

Le principal effet géomorphologique du SRG est le remodelage du haut-fond en aval du SRG (figures 119 et 120). Les modifications mineures constatées sur le haut-fond sont conformes à ce qu'il avait été anticipé.

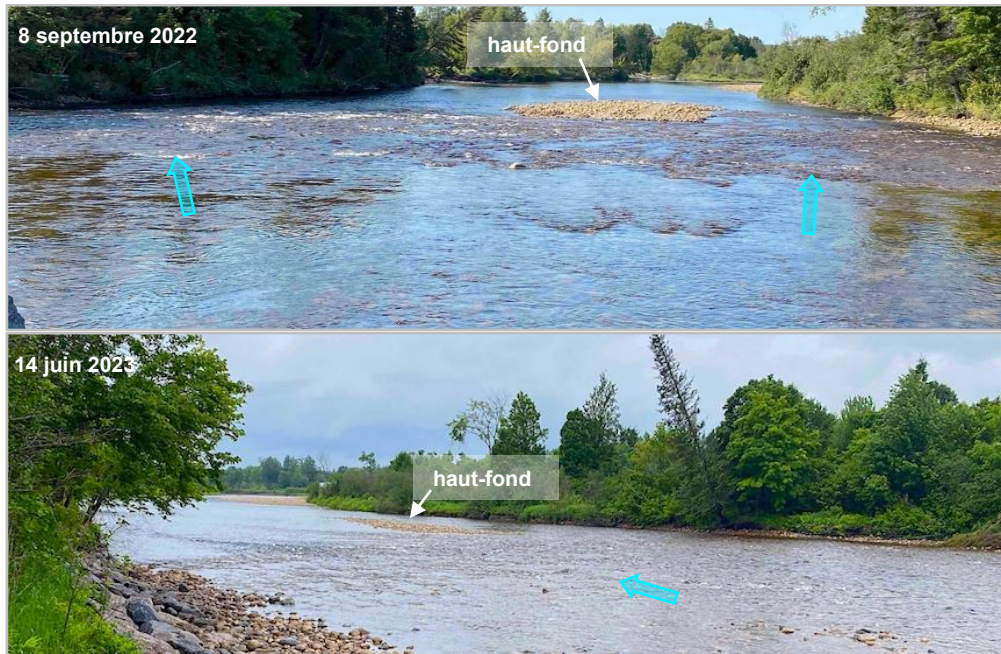


Figure 120 : Haut-fond émergeant remodelé par les crues après l'aménagement du SRG.

### ***Reprise de la végétation***

La reprise de la végétation en rive est en grande partie dépendante de la résistance des aménagements aux contraintes hydrauliques. La stabilité du sol du côté de la rive gauche a été assurée par une natte de fibre de coco anti-érosion de fort calibre nommée BioD-Mat 90. Cette natte a bien résisté à l'écoulement de l'eau, des débris et des glaces malgré la crue de 760 m<sup>3</sup>/s des 11 et 12 juillet. La reprise des plançons est bonne (figure 121) et se poursuivra au cours de prochaines années. Il ne faut pas perdre de vue que les plançons étaient dépourvus de racines lors de leur mise en place; la croissance des arbustes montrés à la figure 121 ne fait que débiter.



Figure 121 : Reprise de la végétation en rive, incluant les rangs de plançons, durant l'été 2023.

### ***Circulation du poisson***

Les vitesses de l'écoulement et la profondeur d'eau sur le SRG et à son aval immédiat ont été mesurées pour confirmer la validité des aménagements en faveur de la libre circulation de l'omble fontaine.

Les vitesses moyennes de chaque section d'écoulement se situent entre 0,40 m/s, sur le SRG, et 0,69 m/s dans le petit rapide en aval. La figure 122 montre la répartition spatiale des différentes classes de vitesses d'écoulement. Sur le SRG, les vitesses les plus élevées, en période estivale, se retrouvent surtout au centre de l'aménagement et elles sont inférieures à 1 m/s. De part et d'autre de la zone centrale, des bandes de quelques mètres de largeur offrent de vitesses de l'ordre de 0,5 m/s. En aval du SRG, les vitesses les plus élevées sont observables à environ 35 m de l'aménagement, vers la fin du petit rapide. Elles dépassent 1,2 m/s par endroit.

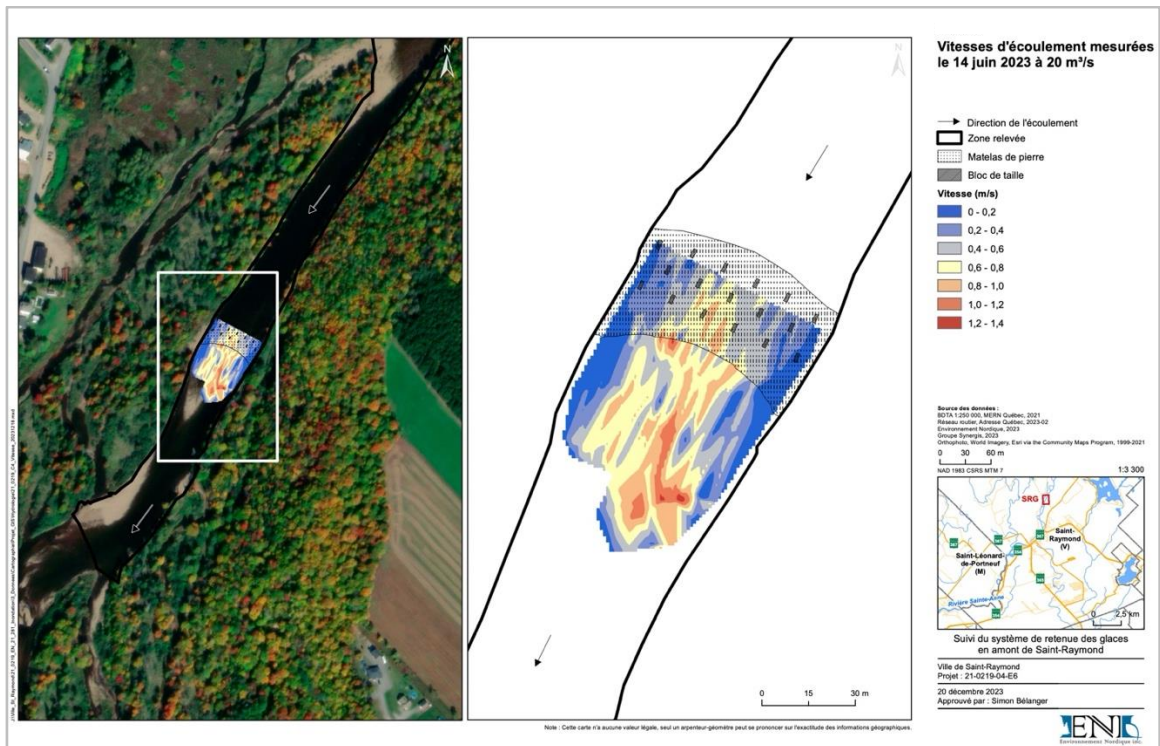


Figure 122 : Carte des vitesses d'écoulement (tirée de Bélanger et Simard-Robitaille 2024).

Les vitesses moyennes entre 0,40 et 0,69 m/s se situent bien en deçà de la vitesse de pointe que peut atteindre l'omble de fontaine. En effet, selon Goerig et coll. (2016), la vitesse de pointe de l'omble de fontaine varie, dans un ponceau, entre 1,5 et 3 m/s sur une distance de 10 à 30 m. En outre, la vitesse maximale observée est de 1,4 m/s à l'aval du SRG.

Concernant les profondeurs d'eau, les mesures ont été concentrées aux endroits les plus restrictifs, donc les moins profonds sur le SRG et à son aval immédiat, durant un étiage de 20 m<sup>3</sup>/s. Dans la partie centrale de la rivière, les profondeurs d'eau sont généralement supérieures à 40 cm. La profondeur d'eau est également plus faible (22 à 34 cm) à la fin du petit rapide (figure 120). De telles profondeurs ne limitent aucunement les déplacements des poissons, tant en dévalaison qu'en montaison. Elles sont par ailleurs très répandues dans d'autres petits rapides et sur des distances de plusieurs kilomètres, tant en amont qu'en aval du SRG.

## **4.0 AUTRES MESURES MISES EN ŒUVRE**

---

### **4.1 Comité Rivière**

Le Comité Rivière, formé depuis 2014 de citoyens, d'élus municipaux et de directeurs de services municipaux, a pour rôle de suivre les projets visant à réduire les risques d'inondations. Il résulte d'une initiative des citoyens qui avaient décidé de participer activement à la recherche de solutions plutôt que de se limiter à une prise en charge par les divers paliers de gouvernement.

Le Comité Rivière est soutenu par la CAPSA, l'organisme de bassin versant des rivières Sainte-Anne, Portneuf et le secteur Lac Chevroitière ainsi que son comité d'experts. Le Comité Rivière participe aux réunions avec la Ville et ses partenaires. Il est invité à faire part de ses observations et à donner son avis sur les impacts des mesures de protection. Il est ainsi tenu informé des interventions mises en œuvre, avant et pendant leur réalisation. Ceci implique les modalités de leur suivi et des risques résiduels d'inondation. Le Comité Rivière partage les informations concernant les divers volets et leur avancement sur les différentes plateformes informatives (site Web, Facebook, etc.).

### **4.2 Repères de crue**

L'installation de repère de crue dans la ville de Saint-Raymond vise à sensibiliser la population aux risques associés aux inondations et à entretenir la mémoire collective face à ces phénomènes. Les repères sont installés à des endroits stratégiques généralement très visibles.

La mise en place des repères de crue a été réalisée conjointement par la Ville et l'organisme de bassin versant la CAPSA. Le repère de crue retenu prend la forme d'un disque en aluminium de 15 cm de diamètre sur lequel est placé un autocollant qui précise l'élévation maximale du niveau d'eau atteint lors de l'inondation du 14 avril 2014 (figure 123). Il est placé soit sur le mur d'un bâtiment, soit sur un pieu (figure 124). Un total de 19 repères de crue et 3 panneaux de sensibilisations ont été installés.

La précision des relevés et des élévations a été confirmée par un rapport officiel de levé de l'arpenteuse-géomètre Élisabeth Génois.



Figure 123 : Modèle de repère historique de crue utilisé à Saint-Raymond.

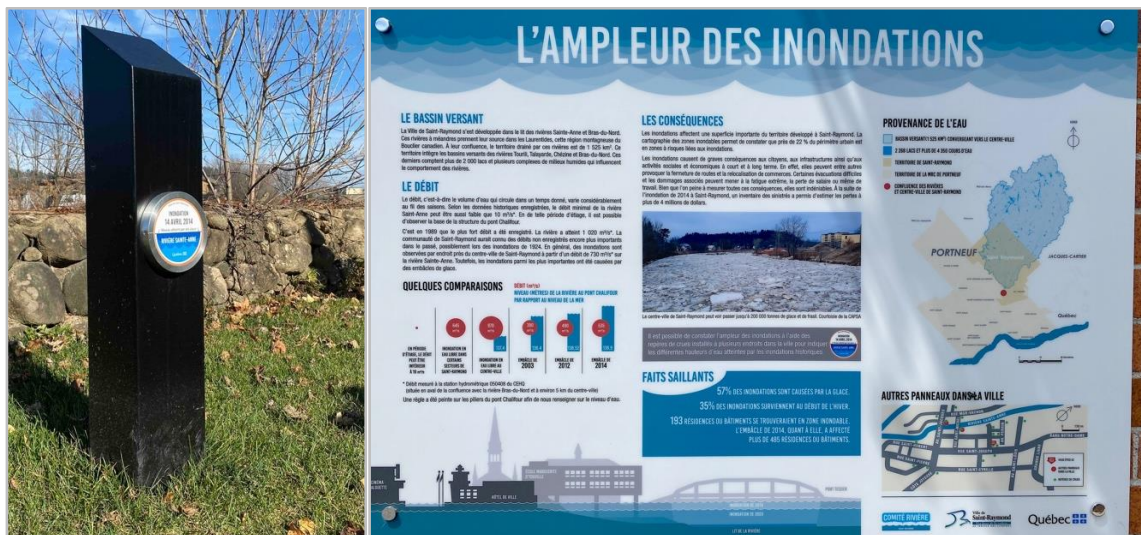


Figure 124 : Repère historique de crue dans un parc et panneau de sensibilisation sur un mur.

#### 4.3 Déménagement du poste de pompier et de sauvetage

Lors de la forte de crue d'avril 2014, le poste de pompier et de sauvetage situé au centre-ville a été inondé. Dans ce contexte, le personnel responsable du sauvetage a lui-même été sinistré, ce qui a considérablement compliqué son travail pourtant vital durant cet événement. La Ville a alors amorcé les démarches et le travail nécessaire à la relocalisation du poste des pompiers, dont la recherche de financement, la préparation des plans et devis, etc.

En septembre 2019, le nouveau poste des pompiers a été inauguré au coin de la rue Notre-Dame et du rang Grande Ligne, hors de la zone inondable (figure 125).



**Figure 125 : Nouveau poste de pompier au n° 103, rang Grande Ligne (photo, site Web de la Ville).**

Le Service des incendies de la Ville de Saint-Raymond avec son Centre des opérations d'urgence assure les activités de sauvetage sur les rivières de son territoire avec le concours de 16 pompiers spécialement formés.

Les coûts de déménagement et de construction de la caserne des pompiers sont de 4,4 millions en dollars de 2019. Un premier montant de 2 M\$ a été assumé par la Ville et un second montant 2,4 M\$ provient d'une subvention offerte par le Programme d'infrastructures Québec – Municipalités (PIQM), volet 5.1.

## **5.0 RÉDUCTION DU DMA ET SYNTHÈSE DES COÛTS**

---

### **5.1 Mise en contexte**

Le DMA réfère au « dommage moyen annuel » soit, à l'aspect monétaire du risque associé aux inondations à Saint-Raymond. Le texte suivant s'appuie principalement sur les analyses et les conclusions des ingénieurs et chercheurs, telles que présentées dans le rapport préparé pour le MSP par Turcotte et coll. (2021). La valeur des bâtiments et commerces a été présentée dans le rapport de Turcotte et coll. (2017). L'évaluation du DMA associée à des inondations par les glaces de même que l'appréciation du DMA résiduel à la suite de la mise en place de mesures d'atténuation serait un travail de recherche qui n'a pas été présenté dans une étude publiée à ce jour. Le projet serait alors une première scientifique.

### **5.2 Nature des aléas en lien avec le DMA et risque**

Les valeurs du DMA tiennent compte de trois aléas à savoir :

- les crues en eau libre (CEL);
- l'accumulation d'un barrage consolidé de frasil (BCF) et de glace;
- les embâcles lors de la débâcle printanière (EMB).

Le risque dépend de plusieurs facteurs :

- les trois aléas naturels (EMB, BCF, CEL) à l'origine des inondations;
- la vulnérabilité ou l'exposition des résidences, édifices, infrastructures, biens, personnes, liens de communication, liens de transport, etc.

### **5.3 Évolution du DMA avec les interventions déjà réalisées**

Selon Turcotte et coll. (2021), la valeur du DMA était de 1 340 000\$/an ( $\pm$  270 000\$), en se basant sur les mesures déjà en place en 2014, comme les digues du secteur du centre-ville. Toutefois, avec 12 mesures mises en œuvre en date de 2021, le DMA a déjà été réduit à 580 000\$/an (57 %).

Les représentants du MSP estimaient au début du projet que le retour sur investissement en matière de RRI devenait rentable avec un DMA amorti sur 20 ans. Dans la situation particulière de Saint-Raymond, il devenait justifiable d'investir 27 millions de dollars en valeur de 2021. Les mesures

complétées et comptabilisées avec le CPS ont coûté autour de **6 millions \$** en date du 31 mars 2025 (tableau 7). Les experts du projet s'entendent sur le fait que la **RRI obtenue est supérieure à 60 %** concernant les trois aléas précités.

Considérant le succès mesurable de ce projet unique dans son approche scientifique, environnementale et sociale, il serait pertinent de mettre à jour l'étude de 2021 et de projeter son étendue pour encadrer la phase 2 en cours de planification dans le cadre d'un autre programme (PRAFI). Benoit Turcotte, chercheur impliqué dans le projet depuis 2014, affirme, dans une communication personnelle (2024), qu'il en coûterait autour de 20 000 \$ pour procéder à une mise à jour de cet outil d'aide à la décision.

Il appert que la valeur résiduelle de 580 000 \$ du DMA estimée en 2021 additionnée des dommages collatéraux inconsiderés à l'époque et ajustée à la hausse sur la valeur des mêmes biens revisitée en 2025 justifie les investissements complémentaires à ce projet. Nous estimons qu'une somme actualisée de l'ordre de 10 à 12 millions de dollars se justifie, selon le **DMA évité**, pour :

- l'optimisation des aménagements de la rivière en milieu naturel, entre les PK 8 et 12;
- la mise aux normes du barrage de Saint-Raymond en regard de nouvelles fonctions hydrauliques étudiées récemment et touchant les aléas suivants : BCF et EMB.

#### **5.4 Synthèse des coûts par activité**

Le rendement supérieur à 60 % obtenu pour la réduction des risques d'inondation (RRI) par la glace et le frasil à Saint-Raymond provient de techniques adaptées de la recherche appliquée. Les méthodes standard utilisées à ce jour reposaient sur des structures issues de l'ingénierie traditionnelle. Les résultats obtenus sur la rivière Sainte-Anne s'appuient sur une série d'interventions combinant la gouvernance locale et des techniques destinées à restaurer les propriétés naturelles des milieux. Les coûts des interventions sont ventilés au tableau 7 où ces derniers incluent les taxes payées par la municipalité, le cas échéant.

Pour demeurer pertinents, les efforts consentis se devaient d'atteindre les objectifs suivants :

1. Présenter une diminution réelle du risque pour protéger la population et l'environnement;
2. Justifier par des outils de calcul scientifiques la prise de décision comme le DMA, des modèles maison de suivi des résultats, le système d'alerte précoce et des dispositifs de mesure sophistiqués;

3. Utiliser des techniques et matériaux différents, susceptibles de restaurer des conditions naturelles en demeurant efficaces;
4. Oser investir une fraction significative du budget total pour procurer des preuves tangibles d'un savoir-faire novateur et reproductible (items 0021 et 0021B, au tableau 7);
5. S'appuyer sur l'ensemble des données consignées ou non, des mesures, des modèles et des simulations pour bonifier l'offre proposée par le recyclage de vieux ouvrages pour les rendre plus performants au lieu de tout recommencer;
6. Redonner le leadership du projet à la Ville afin d'alléger le fardeau aux autorités québécoises et fédérales de supporter seules les aléas naturels récurrents en venant appuyer les autorités locales;
7. Projeter un futur réaliste en respectant la volonté des populations locales à vivre avec le milieu naturel et les infrastructures existantes. Ce respect de l'acceptabilité sociale et environnementale constitue le fondement de la démarche de RRI initiée dans la ville de Saint-Raymond, incluant les Premières Nations sensibles à de telles orientations;
8. Améliorer l'autonomie du projet et la rapidité d'intervention par rapport aux besoins réels.

**Tableau 7 : Répartition des efforts budgétaires en fonction des activités destinées à la RRI sur la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond**

N° de projet <sup>1</sup>	Titre	Études techniques	Études environnementales	Plans, devis, surveillance	Permis (légal et environnemental)	Compensations	Travaux	Total
0015	Réfection des digues	48 622\$	10 189\$	97 701\$	13 692\$	26 345\$	544 664\$	<b>741 213\$</b>
0017	Seuil rocheux PK 24		6 221\$	81 412\$		21 502\$	235 519\$	<b>344 654\$</b>
0018	Barrage Chute-Panet	376 518\$	61 993\$					<b>438 511\$</b>
0019	Retrait caissons de drave		73 766\$	96 537\$			376 469\$	<b>546 772\$</b>
0020	Système de retenue des glaces	179 408\$		140 607\$	14 165\$	74 016\$	990 825\$	<b>1 399 021\$</b>
0021	Coordination globale	821 145\$						<b>821 145\$</b>
0021B	Coordination environnementale		338 884\$					<b>338 884\$</b>
0022	Clapet Jacques-Labranche	20 392\$		43 484\$	692\$		308 666\$	<b>373 234\$</b>
0023	Mesures de sensibilisation						107 069\$	<b>107 069\$</b>
0025	Dragage global		119 046\$					<b>119 046\$</b>
0029	Dragage du réservoir barrage de Saint-Raymond			27 076\$	54 423\$	2683\$	499 732\$	<b>583 914\$</b>
0026	Émissaire Saint-Hubert			21 044\$		699\$	75 640\$	<b>97 383\$</b>
0027	Suivi hivernal 2021 et 2022	40 516\$						<b>40 516\$</b>
	<b>Total</b>	<b>1 486 601\$</b>	<b>610 099\$</b>	<b>507 861\$</b>	<b>82 972\$</b>	<b>125 245\$</b>	<b>3 138 584\$</b>	<b>5 951 362\$</b>

<sup>1</sup> Les numéros des projets de la VSR débutent par la séquence « Sec 2300- » avant ce qui est indiqué dans cette colonne.

## **6.0 SUIVIS ET ENTRETIENS**

---

### **6.1 Entretien et frais récurrents**

Les interventions mises en œuvre requièrent des suivis périodiques et quelques entretiens. Dans certains cas, les interventions et les frais liés sont récurrents, notamment pour :

- l'opération du système d'alerte précoce estimé à 50 000 \$/an;
- l'affaiblissement préventif du couvert de glace évalué à 85 000 \$/an;
- la mise en place de l'estacade flottante au PK 24 en novembre et son enlèvement en mai par la VSR;
- l'inspection des digues et le défrichage de certaines de leurs parties une fois par année par la VSR.

### **6.2 Entretien probable et suivis à anticiper**

Les informations disponibles en 2025 permettent de préciser certains entretiens, suivis environnementaux et suivis de la performance à planifier pour les 7 interventions suivantes :

- système d'alerte précoce;
- estacades flottantes au PK 24 et possiblement pour celle à installer en priorité dans le réservoir du barrage du PK 6,1;
- seuil de blocs au PK 24;
- dispositif anti-refoulement de la rue Jacques-Labranche au PK 6,05;
- dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond (PK ±6,35 à 6,15);
- système de retenue des glaces au PK 10,5.

## 7.0 POURSUITE DU PROJET

---

La poursuite du projet est essentielle pour maintenir les acquis et continuer de réduire la vulnérabilité du centre-ville de Saint-Raymond face aux inondations. À ce jour, l'ensemble des interventions ont permis de réduire le risque d'inondation d'environ 50 %; la poursuite du projet de RRI pourrait raisonnablement permettre d'atteindre une valeur d'environ 70 à 75 %, sachant qu'une baisse de 100 % pour atteindre le risque nul n'est pas réaliste. En plus du suivi des interventions déjà réalisées, la poursuite du projet de RRI devrait impliquer les volets englobant les cinq actions suivantes :

- gérer la glace en amont;
- gérer l'eau et la glace en aval;
- aménager une centrale hydroélectrique à Chute-Panet;
- augmenter l'espace de liberté de la rivière
- contrôler l'érosion en amont du réservoir de Saint-Raymond.

### 7.1 Gérer la glace et le frasil en amont

À la fin de l'été de 2023, la direction générale des barrages du MELCCFP a signalé son intention à la Ville de Saint-Raymond de disposer autrement du barrage X0001840 qui arrivait en fin de vie utile et posait des problèmes de rendement et de respect des normes.

Alors que la DGB s'attendait à devoir déboursier plusieurs dizaines de millions de dollars pour disposer autrement du barrage de Saint-Raymond, les informations non consignées dans les rapports de l'équipe de l'UL et celles développées par la Ville de Saint-Raymond dans d'autres aspects du projet de RRI ont permis de proposer le recyclage de l'ouvrage grâce aux éléments suivants :

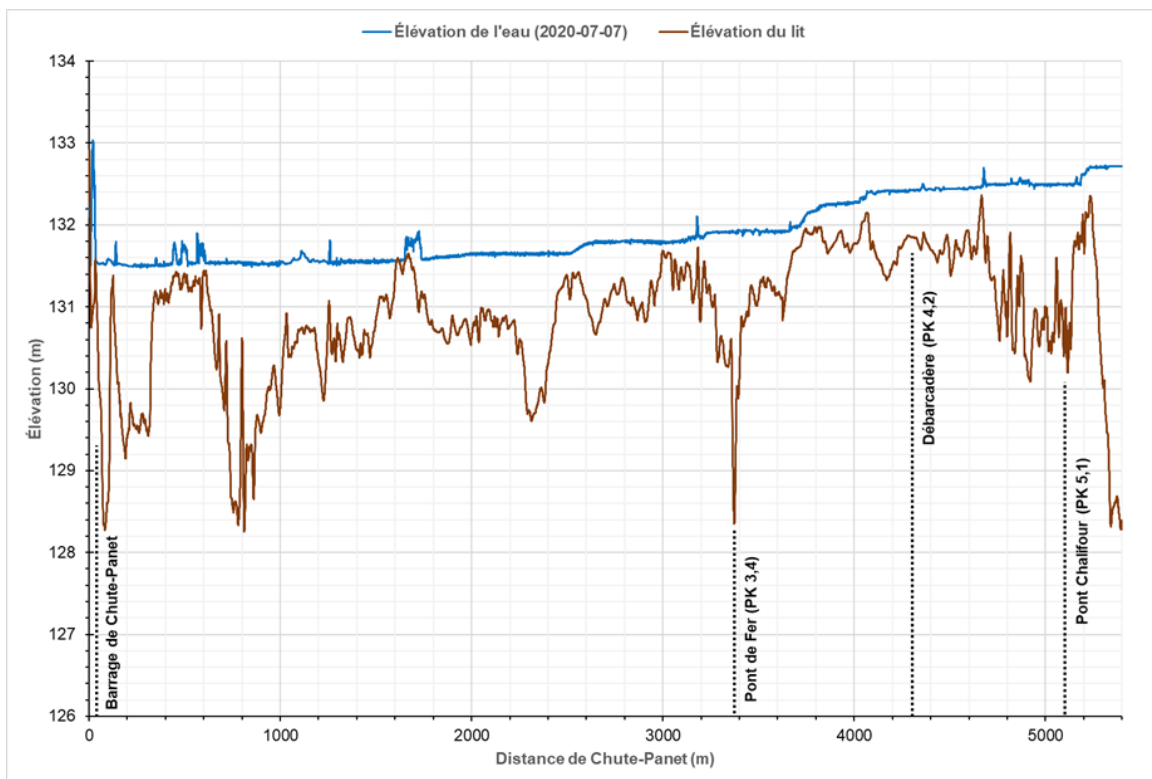
1. Utiliser les résultats du projet de RRI pour réduire le fardeau de la DGB avec le barrage de Saint-Raymond;
2. Les spécialistes se sont prononcés en faveur d'une gestion de la glace/frasil et des sédiments en amont du barrage de Saint-Raymond;
3. Définir de nouvelles fonctions hydrauliques du barrage de Saint-Raymond de manière à capter plus de frasil et créer un BCF en amont (section 3.11);
4. Gérer 150 000 à 200 000 tonnes de glace et de frasil en amont de l'ouvrage par l'utilisation de nouvelles vannes et l'installation d'une estacade flottante (section 3.11);

5. Réaliser un projet pour environ 10 millions de dollars dans un horizon de temps respectant le calendrier de la DGB et l'acceptabilité sociale et environnementale du milieu, soit 2028;
6. Le suivi de l'opération dynamique des vannes du barrage X0001840 montre des résultats encourageants (section 3.11.5);
7. Les résultats du modèle hydraulique HEC-RAS de Beaulieu et Simard-Robitaille (2025) démontrent la faisabilité hydraulique du projet de rétention du frasil dans le réservoir.

## 7.2 Gérer l'eau et la glace en aval

Rappelons d'abord que le barrage de Chute-Panet, construit en 1898, est maintenant désuet et doit être reconstruit dès que possible. Son enlèvement n'est pas envisagé, car l'abaissement des niveaux d'eau qui en résulte augmenterait les risques d'inondation par embâcle (Morse et Turcotte 2014).

La figure 126 présente le profil longitudinal actuel du lit de la rivière Sainte-Anne lors de l'ouverture de la vanne du barrage simulant de la sorte un arasement complet de la structure actuelle. Par ailleurs, la figure 127 présente une orthophotographie du lit de la rivière lors du même événement.



**Figure 126 : Profil longitudinal du lit de la rivière en aval de Saint-Raymond alors que la vanne du barrage de Chute-Panet était ouverte.**



**Figure 127 : Orthophotographie du 7 juillet 2020, lorsque la vanne était ouverte à Chute-Panet**

Ces informations accompagnent les arguments de l'ingénieur C. Beaulieu dans une lettre adressée en 2020 à M. Faber de la Direction de la Sécurité des Barrages (DSB) soulignant entre autres les arguments suivants :

1. La démolition du barrage exposerait définitivement six (6) hauts-fonds de la rivière Sainte-Anne susceptibles de créer des embâcles;
2. Le réservoir permet à la glace de flotter et permet la gestion des aléas résiduels (sections 3.1 et 3.7);
3. L'orthophotographie (figure 127) montre un lit exondé à 60 % sur plusieurs kilomètres détruisant des milieux humides et habitats de la rivière Sainte-Anne;
4. Le lit exondé exposera certains milieux riverains aux contaminants et déchets industriels dans certains environnements sensibles;
5. Les citoyens ne pourraient plus utiliser le réservoir disponible depuis maintenant plus de 100 ans (figure 128).



**Figure 128 : Parcours pagayables en aval du centre-ville de Saint-Raymond certifiés par La route bleue, un organisme écotouristique reconnu par le ministère de l'Éducation.**

Par ailleurs, le ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH) a signé une lettre de promesse avec la Ville de Saint-Raymond le 10 mai 2023, suivi d'un protocole d'entente le 1<sup>er</sup> décembre 2023 pour payer une première phase à la hauteur de 2,3 M\$. Les activités engagées concernaient les éléments suivants :

- L'achat du barrage de Chute-Panet, ratifié le 11 juin 2024;
- Une redéfinition des différentes fonctions hydrauliques des ouvrages susceptibles d'être assujettis à une étude d'impact, soit les barrages de Chute-Panet et le barrage de Saint-Raymond appartenant au MELCCFP;
- Une seconde lettre de promesse de la ministre du MAMH indiquant que 8 M\$ étaient réservés pour reconstruire le barrage de Chute-Panet.

Les études pertinentes destinées à statuer sur les fonctions hydrauliques de cet ouvrage ont été déposées entre la fin de l'année 2024 et fin avril de 2025. Ce rapport en présente la synthèse destinée aux différents ministères et partenaires.

### **7.3 Aménager une centrale hydroélectrique à Chute-Panet**

La possibilité d'aménager une petite centrale hydroélectrique au barrage de Chute-Panet n'est pas nouvelle. Dès 2010, elle a fait l'objet d'une consultation publique, puis d'une étude d'opportunité de la firme Tetra Tech QI (Boulanger et Beaumont 2016) et d'une seconde de faisabilité de Gadian Experts-Conseils (Bordeleau 2021) demandée par le MSP dans le cadre du projet actuel de RRI. L'utilité d'une telle centrale hydroélectrique communautaire se résume de la sorte :

- Permettre de financer les coûts des suivis, de l'entretien et, en partie, de la diffusion des connaissances du projet de RRI;

- Fournir un outil supplémentaire pour moduler les débits et niveaux d'eau afin d'offrir plusieurs bénéfices (glace, sédiments et autres) entre 0 et 110 m<sup>3</sup>/s, en augmentant la capacité d'évacuation de l'eau lors des crues à l'eau libre (section 3.7);
- Aider à évacuer occasionnellement la glace résiduelle indésirable qui aura été sciée ou décohésionnée par affaiblissement préventif du couvert de glace (section 3.1).

Pour ce projet de type communautaire, des ententes sont initiées avec un partenaire autochtone. Mentionnons par ailleurs qu'environ 100 membres de la Nation Wendat habitent à Saint-Raymond et que le secteur fait partie du territoire ancestral des Wendats. Hydro-Québec discute par ailleurs du principe d'une telle entente pour acheter l'électricité produite à la centrale projetée à Chute-Panet.

#### **7.4 Augmenter l'espace de liberté de la rivière**

Augmenter l'espace de liberté d'une rivière à lit mobile comme la Sainte-Anne est souhaitable, dans la mesure de ce qui est possible. En milieu déjà urbanisé comprenant des éléments patrimoniaux, comme à Saint-Raymond, les contraintes sont fortes et les compromis inévitables. Dans le cadre de la poursuite du projet de RRI, le volet planification et modification de l'aménagement du territoire devra occuper une place importante.

## **8.0 RETOUR SUR EXPÉRIENCE**

---

Ce chapitre nommé « retour sur expérience » aborde les principaux éléments d'intérêt portant sur la gestion du projet, les aspects techniques et le transfert de données associées à l'hydrologie, l'hydraulique fluviale, la dynamique des glaces, la sédimentologie et la géomorphologie vers la plateforme INFO-Crue du MELCCFP et certains de leurs départements, comme la DGB.

### **8.1 Gestion du projet**

L'objectif initial du projet de RRI demeure toujours pertinent; il s'agit de protéger plus grand nombre de personnes et de biens, en fonction du DMA, tout en priorisant des interventions qui entravent au minimum les processus naturels.

Le succès des premiers volets du projet s'explique notamment par les aspects suivants :

- une prise en charge du projet par le milieu, soit les résidents affectés, la CAPSA et le Conseil de ville grâce la formation du Comité Rivière;
- l'appui financier, technique et administratif du MSP avec son Cadre pour la prévention de sinistres (CPS);
- l'implication et l'engagement de l'équipe du professeur Brian Morse de l'Université Laval, incluant Benoit Turcotte et Thomas-Simard-Robitaille;
- l'orientation, dès le début, des interventions vers les causes des inondations, comme la production de frasil au lieu des effets comme l'édification de digues plus hautes;
- la préparation d'un plan de mesures d'urgence impliquant la collaboration du MSP et des divers services de la Ville;
- le recours à des mesures parfois sous-utilisées pour l'octroi de mandats de services professionnels afin que la Ville demeure assistée en continu par une même équipe de consultants connaissant bien la rivière, la dynamique de glace et le projet de RRI;
- une ouverture de la part de tous les intervenants destinés à réviser régulièrement les priorités selon les nouvelles observations, suivis, réflexions entre comités techniques et citoyens, etc.;
- une gouvernance ouverte et transparente en impliquant toutes les parties prenantes;
- la diffusion des informations et des connaissances par divers moyens techniques.

## 8.2 Aspects techniques

Les interventions mises en œuvre dans le cadre du projet de RRI sont encore récentes. Certains suivis, comme celui du seuil et de l'estacade du PK 24 fournissent déjà des données probantes, tandis que d'autres restent à obtenir suivant les aléas naturels, notamment au sujet du seuil de mobilisation du couvert de glace au SRG lors des débâcles.

Plusieurs nouvelles connaissances ont été acquises à l'étape de la conception des interventions ainsi que lors des suivis sur le terrain ou via l'observation des images de caméras pointées vers la rivière. Elles ont déjà contribué à amorcer un retour sur l'expérience. En date de 2023, ce sont surtout des visites sur le terrain qui ont permis la diffusion de certaines connaissances et expériences. En effet, les représentants des organismes suivants ont participé à diverses visites sur le terrain :

- ministère de la Sécurité publique (MSP);
- conseil de Ville de Saint-Raymond et Comité Rivière;
- ministère de l'Environnement de la Lutte contre les Changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP, Direction générale et Direction régionale);
- module hydraulique du ministère des Transports du Québec;
- ministère des Pêches et Océans du Canada (MPO);
- ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH);
- Environnement et Changement climatique Canada;
- corporation d'aménagement et de protection de la rivière Sainte-Anne (CAPSA);
- ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP);
- étudiants en génie civil et génie des eaux de l'Université Laval.

Un rapport de réalisation des travaux pour deux interventions a été remis en MELCCFP et au MPO (Bélanger 2022b). Ces mêmes organismes ont également reçu un premier rapport de suivi des aspects techniques et environnementaux du SRG (Bélanger et Simard-Robitaille, 2024).

Un court documentaire du projet de RRI à Saint-Raymond sera dévoilé le 6 mai 2025. Cette vidéo est réalisée par Emmanuel Campeau du Groupe de recherche-action en résilience urbaine (ARIAction) dirigé par la professeure Isabelle Thomas de l'Université de Montréal. Elle sera accessible sur la chaîne YouTube de la Ville de Saint-Raymond.

Malgré ces démarches de diffusion de données et d'informations, le retour sur expérience et la diffusion à grande échelle des enseignements du projet de RRI demeurent très limités. Dans le

futur, le retour sur expérience devrait se faire auprès des associations professionnelles pertinentes, des gestionnaires des municipalités, de la communauté scientifique et autres, que ce soit par des publications sur le Web et ailleurs ainsi que des conférences lors de congrès.

### **8.3 Transfert de données à INFO-Crue du MELCCFP**

En 2023, les données relevant de l'hydrologie et de l'hydraulique fluviale ont été transmises au Gouvernement du Québec, plus précisément au projet INFO-Crue du MELCCFP (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/info-crue/index.htm>). Ce projet vise à créer une cartographie prévisionnelle permettant de visualiser les zones susceptibles d'être inondées dans un délai de 48 heures. De plus, il permet de produire une cartographie réglementaire des zones inondables et des zones de mobilité des cours d'eau, par érosion et sédimentation.

Les données transmises concernent l'hydraulique fluviale et les calibrations des paramètres du modèle, notamment plusieurs relevés de bathymétrie de la rivière Sainte-Anne. Ils considèrent les interventions suivantes :

- l'enlèvement de caissons de 32 caissons de drave;
- la stabilisation de la rive voisine de l'avenue Beaulieu;
- la stabilisation du talus riverain en amont du pont Tessier;
- des données et observations générales sur l'hydrologie et l'hydraulique (courbe de tarage, lignes d'eau lors de plusieurs événements de crue et autres).

L'équipe d'INFO-Crue a également transmis à ENI des mesures lors d'événements de crue. Ces informations permettent de mieux calibrer les modèles hydrauliques.

## 9.0 CONCLUSION

---

Plus d'une dizaine d'années a été consacrée au RRI sur la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond. Ce projet de recherche appliquée a permis de développer de nouvelles méthodes transmissibles à d'autres communautés et sur de nombreuses rivières, surtout celles qui sont affectées par des embâcles.

Les changements climatiques ont mis en évidence les erreurs passées à Saint-Raymond et sur la rivière en examinant d'abord l'histoire avec :

- La consolidation d'une communauté qui repose à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, sur l'industrialisation, se superposant entre autres aux activités traditionnelles des Premières Nations. Le barrage de Chute-Panet est construit en 1898;
- Les activités forestières se développent et on assiste à une transformation progressive, mais constante de la rivière Sainte-Anne entre 1900 et 1950 par l'installation de caissons, le redressement de nombreux tronçons, le remodelage de la confluence avec la rivière Bras du Nord, etc.;
- L'urbanisation du début du 20<sup>e</sup> siècle permet la construction d'infrastructures à proximité des zones de travail. La municipalité est construite tantôt en empiétant sur le lit mineur, tantôt sur le lit majeur de la rivière Sainte-Anne et ses affluents;
- Les infrastructures composées de ponts, rues, digues, barrage-estacade et services publics sont adaptés à l'urbanisation plutôt qu'au milieu naturel.

Tous les aléas documentés dans la présente démarche pointent en direction d'une occupation du territoire à risque. Pour la première fois, population, chercheurs, ingénieurs et gestionnaires ont analysé l'origine des problèmes mis en lumière par trois aléas (CEL, EMB et BCF). Les interventions choisies visaient prioritairement à agir sur la cause de ces problèmes plutôt que sur les effets.

Les 12 interventions réalisées depuis 2016 ont été appuyées par la recherche de l'équipe de l'UL. L'ensemble a été **rentable en termes de DMA évité** à Saint-Raymond. La réduction du risque d'inondation, pour tous les aléas en eau libre et attribuables aux glaces (CEL, EMB et BCF), s'élève maintenant à **plus de 60 %** par rapport à la situation de 2014.

L'estacade flottante combinée au seuil rocheux au PK 24 demeure l'intervention à ce jour l'intervention la plus rentable. Elle a permis d'épargner plus de 350 000 tonnes de glace dans le tronçon voisin du centre-ville lors des hivers 2022-2023 et 2024-2025. Sachant que ce tronçon devient sensiblement vulnérable lorsque la masse de glace dépasse environ 100 000 à

120 000 tonnes, la réduction du risque par ces interventions réalisées à 18 km en amont est significative.

Plus de 18 entrepreneurs et fournisseurs de matériaux ont été impliqués dans les activités de construction, 14 firmes professionnelles en ingénierie, services juridiques, forages, laboratoires et géomatique, 5 firmes en environnement et les quatre (4) institutions suivantes : Université Laval, Université de Montréal, le Conseil de la Nation Wendat et la CAPSA.

Pendant longtemps, l'ingénierie traditionnelle a été dépositaire des problèmes en lien avec le milieu naturel, le développement du territoire et son environnement. La croissance énorme du volume de travail à traiter entraînait par nécessité le développement de normes administratives et techniques.

Le milieu a rejeté plusieurs paradigmes en s'ouvrant à des méthodes plus naturelles et en valorisant les fonctions hydrauliques, biologiques et géomorphologiques pour redonner des espaces de liberté et de la capacité de restauration au milieu naturel. Par ailleurs plusieurs infrastructures artificielles ont été soit enlevées, soit adaptées. Pour finir, le projet de RRI propose de recycler de vieux ouvrages en développant de nouvelles fonctions tout en maintenant un patrimoine cher à la population locale.

Le projet de RRI va bien au-delà des questions d'argent et, bien que surprenant dans sa structure de gestion et de mise en œuvre, demeure beaucoup plus rentable sur tous ces aspects par l'introduction d'une certaine audace et une redéfinition des paradigmes qui encadrent le développement de projets.

Quoi qu'il en soit, la poursuite du projet demeure nécessaire tant pour maintenir la sécurité des occupants du centre-ville de Saint-Raymond que pour une mise en œuvre complète et cohérente du projet dont les enseignements sont utiles bien au-delà des limites municipales.

La véritable valeur au-delà de la protection du public et du rendement technique des aménagements choisis correspond à l'opportunité qui a été offerte de réunir des talents et des opportunités si différentes sous un objectif commun. Les témoignages dans le vidéo reportage de l'Université de Montréal (Campeau, 2025) sont plus édifiants que l'utilité manifeste de rapports étoffés et complexes.

## 10.0 RÉFÉRENCES

---

- BC2 GROUPE CONSEIL INC. 2019. Étude de caractérisation écologique – Projet de retrait des caissons de drave dans la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond (Capitale-Nationale). Rapport technique de BC2 Groupe-Conseil inc. présenté à la Ville de Saint-Raymond, projet 12951902, 52 pages + annexes.
- BEAULIEU, C. et SIMARD-ROBITAILLE, T. 2025. Remplacement et réaménagement du barrage de Saint-Raymond (X0001840) Évaluation des enjeux associés à la réduction des risques d'inondation. Rapport du projet 23-0399. Environnement Nordique. 38 pages + 6 annexes.
- BÉLANGER, S. 2022a. Travaux d'entretien des digues anti-débordements de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond. Rapport présenté par Environnement Nordique inc. à la Ville de Saint-Raymond, Lévis, 22 pages.
- BÉLANGER, S. 2022b. Système de retenue des glaces et dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond. Compte rendu de réalisation des travaux de 2022. Rapport présenté par Environnement Nordique à la Ville de Saint-Raymond, Québec, 31 pages + 1 annexe.
- BÉLANGER, S. 2022c. Dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond : Avis sur la mobilité de la rivière Saint-Anne pour une demande au MELCC. Note technique présentée par Environnement Nordique inc. à la Ville de Saint-Raymond, Québec, 18 pages.
- BÉLANGER, S., C. BEAULIEU 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.
- BÉLANGER, S. et A. DESROSIERS. 2019. Étude écologique des rives de la rivière Sainte-Anne aux sites n<sup>os</sup> 6 et 14 à Saint-Raymond. Rapport présenté par Environnement Nordique à la ville de Saint-Raymond, Québec, 26 pages + 4 annexes.
- BÉLANGER, S. et T. SIMARD-ROBITAILLE. 2024. Système de retenue des glaces et dragage du réservoir du barrage de Saint-Raymond. Suivi des interventions en 2023. Rapport présenté par Environnement Nordique à la Ville de Saint-Raymond, Québec, 35 pages + 1 annexe.
- BORDELEAU, G. et C.A. BORDELEAU. 2020. Rivière Sainte-Anne – Chute-Panet. Étude de faisabilité d'une centrale hydroélectrique. Rapport présenté par Gadian Experts-conseils inc. à la Ville de Saint-Raymond, Saint-Ferréol-les-Neiges, 24 pages + 9 annexes.
- BORDELEAU, G. 2021. Étude de faisabilité de la reconstruction du barrage permettant de diminuer les risques d'inondations à Saint-Raymond. Rapport présenté par Gadian Experts-conseils inc. à la Ville de Saint-Raymond, Saint-Ferréol-les-Neiges, 29 pages + 8 annexes.
- BORDELEAU, G. 2024. Rivière Sainte-Anne - Étude de pré-faisabilité : aménagement d'un réservoir au PK 8 pour diminuer les risques d'inondations à Saint-Raymond. Rapport présenté par Gadian Experts-conseils inc. à la Ville de Saint-Raymond, Saint-Ferréol-les-Neiges, 42 pages + 7 annexes.
- BOUCHARD-BASTIEN, E. 2023. Espaces amphibiens, pouvoir et mémoire : les fluctuations de la rivière Sainte-Anne. Thèse de doctorat, Département d'anthropologie, Faculté des sciences sociales, Université Laval, Québec, 422 pages.

- BOULANGER, P. et G. BEAUMONT. 2016. Étude d'opportunité : Aménagement hydroélectrique à la chute Panet. Rapport 30177TT présenté par Tetra Tech QI inc. à la Ville de Saint-Raymond et la municipalité de Saint-Léonard-de-Portneuf, 27 pages + 7 annexes.
- CAMPEAU, E. (Réalisateur). (2025) *La recette Saint-Raymond pour contrer les inondations* [documentaire]. ARIAction (Adaptation, Résilience, Innovation, Action), sous la direction d'Isabelle Thomas de la Faculté de l'aménagement de l'Université de Montréal, Université de Montréal.
- CAPSA. 2023. Rapport d'installation des repères de crue et des panneaux. Mesures de sensibilisation et d'éducation du public. Entente municipale CPS 18-19-30, Saint-Raymond, Travail présenté par la CAPSA au ministère de Sécurité publique, 82 pages.
- CARRIER, S., B. TURCOTE et B. MORSE. 2017. Évaluation des processus sédimentaires. Caractérisation et quantification du régime sédimentaire de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond. Rapport du Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval présenté au ministère de Sécurité publique, 31 mars, Québec, 31 mars, 11 pages.
- CHARROIS, E. et P. JEAN. 2017. Réfection du tronçon est de la digue anti-débordement nord, rue Monseigneur-Vachon, Saint-Raymond. Rapport d'expertise géotechnique 072-B-00160003-GE-R-0001-00, présenté à la Ville de Saint-Raymond par Englobe, 13 pages + 7 annexes.
- DAOUST, J. 2022. Note technique sur la relocalisation du poisson lors des travaux de dragage en amont du barrage estacade de Saint-Raymond. Note technique 23-0308 présentée par Groupe Synergis à la Ville de Saint-Raymond, Shawinigan, 5 pages.
- DALY, S. 2019. Use of Ice Control Structures to reduce risk. Présentation lors de la 20<sup>e</sup> conférence du CRIPE à Ottawa. 2019.
- Décret concernant la soustraction du projet d'implantation d'un système de retenue des glaces et de dragage de réservoir du barrage de Saint-Raymond, D. 239-2022 (G.O. II). 9 mars 2022.
- FISHERIES AND OCEANS CANADA. 1999. Environmental guidelines for vegetation management on flood protection Works to protect public safety and environment. Department of Fisheries and Oceans Canada et BC Ministry of Environment, Lands and Parks, 19 pages.
- FOREST, T. 2020. Campagne de mesures estivale et hivernale du lit de la rivière Sainte-Anne. Rapport du Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval préparé pour le ministère de Sécurité publique, Québec, 3 pages + annexes.
- FORTIER, C. et J. GAUTHIER. 2009. Étude hydraulique, Rivière Sainte-Anne. Travaux d'immunisation du secteur de l'école Marguerite-D'Youville par la construction d'une digue. Rapport 00411 présenté à la Ville de Saint-Raymond par BPR Infrastructures inc., 16 pages.
- GODIN, D., M. ZAHRA et S. GAGNON. 2020. Étude d'évaluation de la sécurité : Barrage de Saint-Raymond (X0001840). Direction principale de la gestion des infrastructures, ministère de l'Environnement, de lutte contre les Changements climatiques, de la Faune et des Parcs, Québec, 64 pages + 9 annexes.
- GOERGI, E., T. CASTRO-SANTOS et N. BERGERON. 2016. Brook trout passage performance through culverts. Canadian Journal of Fisheries and aquatic sciences, vol. 73, numéro 1, pages 94 à 104

- GOULET, J. 2021. Suivi de la libre circulation du poisson au seuil aménagé au Km 24 2020-2022 ; année 1 en 2020. Note technique no 20-0282 présentée par Groupe Synergis à la Ville de Saint-Raymond, 4 pages, 21 juin 2021.
- HÉBERT, L. 1995. Cartographie des zones inondables : rivière Sainte-Anne et Bras du Nord à Saint-Raymond. MH95-01, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction du milieu hydrique, 10 pages + 4 annexes.
- JEAN, P. et M.C. LÉVESQUE. 2020. Stabilisation de la berge en rive droite de la rivière Sainte-Anne, en amont du pont Tessier à Saint-Raymond, Québec. Rapport d'étude géotechnique 172-P-0020470-0-01-100-GE-R-0001-00 présenté à la ville de Saint-Raymond par Englobe, 33 pages + 6 annexes.
- LAFLEUR, C. et B. MORSE. 2017. Estacade flottante : rapport de construction. Rapport technique présenté à la Ville de Saint-Raymond, Université Laval, 18 pages.
- LAGANIÈRE, M. 2006. Étude de réévaluation de la sécurité de l'estacade de Saint-Raymond, MRC de Portneuf, note complémentaire du Centre d'expertise hydrique du Québec.
- MERCIER, J. F., D. VERRET et S. VITTECOQ. 2005. Étude d'évaluation de la sécurité des barrages du bassin versant de la rivière Sainte-Anne, Barrage de Saint-Raymond n° X0001840, Rapport n° 0335-P préparé par TecSult pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- MÉRIAUX, P., P. ROYET et C. FOLTON. 2004. Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations. Guide pratique à l'usage des propriétaires et gestionnaires. Éditions Cemagref, ministère chargé de l'Environnement, France, 199 pages.
- MORSE, B. 2019. Mesures nécessaires pour que le barrage de Saint-Raymond (numéro X0001840) joue son rôle de réduire les risques liés aux inondations. Rapport du Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval présenté au ministère de Sécurité publique, Québec, 14 p.
- MORSE, B. 2021. Potentiel du barrage de Chute-Panet avec seuils gonflables pour réduire les risques liés aux inondations. Rapport du Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval présenté au ministère de Sécurité publique, Québec, 39 p.
- MORSE, B., FRANCOEUR J., DELCOURT, H., LECLERC M. 2006. Ice control structures using piers, booms and nets. Cold Regions Science and Technology. Pages 59-75.
- MORSE, B., T. SIMARD-ROBITAILLE et B. TURCOTTE. 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 pages.
- MORSE, B. et B. TURCOTTE. 2014. Réduction du risque d'inondations causé par les glaces de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond. Phase 1 : Identification des mesures possibles. Université Laval, 116 pages.

- MORSE, B. et B. TURCOTTE. 2015. Réduction du risque d'inondations causées par les glaces de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond. Phase II : Suivi hivernal et spécification des mesures possibles. Département de génie civil de l'Université Laval. 43 pages.
- MORSE, B. et B. TURCOTTE. 2018. Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques. Rapport présenté à Ouranos. Fonds Vert Québec. 79 pages.
- MORSE, B. et B. TURCOTTE. 2019. Évaluation des processus sédimentaires de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond. Rapport 3. Sommaire des constats en vue des mesures de mitigation proposées. Rapport du Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval présenté au ministère de Sécurité publique, 7 février, Québec, 17 pages.
- PERRAULT, N. C. SIROIS et P. DUFOUR. 2015. Demande Mun/MRC au cadre de prévention de sinistre inondation. Rapport préparé par la CAPSA et présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP), Saint-Raymond, Québec, 19 pages + 4 annexes.
- RICHARD, M. 2019. Portail de surveillance des inondations de la Ville de Saint-Raymond : Document explicatif. Rapport préparé par Martin Richard, Ph.D., consultant pour le Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval, Version 1.0, 41 pages.
- SIMARD, M. et P. JEAN. 2018. Restauration d'un talus glissé, 789 rue Saint-Joseph, Saint-Raymond, Québec. Rapport d'expertise géotechnique no 172-B-0018923-1-GE-R-0001-00, Rapport présenté par Englobe à la Ville de Saint-Raymond, Québec, 19 pages + 8 annexes.
- SIMARD-ROBITAILLE, T., 2021. Mesures d'affaiblissement préventif du couvert de glace. Mémoire de maîtrise en génie des eaux, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, 118 pages.
- SIMARD-ROBITAILLE, T., BEAULIEU, C. 2018. Étude hydraulique dans le cadre des travaux de stabilisation de la rive sud de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond. Rapport présenté par Environnement Nordique à la Ville de Saint-Raymond, Québec, 76 pages.
- SIMARD-ROBITAILLE, T. et C., BEAULIEU. 2025. Système de retenue des glaces au PK 10,5 de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond : Détermination des critères de conception. Rapport EN19-261 présenté par Environnement Nordique inc. à la Ville de Saint-Raymond, Québec, *en préparation*.
- SIMARD-ROBITAILLE, T., B. MORSE et C. BEAULIEU. 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, 7 août 2019, 25 pages.
- SIMARD-ROBITAILLE, T., B. MORSE et B., TURCOTTE. 2015. Preventive Ice Cover Weakening in a Hanging Dam at St. Raymond, QC. 18e Conférence du CRIPE sur l'hydraulique des rivières affectées par la glace. Québec, QC.
- SIMARD-ROBITAILLE, T. et B. MORSE. 2019. Is the Seaking the most expensive way to break ice? 20e Conférence du CRIPE sur l'hydraulique des rivières affectées par la glace. Ottawa, ON.

- 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 pages.
- SIMARD-ROBITAILLE, T., B., TURCOTTE et B. MORSE. 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 pages + 1 annexe.
- TURCOTTE, B. et B. MORSE. 2015. Ice-induced flooding mitigation at Saint-Raymond, Québec, Canada. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment. 18<sup>th</sup> Workshop on Hydraulics of Ice Covered Rivers, Québec City, Canada, August 18-20, 2015.
- TURCOTTE, B. et B. MORSE. 2016. A simple 1-D river ice model to simulate frazil jam formation and mitigation strategies. 23rd IAHR International Symposium on Ice. Ann Arbor, Michigan: International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR).
- TURCOTTE, B. et B. MORSE. 2018. Sous-projet 4 : Techniques visant à inciter la formation d'un couvert de glace à l'amont de la ville. Rapport sur la performance du seuil de neige et de l'estacade flottante au km 24.0 lors de l'hiver 2017-2018, présenté au ministère de la Sécurité publique. 12 septembre 2018. 26 p.
- TURCOTTE, B., B. MORSE, A.C. PARENT et T. SIMARD-ROBITAILLE. 2021. Réduction du risque relié aux inondations à Saint-Raymond – Sous-Projet 2 : Rapport final sur l'étude coût-bénéfice des mesures de mitigation pour réduire le risque d'inondations à Saint-Raymond, présenté au ministère de la Sécurité publique. Université Laval, 30 décembre, Québec, 31 pages.
- TURCOTTE, B., B. MORSE et L. MAROIS. 2017. Réduction du risque relié aux inondations dans la ville de Saint-Raymond. Sous-Projet 2 : Rapport final sur la quantification du risque actuel lié aux inondations à Saint-Raymond, présenté au ministère de la Sécurité publique. Université Laval, 12 décembre, Québec, 59 pages.
- TURCOTTE, B., B. MORSE et M. RICHARD. 2016. Évaluation de l'aléa : suivi des phénomènes de glace sur la rivière Sainte-Anne. Rapport sur la mise en place progressive d'un système de stations hydrométriques en temps réel, présenté au ministère de la Sécurité publique, 13 janvier, 8 pages.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2014. Guidelines for landscape planting and vegetation management at levees, floodwall, embankment dams and appurtenant structures, Department of the Army, Washington DC, United States, Report ETL 1101-2-583, pagination multiple.
- VERGEYNST, J., B. MORSE et B. TURCOTTE. 2015. The nature and structure of a hanging dam in a gravel-bed river. 18<sup>th</sup> CGUS-HS CRIPE Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Québec City, Québec, Canada.

