

PAR COURRIEL

Québec, le 18 décembre 2025

N/Réf. : 2025-14048

OBJET: ***Votre demande en vertu de la Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels (RLRQ, chapitre A-2.1)***

Monsieur,

Nous faisons suite à votre demande d'accès reçue le 8 décembre 2025, visant à obtenir « *les documents suivants* » :

- 1. La confirmation que les embouchures et confluences de cours d'eau, notamment celles associées à des plans d'eau régularisés par un barrage, sont reconnues comme des zones présentant : des courants variables; des conditions de glace instables; un risque accru d'embâcles et de variations rapides du niveau de l'eau.*
- 2. Les références aux documents, guides ou méthodologies du MELCCFP traitant de ces phénomènes (ex. : guides techniques sur les zones inondables, la dynamique glacielle ou la modélisation hydraulique).*
- 3. Toute documentation générale produite ou reconnue par le Ministère permettant de caractériser le comportement de la glace dans ce type de configuration ».*

Concernant **le point 1**, le ministère de la Sécurité publique (MSP) n'a repéré aucun document. En vertu de l'article 1 de la Loi sur l'accès, nous sommes dans l'impossibilité de donner suite à votre demande.

Concernant **le point 2**, le MSP a repéré un document produit par le ministère de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. En vertu de l'article 13 de la Loi sur l'accès, nous vous invitons à le consulter en cliquant sur le lien suivant :

<https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/gestion-rives-littoral-zones-inondables/guide-methodologique-zones-inondables-mobilite-volet-cartographie-reglementaire.pdf>.

...2

Concernant **le point 3**, le MSP n'a pas repéré de documents précisément en lien avec votre demande en vertu de l'article 1 de la Loi sur l'accès. Toutefois, nous vous transmettons deux documents qui pourraient vous intéresser.

Conformément à l'article 51 de la Loi sur l'accès, nous vous informons que vous pouvez, en vertu de la section III du chapitre IV de cette loi (articles 135 et suivants), faire une demande de révision à l'égard de cette décision en vous adressant à la Commission d'accès à l'information dans les 30 jours suivant la date de la présente décision. À cet effet, vous trouverez joint à la présente le document intitulé Avis de recours.

Veuillez agréer, Monsieur, nos salutations distinguées.

La responsable de la Loi sur l'accès aux documents,

Original signé

Nadine Léveillé

p. j. Articles de la loi et avis de recours en révision

Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels

CHAPITRE I
APPLICATION ET INTERPRÉTATION

1. La présente loi s'applique aux documents détenus par un organisme public dans l'exercice de ses fonctions, que leur conservation soit assurée par l'organisme public ou par un tiers.

Elle s'applique quelle que soit la forme de ces documents: écrite, graphique, sonore, visuelle, informatisée ou autre.

1982, c. 30, a. 1.

CHAPITRE II
ACCÈS AUX DOCUMENTS DES ORGANISMES PUBLICS
SECTION I
DROIT D'ACCÈS

13. Le droit d'accès à un document produit par un organisme public ou pour son compte et ayant fait l'objet d'une publication ou d'une diffusion s'exerce par consultation sur place pendant les heures habituelles de travail ou à distance ou par l'obtention d'informations suffisantes pour permettre au requérant de le consulter ou de se le procurer là où il est disponible.

De même, le droit d'accès à un document produit par un organisme public ou pour son compte et devant faire l'objet d'une publication ou d'une diffusion dans un délai n'excédant pas six mois de la demande d'accès, s'exerce par l'un ou plusieurs des moyens suivants:

1° la consultation sur place pendant les heures habituelles de travail ou à distance;

2° l'obtention d'informations suffisantes pour permettre au requérant de le consulter là où il est disponible ou de se le procurer lors de sa publication ou de sa diffusion;

3° le prêt du document, à moins que cela ne compromette sa publication ou sa diffusion.

Le présent article ne restreint pas le droit d'accès à un document diffusé conformément à l'article 16.1.

1982, c. 30, a. 13; 1990, c. 57, a. 5; 2001, c. 32, a. 83; 2006, c. 22, a. 7.

AVIS DE RECOURS EN RÉVISION

Avis de recours à la suite d'une décision rendue par le ministère de la Sécurité publique en vertu de la Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels.

Révision par la Commission d'accès à l'information

a) Pouvoir : l'article 135 de la Loi prévoit qu'une personne dont la demande écrite a été refusée en tout ou en partie par le responsable de l'accès aux documents ou de la protection des renseignements personnels peut demander à la Commission d'accès à l'information de réviser cette décision. La demande de révision doit être faite par écrit; elle peut exposer brièvement les raisons pour lesquelles la décision devrait être révisée (art. 137).

L'adresse de la Commission d'accès à l'information est la suivante :

Québec

Bureau 2.36
525, boul. René-Lévesque Est
Québec (Québec) G1R 5S9
Téléphone : 418 528-7741
Télécopieur : 418 529-3102

Montréal

Bureau 900
2045, rue Stanley
Montréal (Québec) H3A 2V4
Téléphone : 418 528-7741
Télécopieur : 418 529-3102

b) Motifs : les motifs relatifs à la révision peuvent porter sur la décision, sur le délai de traitement de la demande, sur le mode d'accès à un document ou à un renseignement, sur les frais exigibles ou sur l'application de l'article 9 (notes personnelles inscrites sur un document, esquisses, ébauches, brouillons, notes préparatoires ou autres documents de même nature qui ne sont pas considérés comme des documents d'un organisme public).

c) Délais : les demandes de révision doivent être adressées à la Commission d'accès à l'information dans les 30 jours suivant la date de la décision ou de l'expiration du délai accordé au responsable pour répondre à une demande (art. 135).

La Loi prévoit spécifiquement que la Commission d'accès à l'information peut, pour motif raisonnable, relever le requérant du défaut de respecter le délai de 30 jours (art. 135).

L'effet des tributaires sur la possibilité d'inondation
par embâcles sur les zones urbaines proches des
confluences – GQ524632 / Comportement des
rivières en hiver et mesures de gestion des risques
reliés aux inondations - FLUTEIS - GQ183121

Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2025

Contrat CPS 18-19-26

Rapport final

1^{er} mars 2025

Travail réalisé pour :

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

Travail réalisé par :

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

Ce projet a reçu une contribution financière de 2 450 000 \$ provenant du Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2025 du gouvernement du Québec [CPS 18-19-26].

Réalisation des travaux

Tadros Ghobrial – Professeur et responsable du projet FLUTEIS, Université Laval ;

Brian Morse – Professeur, Université Laval ;

Laurence Charbonneau – Étudiante à la maîtrise, Université Laval.

Gabriel Pelchat – Professionnel de recherche, Université Laval ;

Amandine Pierre – Professionnelle de recherche, Université Laval ;

Catherine Blouin – Auxiliaire de recherche, Université Laval ;

Éric Boucher – Technicien en travaux de recherche, Université Laval ;

Collaborateurs

Ministère de la Sécurité publique

Nous souhaitons remercier Dr. Mark Loewen et Ana Radmanovic (University of Alberta) pour l'élaboration de figures servant à illustrer les données acquises sur le terrain.

Ce projet a bénéficié de l'expertise et des orientations de Pascal Marceau et de son équipe de la direction générale de la planification et de la prévention, du sous-ministériat de la sécurité civile et de la sécurité incendie, du ministère de la Sécurité publique.

Valéry Hamel - Rédaction Graphite

Révision, orientations, réécriture, traduction, correction et mise en page.

Pour citation

Ghobrial, T. (2025). Comportement des rivières en hiver et mesures de gestion des risques reliés aux inondations. Rapport final du projet « L'effet des tributaires sur la possibilité d'inondation par embâcles sur les zones urbaines proches des confluences ». 1^{er} mars 2025, présenté au ministère de la Sécurité publique dans le cadre du contrat CPS-18-19-26 (FLUTEIS). Université Laval, Québec.

Résumé

Le projet FLUTEIS vise à mieux comprendre le comportement des rivières en période hivernale sur le territoire québécois, en se concentrant sur l'étude de la dynamique des glaces ainsi que sur l'évaluation des risques d'inondations associés et leur mitigation. Ce document présente l'avancement des travaux du sous-projet « L'effet des tributaires sur la possibilité d'inondation par embâcles sur les zones urbaines proches des confluences » au 1^{er} mars 2025.

Ce rapport présente les travaux de terrain effectués et les observations collectées depuis l'hiver 2019-2020 jusqu'à l'hiver 2023-2024 pour les confluences des rivières Chaudière et du Loup, Chaudière et Famine, Chaudière et Bras Saint-Victor ainsi que Sainte-Anne et Bras du Nord.

CPS 18-19-26

L'effet des tributaires sur la possibilité d'inondation par embâcles
sur les zones urbaines proches des confluences - Rapport final

Table des matières

Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
1 Introduction et objectifs	1
2 Plan d'étude	3
3 Bassins versants à l'étude	4
3.1 Bassin versant de la rivière Chaudière	4
3.2 Bassin versant de la rivière Sainte-Anne	7
4 Méthodologie	10
4.1 Instruments utilisés	10
4.1.1 Hors de l'eau	10
4.1.2 Stations submersibles	11
4.2 Bassin versant de la rivière Chaudière	14
4.2.1 Débâcle 2020	14
4.2.1.1 Instrumentation des sites étudiés	14
4.2.1.2 Données hydrométriques et météorologiques	22
4.2.2 Débâcle 2021	23
4.2.2.1 Instrumentation des sites étudiés	23
4.2.2.2 Données hydrométriques et météorologiques	31
4.2.3 Débâcle 2022	32
4.2.3.1 Instrumentation des sites étudiés	32
4.2.3.2 Données hydrométriques et météorologiques	39
4.2.4 Débâcle 2023	40
4.2.4.1 Instrumentation des sites étudiés	40
4.2.4.2 Données hydrométriques et météorologiques	47
4.2.5 Débâcle 2024	47
4.2.5.1 Instrumentation des sites étudiés	47
4.2.5.2 Données hydrométriques et météorologiques	55
4.3 Bassin versant de la rivière Sainte-Anne	55
4.3.1 Débâcle 2021	55
4.3.1.1 Instrumentation des sites étudiés	55
4.3.1.2 Données hydrométriques et météorologiques	58
4.3.2 Débâcle 2022	58
4.3.2.1 Instrumentation des sites étudiés	58

4.3.2.2	Données hydrométriques et météorologiques	60
4.3.3	Débâcle 2023.....	61
4.3.3.1	Instrumentation des sites étudiés	61
4.3.3.2	Données hydrométriques et météorologiques	63
4.3.4	Débâcle 2024.....	63
4.3.4.1	Instrumentation des sites étudiés	63
4.3.4.2	Données hydrométriques et météorologiques	66
5	Résultats.....	67
5.1	Conditions météorologiques.....	67
5.1.1	Bassin versant de la rivière Chaudière	67
5.1.1.1	Débâcle 2020	67
5.1.1.2	Débâcle 2021	68
5.1.1.3	Débâcle 2022	69
5.1.1.4	Débâcle 2023	70
5.1.1.5	Débâcle 2024	71
5.1.1.6	Résumé.....	72
5.1.2	Bassin versant de la rivière Sainte-Anne.....	73
5.1.2.1	Débâcle 2021	73
5.1.2.2	Débâcle 2022	74
5.1.2.3	Débâcle 2023	75
5.1.2.4	Débâcle 2024	75
5.1.2.5	Résumé.....	76
5.2	Confluences.....	76
5.2.1	Rivière Chaudière	77
5.2.1.1	Confluence du Loup	77
5.2.1.2	Confluence Famine	117
5.2.1.3	Confluence Bras Saint-Victor	157
5.2.2	Rivière Sainte-Anne.....	200
5.2.2.1	Confluence Bras-du-Nord	200
6	Conclusions	236
7	Perspectives futures et recommandations.....	237
	Références.....	240

Liste des tableaux

Tableau 1. Taille du bassin versant de la CH et de ses sous-bassins étudiés.	5
Tableau 2. Pentés de la CH et de ses tributaires étudiés, et les ratios associés.....	5
Tableau 3. Tailles des bassins versants, pentés de la STA et de la BDN et ratios associés.	8
Tableau 4. Modèles des instruments installés hors de l'eau près des sites, données captées et année d'utilisation.	10
Tableau 5. Modèles des instruments installés sous l'eau, données correspondantes et périodes d'utilisation.....	11
Tableau 6. Sites étudiés lors de la débâcle 2020 dans le bassin versant de la rivière CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.....	17
Tableau 7. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.....	26
Tableau 8. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.....	35
Tableau 9. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 dans le bassin versant de la rivière CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.....	43
Tableau 10. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 dans le bassin versant de la rivière CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments...	51
Tableau 11. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière STA: localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.....	57
Tableau 12. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière STA: localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.....	60
Tableau 13. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 dans le bassin versant de la rivière STA: localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.....	62
Tableau 14. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 dans le bassin versant de la rivière STA: localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.....	65
Tableau 15. Périodes de débâcle des bassins versants des rivières CH et STA pour chaque année de la période d'étude	67
Tableau 16. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2020 à la confluence DL. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	78
Tableau 17. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021 à la confluence DL. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	86
Tableau 18. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2022 à la confluence DL. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	93
Tableau 19. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023 à la confluence DL. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	100
Tableau 20. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024 à la confluence DL. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	107

Tableau 21. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles hivernaux observés à la confluence DL pour toutes les saisons étudiées.	115
Tableau 22. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles printaniers observés à la confluence DL pour toutes les saisons étudiées.	116
Tableau 23. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2020 à la confluence FA. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	119
Tableau 24. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021 à la confluence FA. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	130
Tableau 25. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2022 à la confluence FA. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	136
Tableau 26. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023 à la confluence FA. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	143
Tableau 27. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024 à la confluence FA. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	149
Tableau 28. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles printaniers observés à la confluence FA pour toutes les saisons étudiées.	156
Tableau 29. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2020 à la confluence BSV. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	158
Tableau 30. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021 à la confluence BSV. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	169
Tableau 31. Images pertinentes de la débâcle 2022 à la confluence BSV. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	183
Tableau 32. Images pertinentes de la débâcle 2023 à la confluence BSV. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	187
Tableau 33. Images pertinentes de la débâcle 2024 à la confluence BSV. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	193
Tableau 34. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles printaniers observés à la confluence BSV pour toutes les saisons étudiées.	199
Tableau 35. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021 à la confluence BDN. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	200
Tableau 36. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2022 à la confluence BDN. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	211
Tableau 37. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023 à la confluence BDN. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	224
Tableau 38. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024 à la confluence BDN. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	230
Tableau 39. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles printaniers observés à la confluence BDN pour toutes les saisons étudiées.	234

Liste des figures

Figure 1. Bassin versant de la rivière CH et de ses principaux tributaires avec le kilométrage à partir du barrage des Chutes-de-la-Chaudière (adapté de COBARIC, 2013).	4
Figure 2. Profils d'élévation des rivières CH, DL, FA et BSV avec pentes associées à chaque section. Les lignes pointillées séparent la CH en basse, moyenne et haute CH. 5	
Figure 3. Bassins versants de la rivière STA et de ses tributaires avec le kilométrage à partir du barrage Chute-Panet. Le bassin versant de la rivière BDN est tracé en rouge (adapté de CAPSA, 2014).	7
Figure 4. Profils d'élévation des rivières STA et BDN avec pentes associées à chaque section. Les lignes pointillées séparent la BDN en trois sections selon les coupures de pente, soit aux km 15,2 et 20,5 du tributaire (adapté de Simard-Robitaille, 2021).	8
Figure 5. Caméras installées sur des arbres et capteurs de température de l'air aux sites 2020-2021 : (a) BSV-10 et (b) DL-04. Caméras installées sur des ponts aux sites 2020-2021 : (c) BSV-1; (d) FA-02; (e) et (f) BDN-0. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	11
Figure 6. Station submersible : (a) anneau de maintien des instruments et pieux de fixation; (b) station pour l'hiver 2019-2020 montrant les instruments et bouchons de fermeture; (c) station pour les hivers 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024 (sans l'accéléromètre) montrant les instruments et la chaîne de fixation et (d) le boulon et écrou de fermeture et de fixation.	13
Figure 7. Sites étudiés lors de la débâcle 2020 dans le bassin versant de la CH. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement et le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte.	15
Figure 8. Sites étudiés lors de la débâcle 2020 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	16
Figure 9. Sites étudiés lors de la débâcle 2020 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	16
Figure 10. Sites étudiés lors de la débâcle 2020 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	17
Figure 11. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL; (b) CH et FA; (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2020.	18
Figure 12. Traceurs GPS placés avant la débâcle 2020 dans le couvert de glace pour la confluence CH (a) DL; (b) FA et (c) BSV (sauf 83220, Tracki11 et 15921). Le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte et les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement.	20
Figure 13. Installation des instruments dans le bassin versant de la CH pour l'hiver 2019-2020 : (a) station submersible au site DL-12; et (b) station submersible au site BSV-2. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	21

Figure 14. Récupération des instruments dans le bassin versant de la CH au printemps 2020 : (a) station submersible au site CH-77; et (b) station submersible au site DL-12. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	21
Figure 15. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 dans le bassin versant de la CH. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement et le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte.	23
Figure 16. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	24
Figure 17. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	24
Figure 18. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	25
Figure 19. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL; (b) CH et FA; (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2021.	27
Figure 20. Traceurs GPS placés avant la débâcle 2021 dans le couvert de glace pour la confluence CH (a) DL; (b) FA et (c) BSV (sauf 9 et 10). Le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte et les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement.	29
Figure 21. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour la débâcle 2021 : (a) caméra au site CH-106; et (b) station submersible au site FA-02. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	30
Figure 22. Travail de terrain dans le bassin versant de la rivière CH durant l'hiver 2020-2021 : (a) changement des piles des caméras aux sites CH-76 et (b) BSV-1. Pose de traceurs GPS au km 111 dans la CH : (c) installation et (d) bouteille contenant le traceur GPS. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	30
Figure 23. Récupération des instruments dans le bassin versant de la rivière CH au printemps 2021 : (a) station submersible au site CH-94 et (b) au site BSV-1. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	31
Figure 24. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 dans le bassin versant de la CH. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement et le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte.	32
Figure 25. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	33
Figure 26. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	33
Figure 27. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	34

Figure 28. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL; (b) CH et FA; (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2022.....	36
Figure 29. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour la débâcle 2022 : (a) station submersible au site FA-0 et (b) caméra au site DL-04. La flèche verte indique le sens de l'écoulement.....	38
Figure 30. Récupération des instruments dans le bassin versant de la rivière CH au printemps 2022 : (a) station submersible au site BSV-2 et (b) au site CH-106. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	38
Figure 31. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 dans le bassin versant de la CH. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement et le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte.	40
Figure 32. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches vertes et grises indiquent le sens de l'écoulement.	41
Figure 33. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches indiquent le sens de l'écoulement.	41
Figure 34. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.....	42
Figure 35. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL, (b) CH et FA, (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2023.....	44
Figure 36. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour la débâcle 2023 : (a) caméra au site CH-106 et (b) caméra au site CH-106.....	46
Figure 37. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour l'hiver 2022-2023 : (a) emplacement de la station submersible au site CH-106 et (b) station submersible au site FA-0. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	46
Figure 38. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 dans le bassin versant de la CH. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement et le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte.	48
Figure 39. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.....	49
Figure 40. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.....	49
Figure 41. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.....	50
Figure 42. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL; (b) CH et FA; (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2024.....	52
Figure 43. Installation d'une caméra dans le bassin versant de la rivière CH pour étudier la débâcle 2024.....	54

Figure 44. Mesure de l'emplacement optimal d'une plateforme submersible avant son installation dans le bassin versant de la rivière CH pour la saison hivernale 2023-2024. La flèche verte indique le sens de l'écoulement.	54
Figure 45. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière STA pour la confluence BDN : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement.	56
Figure 46. Profils d'élévation des rivières STA et BDN (adapté du travail de Thomas Simard-Robitaille, 2021) avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2021.	56
Figure 47. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière STA pour l'hiver 2020-2021 : (a) caméra au site STA-20; (b) station submersible dans la rivière Talayarde (données inutilisables); et (c) entretien de la station permanente BDN km 7,7 de la Ville de Saint-Raymond. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.	57
Figure 48. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière STA pour la confluence BDN : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement.	59
Figure 49. Profils d'élévation des rivières STA et BDN avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2022 (adapté de Simard-Robitaille, 2021).	59
Figure 50. Installation de deux stations hydrométriques permanentes dans la rivière Sainte-Anne: (a) caméra au pont du parc riverain (BDN-0); (b) station hydrométrique au pont du parc riverain (BDN-0) et (c) station hydrométrique au barrage Chute-Panet (STA-0).....	60
Figure 51. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 dans le bassin versant de la rivière STA pour la confluence BDN : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	62
Figure 52. Profils d'élévation des rivières STA et BDN (adapté du travail de Thomas Simard-Robitaille, 2021) avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2023.	62
Figure 53. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière STA pour l'hiver 2022-2023 : (a) emplacement de la caméra (derrière l'arbre) au site BDN-0; (b) emplacement de la station submersible au site BDN-0. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.....	63
Figure 54. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 dans le bassin versant de la rivière STA pour la confluence BDN : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.	64
Figure 55. Profils d'élévation des rivières STA et BDN (adapté du travail de Thomas Simard-Robitaille, 2021) avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2024.	64
Figure 56. Récupération des instruments dans le bassin versant de la rivière STA pour l'hiver 2023-2024 : Plateforme submersible en aval de l'estacade à STA-6. La flèche verte indique le sens de l'écoulement.	65
Figure 57. Conditions météorologiques pour la débâcle 2020 dans le bassin versant de la rivière CH (données du 25 février au 7 avril 2020) : (a) vitesse du vent; (b) température de l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (2 mars au 6 avril).	68
Figure 58. Conditions météorologiques pour la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière CH (données du 5 mars au 2 avril 2021) : (a) vitesse du vent; (b) température de	

l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (11 mars au 1er avril). 69

Figure 59. Conditions météorologiques pour la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière CH (données du 12 mars au 12 avril 2022) : (a) vitesse du vent; (b) température de l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (18 mars au 11 avril). 70

Figure 60. Conditions météorologiques pour la débâcle 2023 dans la rivière CH (données du 1^{er} mars au 19 avril 2023) : (a) vitesse du vent; (b) température de l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5°C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (11 mars au 19 avril). 71

Figure 61 : Conditions météorologiques pour la débâcle 2024 dans la rivière CH (données du 1^{er} mars au 30 avril 2024) : (a) vitesse du vent; (b) température de l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5°C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (5 mars au 26 avril). 72

Figure 62. Conditions météorologiques pour la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière STA (données du 15 mars au 10 avril 2021) : (a) température de l'air; (b) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (c) précipitations et (d) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (21 mars au 9 avril). 73

Figure 63. Conditions météorologiques pour la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière STA (données du 14 mars au 18 avril 2022) : (a) température de l'air; (b) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (c) précipitations et (d) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (20 mars au 18 avril). 74

Figure 64. Conditions météorologiques pour la débâcle 2023 dans la rivière STA (données du 1^{er} mars au 26 avril 2023) : (a) température de l'air; (b) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (c) précipitations et (d) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (15 mars au 18 avril). 75

Figure 65. Conditions météorologiques pour la débâcle 2024 dans la rivière STA (données du 1^{er} mars au 30 avril 2024) : (a) température de l'air; (b) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (c) précipitations et (d) neige au sol. 76

Figure 66. Données de traceurs GPS pour la confluence DL durant la débâcle 2020....84

Figure 67. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2020 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 227,2 m à CH-120, 222,9 m à DL-12, 173 m à DL-08 et 167,1 m à CH-102. 84

Figure 68. Données de traceurs GPS pour la confluence DL durant la débâcle 2021....90

Figure 69. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2021 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 172,7 m à CH-106, 172,9 m à DL-04 et 172,8 m à DL-0. 91

Figure 70. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2022 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 173,2 m à CH-106, 173,3 m à DL-04, 173,2 m à DL-01 et 171 m à CH-102. 98

Figure 71. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2023 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 172,7 m à CH-106, 172,35 m à DL-04, 172,77 m à DL-01 et 172,55 m à CH-102.....	103
Figure 72. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2024 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau; (d) niveau d'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 172,70 m à DL-04 et 172,82 m à DL-01.	109
Figure 73. Embâcles hivernaux observés directement à la confluence DL pour toutes les saisons étudiées.	114
Figure 74. Embâcles printaniers observés directement à la confluence DL pour toutes les saisons étudiées.	115
Figure 75. Données de traceurs GPS pour la confluence FA durant la débâcle 2020..	125
Figure 76. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2020 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 161,0 m à CH-98 et 156,2 m à CH-95.	126
Figure 77. Données de traceurs GPS pour la confluence FA durant la débâcle 2021..	133
Figure 78. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2021 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 158,7 m à CH-97, 158,7 m à FA-02, 207,5 m à FA-6, 158,2 m à FA-0 et 157,4 m à CH-96.....	134
Figure 79. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2022 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 158,5 m à CH-97, 207,7 m à FA-6, 159,2 m à FA-02, 158,5 m à FA-0 et 157,6 m à CH-96.....	141
Figure 80. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2023 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 207,87 m à FA-6, 158,92 m à FA-02, 158,49 m à FA-0, 157,74 m à CH-96, 158,94 m à CH-97 et 156,75 m à CH-94.	147
Figure 81. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2024 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau; (d) niveau d'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 207,79 m à FA-6, 159,24 m à FA-02, 158,56 m à FA-0, 157,41 m à CH-96, 159,02 m à CH-97 et 156,48 m à CH-94.	154
Figure 82. Embâcles printaniers observés directement à la confluence FA pour toutes les saisons étudiées.	156
Figure 83. Données de traceurs GPS pour la confluence BSV durant la débâcle 2020.	167
Figure 84. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2020 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c)	

température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143 m à CH-77, 148,7 m à BSV-2, 201,8 m à BSV-10 et 140 m à CH-67.	168
Figure 85. Données de traceurs GPS pour la confluence BSV durant la débâcle 2021.	180
Figure 86. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2021 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143,5 m à CH-76, 201,6 m à BSV-10, 145 m à BSV-1 et 141,2 m à CH-74.	180
Figure 87. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2022 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143,1 m à CH-76, 201,7 m à BSV-10, 148,6 m à BSV-2, 145,4 m à BSV-1 et 142,0 m à CH-74.	185
Figure 88. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2023 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143,33 m à CH-76, 201,87 m à BSV-10, 145,18 m à BSV-2, 142,52 m à BSV-0 et 142,25 m à CH-74.	192
Figure 89. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2024 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau, (d) niveau d'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143,37 m à CH-76, 142,73 m à BSV-0 et 142,53 m à CH-74.	197
Figure 90. Embâcles printaniers observés directement à la confluence BSV pour toutes les saisons étudiées.	198
Figure 91. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BDN durant la débâcle 2021 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 132,1 m à BDN-0, 132,4 m à BDN-1 et 199,0 m à STA-20.	209
Figure 92. Données de caméras et stations la confluence BDN durant la débâcle 2022 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 138,0 m à BDN-5 et 132,0 m à BDN-0.	222
Figure 93. Données de caméras et stations à la confluence BDN durant la débâcle 2023 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau; (d) élévation de l'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 131,31 m à BDN-1, 132,63 m à BDN-0, 130,72 m à STA-2, 130,9 m à STA-4, 116,6 m à STA10-AM, 116, 5 m à STA10-AV, 107,9 m à STA6-AM et 105,1 m à STA6-AV.	228
Figure 94. Données de caméras et stations la confluence BDN durant la débâcle 2024 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau; (d) élévation de l'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 132,9 m à BDN-1, 132,3 m à BDN-0, 132,3 m à STA-2, 132,4 m à STA-4, 145 m à STA10-AM, 144,8 m à STA10-AV, 136,7 m à STA6-AM et 133,5 m à STA6-AV.	232
Figure 95. Embâcles printaniers observés directement à la confluence BDN pour toutes les saisons étudiées. Les flèches bleues indiquent le sens de l'écoulement.	234

1 Introduction et objectifs

Le projet FLUTEIS s'inscrit dans une démarche de processus de gestion des risques liés aux inondations sur l'ensemble du territoire québécois et, plus spécifiquement, en conditions hivernales quand les glaces modifient le comportement des rivières. Dans un contexte de développement d'alerte précoce et de plans d'urgence, la connaissance des comportements des tributaires pendant la débâcle peut mener à des actions qui réduisent le risque d'inondation.

C'est sous ce thème que l'Université Laval (UL) a lancé en septembre 2020 un projet de recherche sur l'effet des tributaires sur le risque d'inondation par embâcles dans les zones urbaines proches des confluences. Les tributaires peuvent jouer un rôle important dans l'hydraulique hivernale des rivières, en particulier pendant la saison de la débâcle. Généralement, la débâcle sur les petits ruisseaux ou tributaires commence avant celle sur le cours d'eau principal situé en aval en raison de leur réaction plus rapide au ruissellement et de leur pente souvent plus importante. Selon la magnitude et la vitesse de la débâcle, le risque d'inondation peut être élevé à la confluence et en aval de celle-ci.

Cependant, les connaissances sur le comportement des tributaires pendant la débâcle et leurs effets sur la formation d'embâcles à la confluence sont encore limités. Une revue de la littérature révèle que les embâcles de glace, responsables d'importants dommages matériels et environnementaux (Belore et al., 1990 ; Rokaya et al., 2018), se forment fréquemment aux confluences de rivières, aux coudes et aux rétrécissements du lit (Beltaos, 2008). Toutefois, les connaissances actuelles demeurent limitées quant aux processus spécifiques de débâcle et de formation d'embâcles aux confluences. Les études existantes ont surtout été menées en laboratoire (Ettema & Muste, 2001 ; Ettema et al., 1997), et peu d'observations sur le terrain permettent de caractériser l'influence des conditions hydrométéorologiques et morphologiques sur ces phénomènes (Turcotte & Morse, 2017). Ainsi, malgré quelques avancées en modélisation numérique (Blackburn et al., 2015 ; Brayall & Hicks, 2012), il subsiste de nombreuses lacunes dans la compréhension du rôle des tributaires sur la dynamique de la débâcle et la formation d'embâcles à la confluence.

Cette étude vise à caractériser la dynamique des glaces aux confluences durant la débâcle, en mettant en lumière les interactions entre les glaces des tributaires et celles des rivières en aval. Les résultats de cette étude pourraient contribuer à l'élaboration de mesures de mitigation visant à réduire les risques d'inondation liés aux tributaires dans de futures études.

Pour atteindre cet objectif, des études ont été menées sur les tributaires principaux de deux rivières du Québec : la rivière Chaudière au sud du fleuve Saint-Laurent en Beauce et la rivière Sainte-Anne au nord du fleuve dans la MRC de Portneuf.

Le présent rapport décrit les confluences étudiées et présente le travail de terrain effectué pour les débâcles de 2020 à 2024 en plus d'analyser les données de la débâcle pour ces saisons.

2 Plan d'étude

Les tâches suivantes présentent le plan général de l'étude :

1. Développer un plan d'instrumentation sur les tributaires importants de la rivière Chaudière pour les débâcles de 2020 à 2024, soit les rivières du Loup, Famine et Bras Saint-Victor ;
2. Développer un plan d'instrumentation sur un tributaire important de la rivière Sainte-Anne pour les débâcles de 2021 à 2024, soit la rivière Bras-du-Nord ;
3. Déployer les instruments de mesure pour chaque saison ;
4. Récupérer les instruments après chaque fin de saison (fin de la période glacielle) ;
5. Analyser les données de chacune des saisons ;
6. Rédiger des rapports et des publications sur l'effet des tributaires de la rivière Chaudière pour les débâcles de 2020 à 2024 et de la rivière Sainte-Anne pour les débâcles de 2021 à 2024.

3 Bassins versants à l'étude

3.1 Bassin versant de la rivière Chaudière

Le premier bassin versant à l'étude est la rivière Chaudière (CH), située dans la région historique de la Beauce dans la région administrative Chaudière-Appalaches. La figure 1 présente le bassin versant de la CH incluant les sous-bassins de ses principaux tributaires qui sont, du sud au nord, les rivières du Loup (DL), Famine (FA), Bras Saint-Victor (BSV) et Beaurivage (BE). Les chiffres indiqués représentent le kilométrage à partir du barrage des Chutes-de-la-Chaudière choisi comme km 0 pour la CH puisqu'il constitue une délimitation nette. La structure hydraulique est située à 4,3 km de l'embouchure de la CH, soit l'endroit où la rivière rejoint le fleuve Saint-Laurent. Le tableau 1 indique la superficie de chaque bassin à l'étude ainsi que sa proportion par rapport au bassin versant se trouvant à l'amont de sa confluence. Les profils d'élévation de la rivière principale et de ses tributaires sont montrés à la figure 2 alors que le tableau 2 présente les pentes des tributaires et de la CH ainsi que leurs ratios.

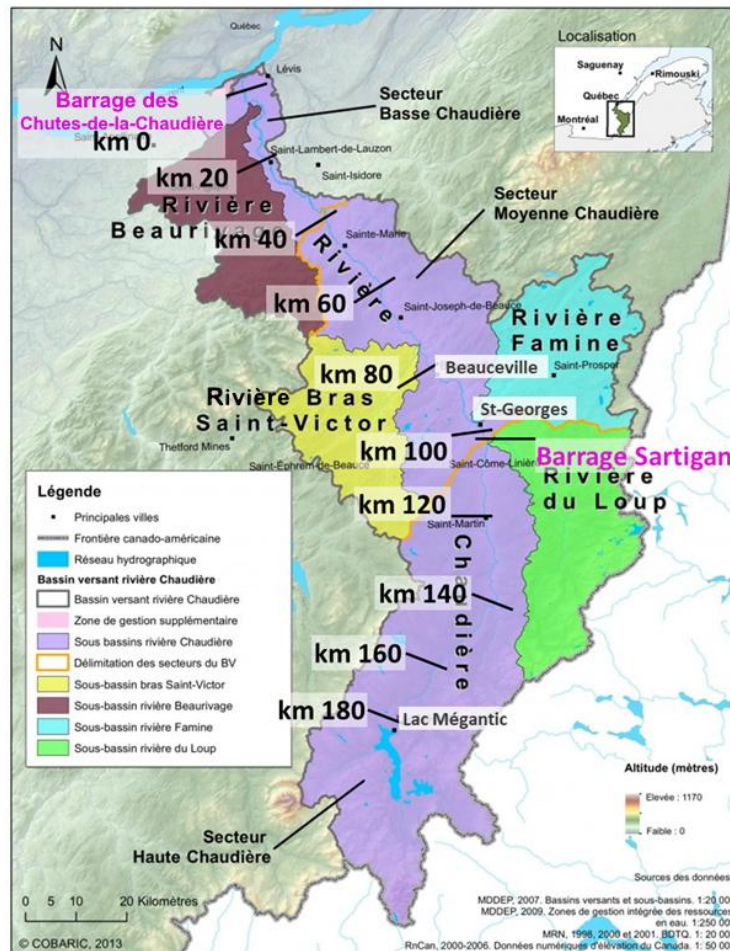


Figure 1. Bassin versant de la rivière CH et de ses principaux tributaires avec le kilométrage à partir du barrage des Chutes-de-la-Chaudière (adapté de COBARIC, 2013).

Tableau 1. Taille du bassin versant de la CH et de ses sous-bassins étudiés.

Bassin versant	a) Superficie du bassin versant (km ²)	b) Superficie du bassin versant en amont de l'embouchure (km ²)	Ratio a/b
CH	6694	6694	1
DL	893	3066	0,29
FA	714	3820	0,19
BSV	735	5059	0,15

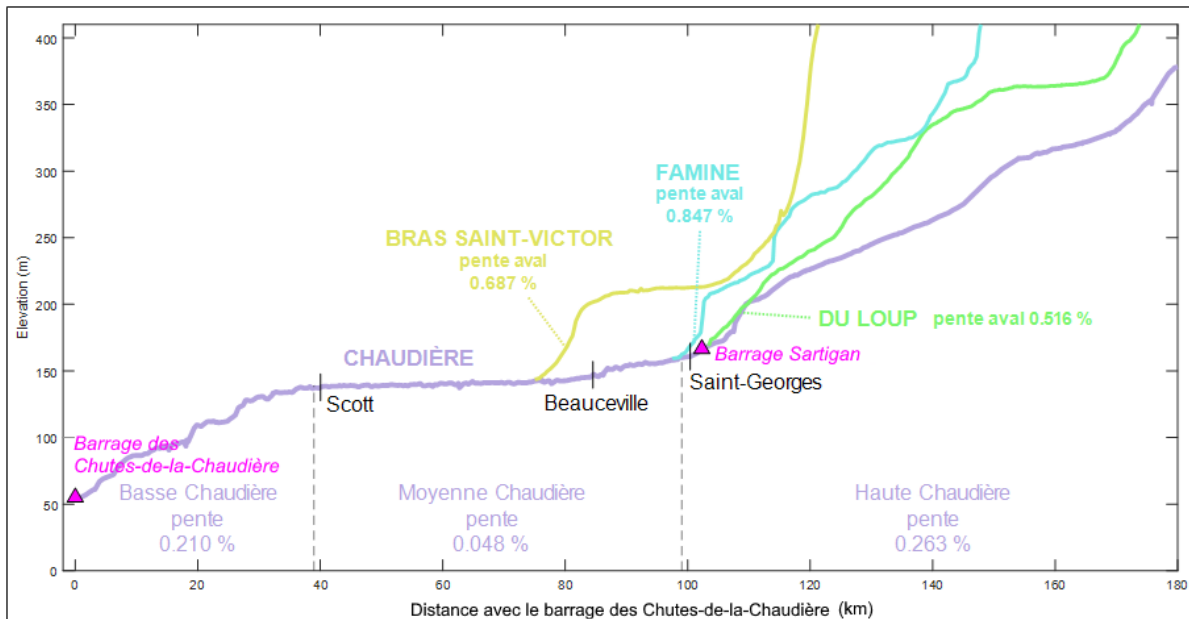


Figure 2. Profils d'élévation des rivières CH, DL, FA et BSV avec pentes associées à chaque section. Les lignes pointillées séparent la CH en basse, moyenne et haute CH.

Tableau 2. Pentés de la CH et de ses tributaires étudiés, et les ratios associés.

Rivière	(a) Pente du tributaire à l'aval* (%)	(b) Pente de la CH dans la section concernée** (%)	Ratio a/b
DL	0,516	0,263	2
FA	0,847	0,048	18
BSV	0,687	0,048	14

*La partie aval du tributaire est considérée entre l'embouchure et une coupure de pente importante. Ceci correspond au km 9,7 pour DL, 6,1 pour FA et 7,4 pour BSV.

**La section concernée est celle où le tributaire rejoint la CH, soit la haute CH pour DL et la moyenne CH pour FA et BSV.

La rivière CH a été choisie pour cette étude en raison de la présence de plusieurs confluences avec de grands tributaires ainsi que de son historique de fréquentes inondations par embâcles pendant la saison de la débâcle. La rivière prend sa source dans le lac Mégantic, en Estrie (sud du Québec) et s'écoule vers le nord sur 185 km pour se déverser sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent à la hauteur de Saint-Romuald à Lévis, en Chaudière-Appalaches. La superficie du bassin versant de la CH est de 6 694 km². La rivière BE se joint à la CH seulement 7 km en amont de son embouchure sur un tronçon abrupt de la rivière principale et ne constitue donc pas une menace d'inondation, ce qui explique que la confluence BE-CH ne soit pas incluse dans ce projet.

La rivière DL rejoint la CH au km 103,4 et possède un bassin versant d'une superficie de 893 km², ce qui représente 29 % du bassin versant en amont de l'embouchure de la CH. La rivière FA possède un bassin versant de 714 km² et rejoint la CH au km 97,5 alors que la BSV, d'un bassin versant de 735 km², atteint la CH aux km 75,3 ; cela représente respectivement environ 19 % et 15 % du bassin versant en amont de chaque confluence. Ensemble, ces trois tributaires constituent 35 % de la superficie du bassin versant de la rivière CH.

La rivière CH est principalement divisée en trois tronçons dont les pentes sont distinctes, soit la haute CH (entre la frontière Canada États-Unis et le km 99), la moyenne CH (entre le km 99 et le km 39) et la basse CH (entre le km 39 et le fleuve Saint-Laurent). La pente moyenne par section est de 0,263 % pour la haute CH, 0,048 % pour la moyenne CH et 0,210 % pour la basse CH. Pour chaque tributaire, la section en aval est évaluée en fonction de sa pente, correspondant au segment de la rivière qui s'étend de son embouchure jusqu'à une coupure de pente importante. Ceci correspond au km 9,7 pour DL, au km 6,1 pour FA et au km 7,4 pour BSV. Les pentes utilisées pour les tributaires sont donc de 0,516 %, 0,847 % et 0,687 % respectivement pour les rivières DL, FA et BSV. Finalement, la rivière DL rejoint la CH dans la haute CH et les rivières FA et BSV se jettent dans la rivière principale au niveau de la moyenne CH. Ainsi, la rivière DL est deux fois plus abrupte que la rivière CH dans cette section, et ce ratio augmente à 18 fois pour la rivière FA et à 14 fois pour la rivière BSV par rapport à la moyenne CH.

La période typique de débâcle de la rivière CH et de ses tributaires se situe entre le début mars et la mi-avril. Cette période est généralement très dynamique et se caractérise par la formation de plusieurs embâcles et l'inondation subséquente du tronçon intermédiaire de la rivière CH, incluant notamment le centre-ville de Beauceville et de Saint-Georges. De plus, des débâcles hivernales partielles, mais importantes, sur tous les tributaires, tout comme sur la rivière CH, ont souvent lieu. Pour cette raison, le barrage Sartigan, long de 200 m, a été construit en 1967 à titre de structure de contrôle des glaces sur la CH en amont de la ville de Saint-Georges (km 102,5). Son rôle est de piéger et d'emmagasiner les blocs de glace pendant la saison de la débâcle afin de protéger la ville de Saint-Georges en aval. Il en sera question régulièrement dans le texte, notamment afin d'évaluer son efficacité.

3.2 Bassin versant de la rivière Sainte-Anne

Le second bassin versant à l'étude est la rivière Sainte-Anne (STA), traversant, entre autres, la ville de Saint-Raymond faisant partie de la MRC de Portneuf, dans la région administrative de la Capitale-Nationale. La rivière STA a été sélectionnée pour ce projet parce qu'elle est responsable de nombreuses inondations touchant environ 22 % du périmètre urbain de la ville de Saint-Raymond (CAPSA, 2014), même dans des zones qui ne sont pas cartographiées comme inondables, et ce, malgré la construction d'une estacade en amont de la ville.

La figure 3 présente le bassin versant de la rivière STA et le bassin versant propre à chacun de ses tributaires, dont celui étudié appartenant à la rivière Bras-du-Nord (BDN). Les chiffres indiqués à droite du bassin versant représentent le kilométrage à partir du barrage Chute-Panet (BCP) choisi comme km 0 car les processus de glace n'affectent pas la ville de Saint-Raymond en aval de ce point. Les profils d'élévation des rivières STA et BDN sont montrés à la figure 4 et le tableau 3 indique la superficie de leurs bassins respectifs ainsi que la pente de chacune des rivières, puis les ratios associés.

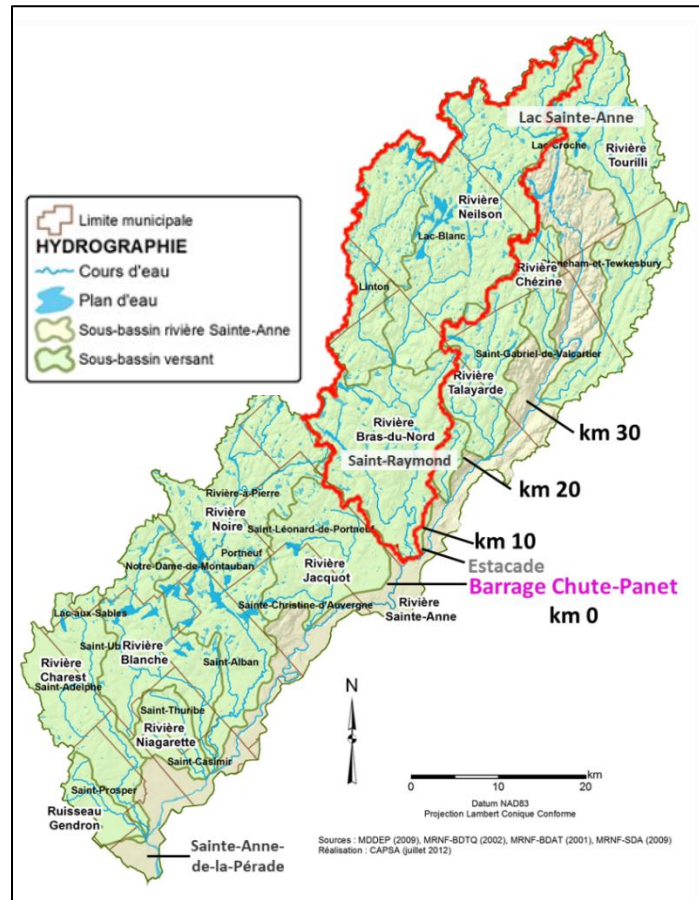


Figure 3. Bassins versants de la rivière STA et de ses tributaires avec le kilométrage à partir du barrage Chute-Panet. Le bassin versant de la rivière BDN est tracé en rouge (adapté de CAPSA, 2014).

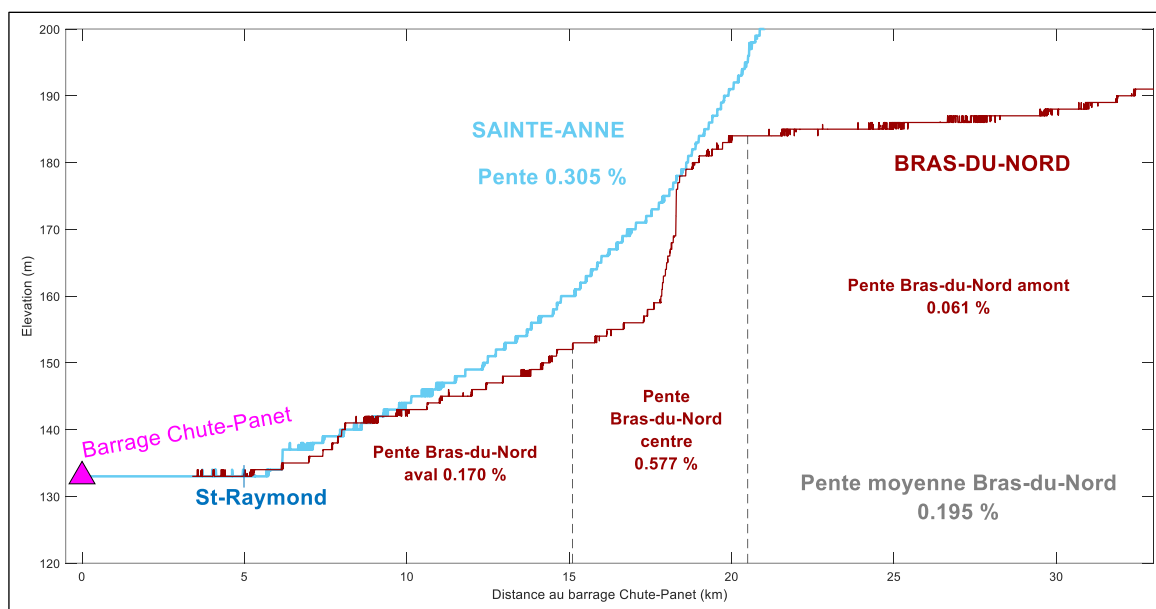


Figure 4. Profils d'élévation des rivières STA et BDN avec pentes associées à chaque section. Les lignes pointillées séparent la BDN en trois sections selon les coupures de pente, soit aux km 15,2 et 20,5 du tributaire (adapté de Simard-Robitaille, 2021).

Tableau 3. Tailles des bassins versants, pentes de la STA et de la BDN et ratios associés.

Bassin versant	Superficie du bassin versant (km ²)	Pente** (%)
(a) STA	1550*	0,305
(b) BDN	777	0,170
Ratio b/a	0,5	0,6

*Taille du bassin versant drainé par la rivière STA en amont du BCP sous lequel les processus de glace n'affectent plus la ville de Saint-Raymond.

**La partie aval du tributaire est considérée entre l'embouchure jusqu'à une coupure de pente importante, ce qui correspond au km 15,2 pour la BDN.

La STA prend sa source dans le lac Sainte-Anne et s'écoule vers le sud sur 123 km pour se jeter sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent à la hauteur de Sainte-Anne-de-la-Pérade. La superficie totale du bassin versant de la STA est de 2 706 km² et la superficie en amont du BCP, soit celle considérée dans cette étude, est de 1 550 km². Parmi les 21 municipalités situées le long de la rivière STA, Saint-Raymond est la plus grande en matière de superficie, occupant 20 % du bassin versant de la STA (CAPSA, 2014).

La confluence entre le STA et la BDN est celle étudiée dans le présent projet, car la rivière BDN est le tributaire le plus important en superficie dans le bassin versant de la STA avec 777 km² de surface drainée. Cette superficie représente 29 % de celle du bassin versant

total et 50 % du bassin versant pouvant affecter la ville de Saint-Raymond par ses glaces. La rivière BDN rencontre la STA à 3,3 km en amont du BCP et s'étend sur une longueur de 48 km. La STA possède une pente moyenne de 0,305 % tandis que la pente moyenne de la rivière BDN est de 0,195 %. La partie aval du tributaire, considérée pour sa pente, représente la partie située entre son embouchure et une coupure de pente importante. La rivière BDN est divisée en trois sections distinctes en raison de sa pente, avec des changements prononcés de terrain aux km 15,2 et 20,5. Respectivement, les parties aval, centre et amont du tributaire sont caractérisées par des pentes de 0,170 %, 0,577 % et 0,061 %. La pente de la STA est donc deux fois plus prononcée que celle de la partie aval de la BDN.

La période de débâcle de la rivière STA se situe généralement entre la mi-mars et la mi-avril. Les trains de glace se formant sur cette rivière durant cette période, couplés aux conditions de la glace présente au centre-ville lors de la débâcle, induisent souvent la formation d'embâcles aboutissant à l'inondation du centre-ville de Saint-Raymond.

4 Méthodologie

Cette section présente les instruments utilisés par l'UL lors de ses campagnes de terrain pour les cinq saisons d'activité du projet ainsi que les sites étudiés chaque année, incluant les stations hydrométriques et météorologiques d'autres organisations sollicitées pour compléter le portrait de chaque débâcle.

4.1 Instruments utilisés

Les instruments utilisés par l'UL pour étudier les conditions météorologiques, hydrométriques et de glace autour des confluences d'intérêt sont présentés dans cette partie.

4.1.1 Hors de l'eau

Afin d'étudier les conditions météorologiques et de glace, des instruments ont été installés hors de l'eau à proximité des rivières et dans le couvert de glace. Le tableau 4 présente les modèles de ces instruments ainsi que leurs années d'utilisation. La figure 5 présente des photographies de la fixation des caméras et des capteurs de température de l'air.

Tableau 4. Modèles des instruments installés hors de l'eau près des sites, données captées et année d'utilisation.

Modèle de l'instrument	Données captées	Année d'utilisation	
		Bassin CH	Bassin STA
Brinno BCC100	Images	2020, 2021, 2022, 2023 et 2024	2021, 2023 et 2024
HOBO UA-002-08	Température (air)	2021	2021
HOBO U20-001-01	Pression (air)	2020, 2021 et 2022	2023
Tracki 2021 Mini Real time	Coordonnées GPS	2020 et 2021	-

Des caméras de surveillance Brinno BCC100 ® ont été installées sur des arbres (figure 5a, b) ou sur des ponts (figure 5c, d, e, f), lorsque possible, pour les cinq saisons étudiées dans le bassin versant de la CH et pour les débâcles de 2021, 2023 et 2024 dans le bassin versant de la STA. Des sondes de pression atmosphérique (HOBO U20-001-01®) ont été utilisées pour les débâcles de 2020, 2021 et 2022 dans le bassin versant de la CH. Des capteurs de température d'air (HOBO UA-002-08®) (figure 5a, b) ont enregistré des données horaires dans chacun des quatre tributaires étudiés pour la débâcle 2021. Des traceurs GPS (Tracki 2021 Mini Real time ®) ont été fixés dans le couvert de glace de la CH et de ses tributaires avant le début de la débâcle pour les débâcles de 2020 et de 2021. Finalement, des vols de drone ont été effectués pour les cinq saisons étudiées dans le bassin versant de la CH afin d'observer de plus près les embâcles hivernaux et printaniers formés.

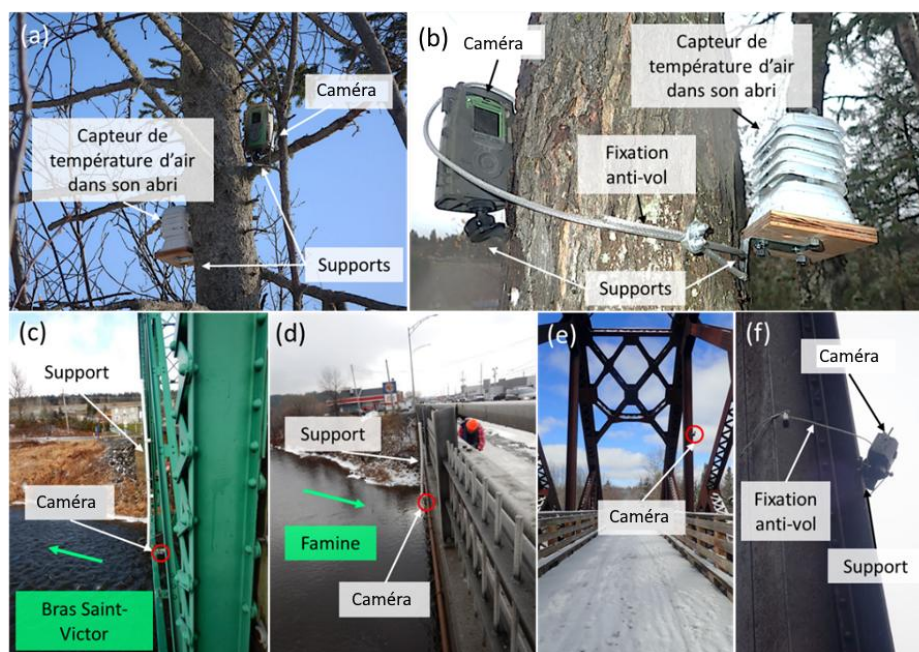


Figure 5. Caméras installées sur des arbres et capteurs de température de l'air aux sites 2020-2021 : (a) BSV-10 et (b) DL-04. Caméras installées sur des ponts aux sites 2020-2021 : (c) BSV-1; (d) FA-02; (e) et (f) BDN-0. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

4.1.2 Stations submersibles

Afin d'étudier les paramètres hydrométriques, des instruments ont été installés dans des stations submersibles. Le tableau 5 présente les modèles des instruments qui ont été installés sous l'eau ainsi que leurs années d'utilisation par bassin versant.

Tableau 5. Modèles des instruments installés sous l'eau, données correspondantes et périodes d'utilisation.

Modèle de l'instrument	Données captées	Année d'utilisation	
		Bassin CH	Bassin STA
RBRsolo ³ T	Température (eau)	2020, 2021, 2022, 2023 et 2024	2021, 2023 et 2024
HOBO U20L-01	Pression (eau)	2020, 2021, 2022, 2023 et 2024	2021, 2023 et 2024
HOBO UA-004-64	Accélération et inclinaison	2020, 2021, 2022 et 2023	2021 et 2023

Le bassin versant de la rivière CH a été instrumenté par l'UL lors des hivers 2019-2020 à 2023-2024, alors que le bassin versant de la rivière STA a été instrumenté seulement lors des hivers 2020-2021, 2022-2023 et 2023-2024. Pour chaque hiver étudié, excepté pour l'hiver 2023-2024 où aucun capteur d'accélération (HOBO UA-004-64 ®) n'était en place, chaque station submersible contenait une sonde de température (RBRsolo3T ®), une sonde de pression (HOBO U20L-01 ®) et un capteur d'accélération (HOBO UA-004-64 ®) collectant des données relatives à la turbulence près du lit.

La figure 6 présente des photographies des instruments installés sur les stations submersibles. Les sondes de pression et de température ont été installées à l'intérieur de tuyaux en PVC et serrées avec des anneaux en plastique ajustés (figure 6a, b, c). Ces tuyaux étaient fixés à une plaque métallique pesant 11 kg et la plateforme a été fixée au lit de la rivière à l'aide de pieux de métal (figure 6a). Le capteur d'accélération était fixé à l'aide d'un tube en caoutchouc et d'un boulon à l'intérieur d'une ouverture dans la poignée de la plaque (figure 6b, c). Quelques améliorations ont été apportées à la station submersible à la suite de la première saison afin d'en faciliter la récupération. Grâce à ces améliorations, la totalité des dispositifs utilisés pour les saisons subséquentes a été retrouvée, à l'exception de la saison 2023-2024, durant laquelle les données de localisation des instruments ont été perdues. Trois modifications importantes ont été effectuées. Premièrement, plutôt que de fermer les tuyaux de PVC avec un bouchon maintenu par la seule pression du tuyau (figure 6b), un boulon a été utilisé afin d'augmenter la résistance de la fermeture (figure 6d). Deuxièmement, une chaîne a été soudée à la plaque pour maintenir le dispositif en place à l'aide d'un pieu supplémentaire, ce qui a contribué à prévenir le déplacement des stations dû à l'augmentation du débit ou au mouvement de la glace (figure 6c). Troisièmement, les plateformes ont été peintes en orange vif afin d'en augmenter la visibilité à la récupération (figure 6c, d).

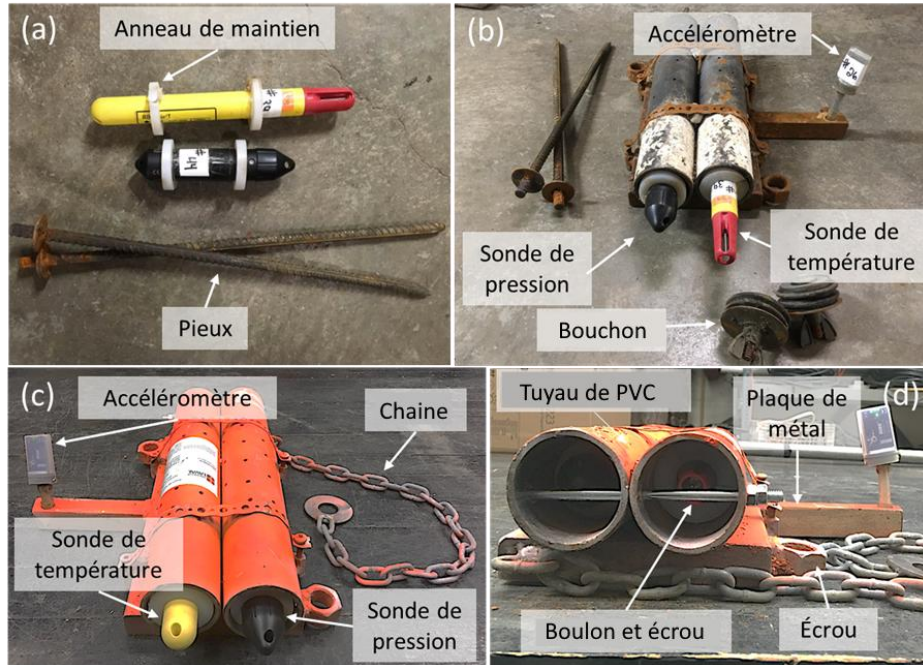


Figure 6. Station submersible : (a) anneau de maintien des instruments et pieux de fixation; (b) station pour l'hiver 2019-2020 montrant les instruments et bouchons de fermeture; (c) station pour les hivers 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024 (sans l'accéléromètre) montrant les instruments et la chaine de fixation et (d) le boulon et écrou de fermeture et de fixation.

4.2 Bassin versant de la rivière Chaudière

Cette section présente les sites étudiés pour les confluences DL, FA et BSV dans le bassin versant de la CH. Celles-ci ont été étudiées lors des débâcles de 2020 à 2024.

4.2.1 *Débâcle 2020*

4.2.1.1 *Instrumentation des sites étudiés*

Pour la débâcle 2020, un total de 13 sites ont été étudiés dans le bassin versant de la rivière CH. Ceux-ci accueillaient un total de 11 caméras UL et neuf plateformes submersibles UL contenant entre un et trois instruments. Quatre sondes de pression atmosphérique ont aussi été posées dans les hôtels de ville des municipalités de Saint-Lambert-de-Lauzon, Vallée-Jonction, Saint-Georges et Saint-Martin. De plus, une caméra (CH-98) et deux stations hydrométriques (CH-98 et CH-67) du Comité de bassin versant de la rivière Chaudière (COBARIC) ont permis de recueillir des données.

La figure 7 présente les sites étudiés dans le bassin versant de la CH lors de la débâcle 2020 tandis que la figure 8, la figure 9 et la figure 10 présentent l'emplacement des instruments pour chacune des confluences à l'étude pour la débâcle 2020 ainsi que les éléments géomorphologiques et les structures anthropiques près de la confluence. Ces sites sont également superposés au profil d'élévation de leurs rivières respectives à la figure 11. Le tableau 6 présente le détail des instruments à chaque site par confluence.

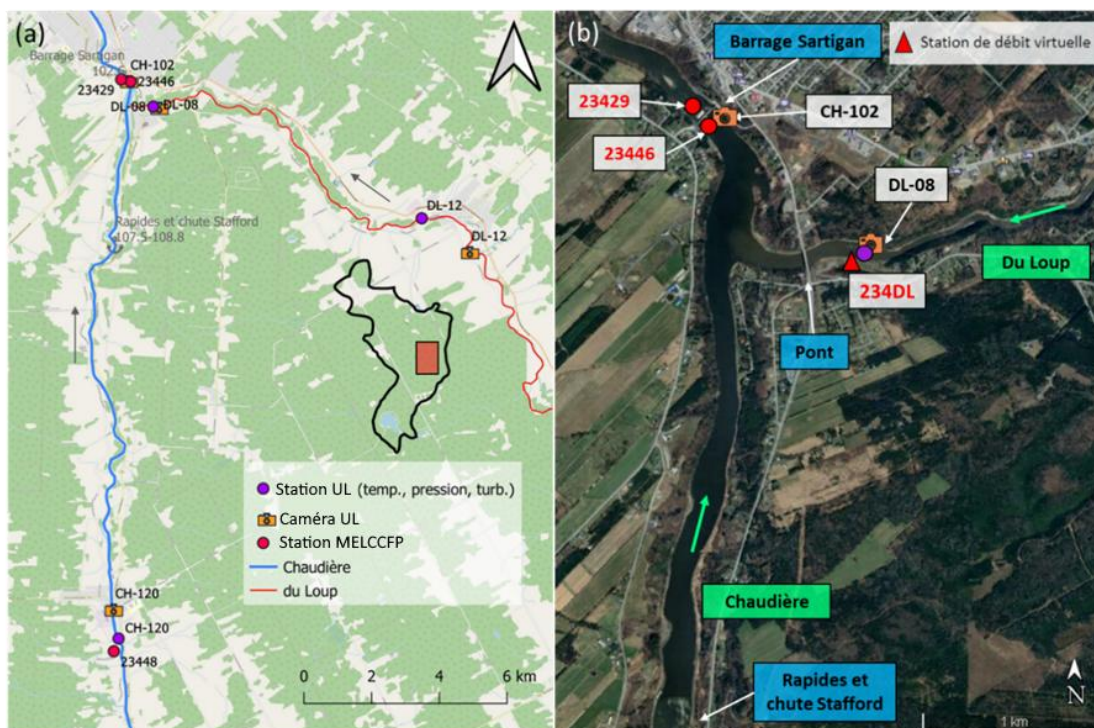


Figure 8. Sites étudiés lors de la débâcle 2020 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.



Figure 9. Sites étudiés lors de la débâcle 2020 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

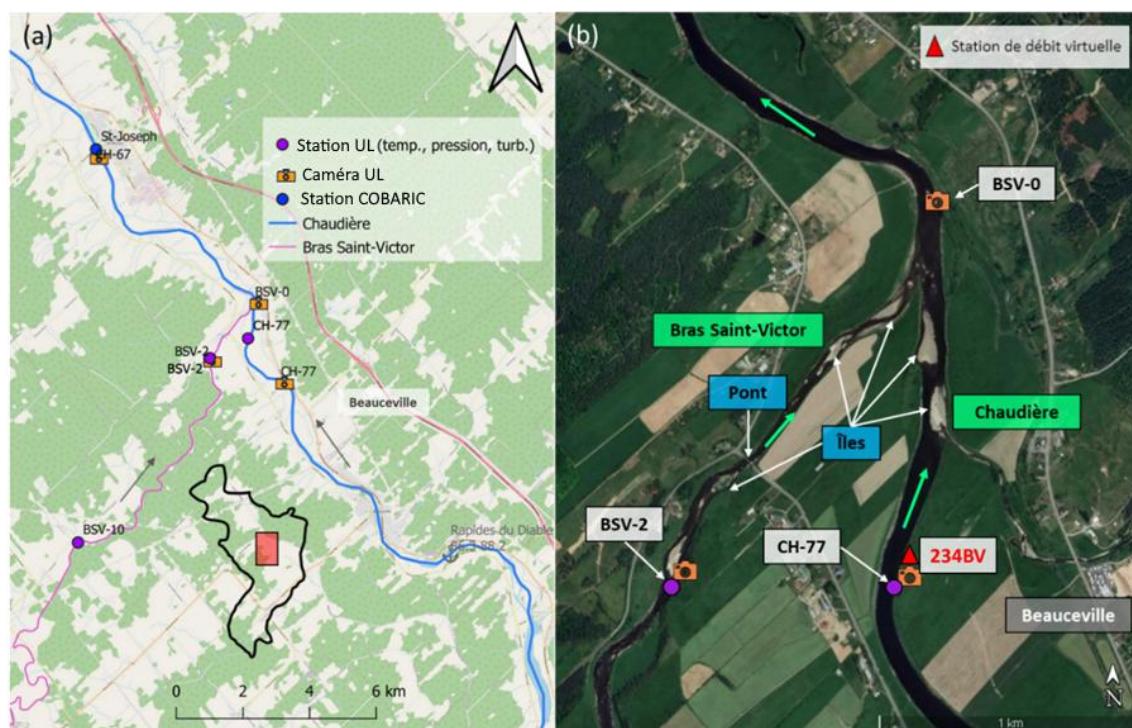


Figure 10. Sites étudiés lors de la débâcle 2020 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

Tableau 6. Sites étudiés lors de la débâcle 2020 dans le bassin versant de la rivière CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.

Point d'observation	Nom du site	Niveau d'eau	Température de l'eau	État de la glace	Débit
Emplacement de la station*		Intervalle	Intervalle	Intervalle	Intervalle
Confluence du Loup					
km 12,4 du Loup	DL-12	10 min	5 s	30 min	-
km 0,8 du Loup	DL-08	10 min	5 s	15 min	1 jour
km 120,1 Chaudière, amont de la confl.	CH-120	10 min	5 s	15 min	1 jour
km 102,6 Chaudière, aval de la confl.	CH-102	1 jour	-	30 min	-
Confluence Famine					
km 6,6 Famine	FA-6	-	5 s	30 min	1 jour
km 0,7 Famine	FA-07	-	-	30 min	-
km 98,7 Chaudière, amont de la confl.	CH-98	1 min	-	15 min	1 jour
km 95,4 Chaudière, aval de la confl.	CH-95	10 min	5 s	30 min	-
Confluence Bras Saint-Victor					
km 10,6 Bras Saint-Victor	BSV-10	10 min	5 s	-	-
km 2,0 Bras Saint-Victor	BSV-2	10 min	5 s	15 min	-
km 77,4 Chaudière, amont de la confl.	CH-77	10 min	5 s	15 min	1 jour
km 75,3 Chaudière, à la confl.	BSV-0	-	-	15 min	-
km 67,8 Chaudière, aval de la confl.	CH-67	1 min	-	15 min	-

*Distance à partir du barrage des Chutes-de-la-Chaudière dans la CH et de la confluence dans les tributaires.

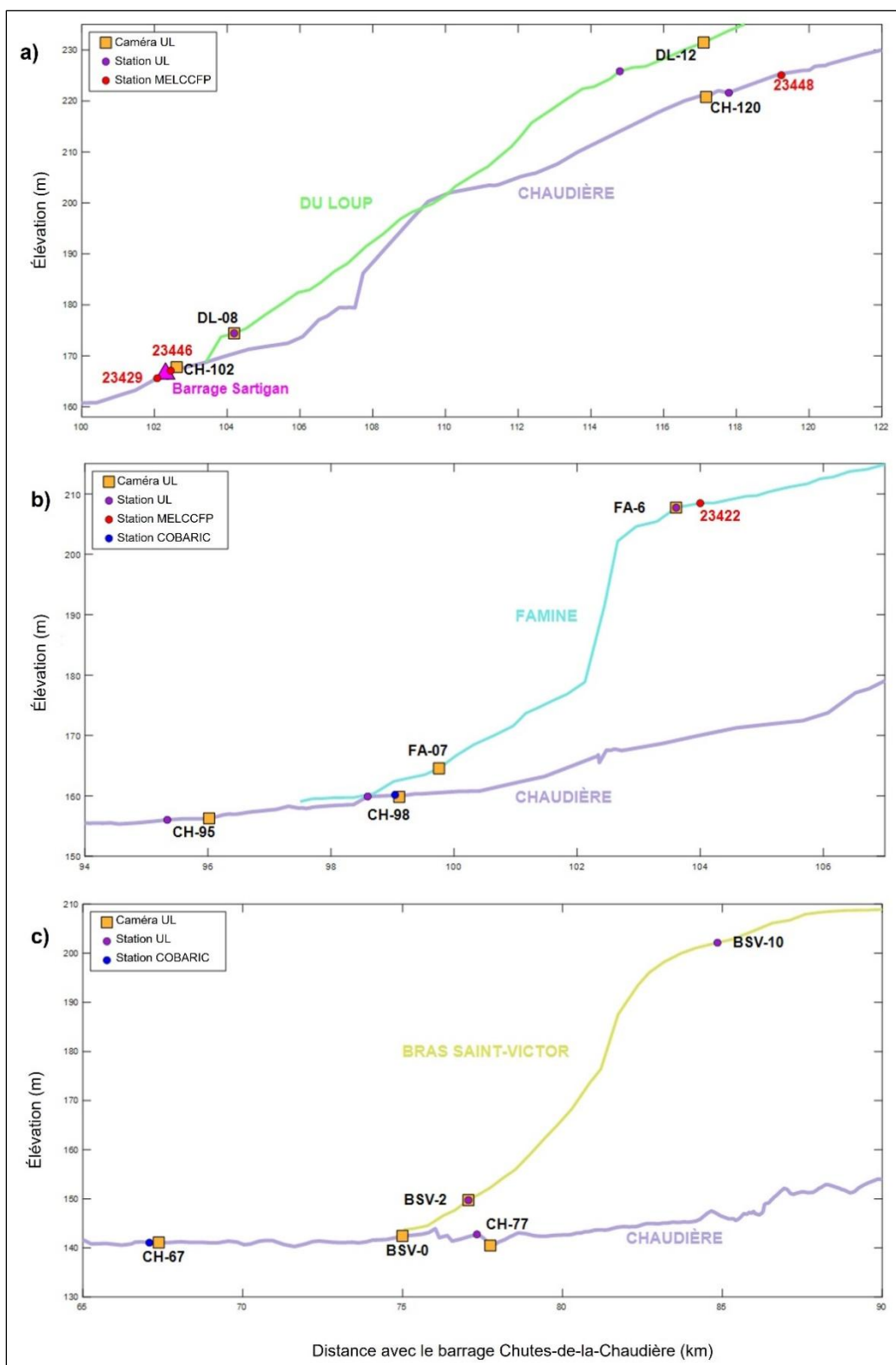


Figure 11. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL; (b) CH et FA; (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2020.

À la confluence DL, quatre sites ont été munis d'une station submersible et d'une caméra UL, dont deux dans le tributaire (DL-08 et DL-12) et deux dans la rivière principale, en amont (CH-120) et en aval de la confluence (CH-102).

Pour la confluence FA, deux sites avec station submersible et caméra UL ont été installés, soit dans la CH en aval de la confluence FA (CH-95) et dans le tributaire (FA-6). Le site FA-6 a été choisi entre autres en raison d'une coupure dans la pente du lit du tributaire qui connaît une forte pente avant ce point puis une pente beaucoup plus faible par la suite. Deux caméras UL ont également été installées, l'une dans la CH à l'amont de la confluence (CH-98) et l'autre dans le tributaire (FA-07).

Concernant la confluence BSV, trois stations submersibles UL ont été installées, dont une dans la rivière principale en amont de la confluence (CH-77) et deux dans le tributaire (BSV-10 et BSV-2). Le site BSV-10 a été choisi entre autres en raison d'une coupure dans la pente du lit du tributaire qui connaît une forte pente avant ce point puis une pente beaucoup plus faible par la suite. Quatre caméras UL ont également été posées, soit trois dans la rivière principale, en amont et en aval de la confluence (CH-77 et CH-67 respectivement) ainsi qu'à la confluence elle-même (BSV-0), et une dans le tributaire (BSV-2).

De plus, un total de 23 traceurs GPS ont été installés dans le bassin versant de la rivière CH pour la débâcle 2020, dont 19 sont utilisés pour l'analyse. La figure 12 montre le placement initial des traceurs GPS utilisés pour analyser chacune des confluences durant la saison de la débâcle 2020.

L'installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour la saison 2019-2020 a eu lieu à compter du 12 septembre 2019 (figure 13). Leur récupération s'est déroulée entre les 10 et 19 juin 2020 inclusivement (figure 14). De plus, des traceurs GPS ont été installés dans le couvert de glace de la CH et ses tributaires les 10 et 12 mars 2020 et des vols de drone ont eu lieu durant les débâcles hivernale et printanière, jusqu'au 6 avril 2020.

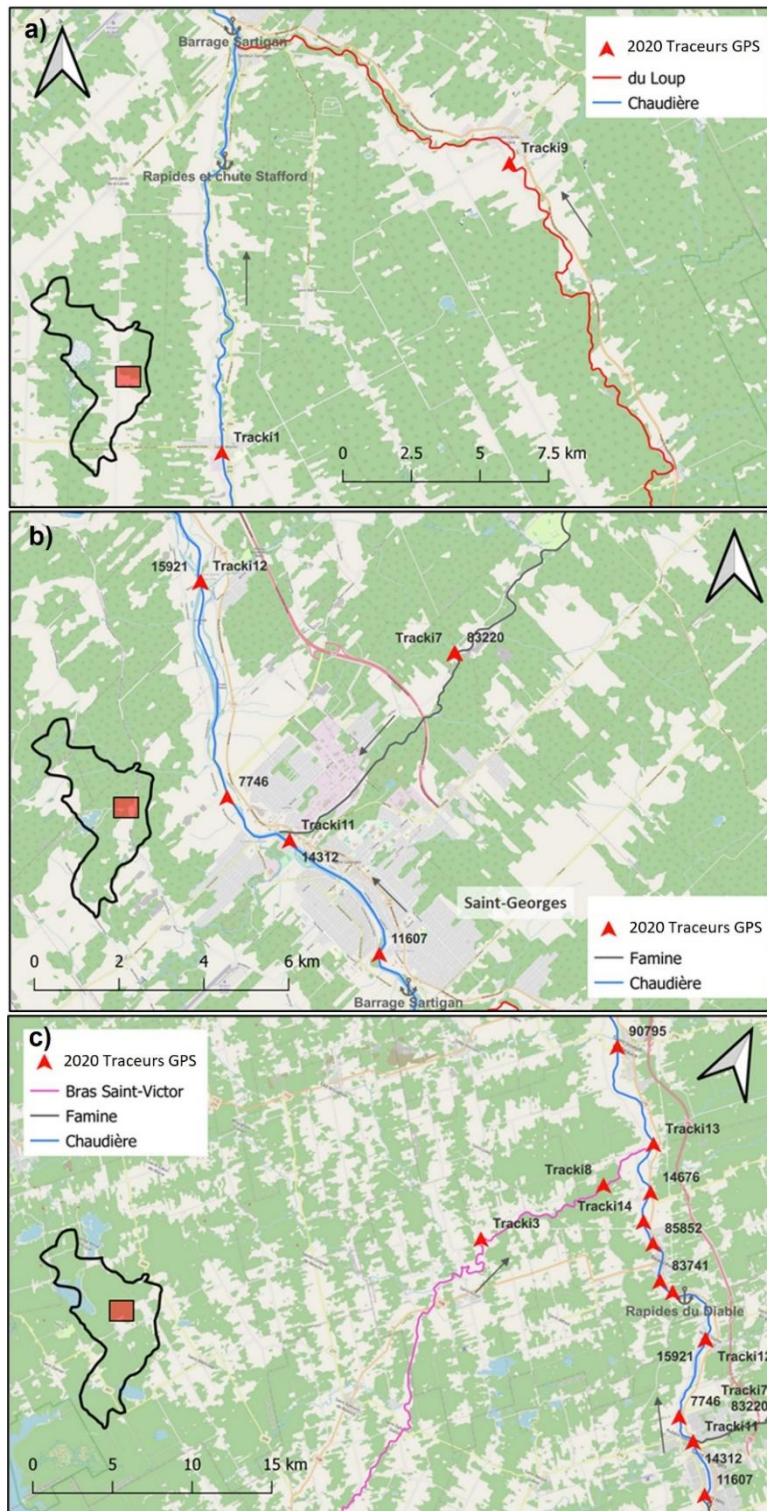


Figure 12. Traceurs GPS placés avant la débâcle 2020 dans le couvert de glace pour la confluence CH (a) DL; (b) FA et (c) BSV (sauf 83220, Tracki11 et 15921). Le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte et les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement.



Figure 13. Installation des instruments dans le bassin versant de la CH pour l'hiver 2019-2020 : (a) station submersible au site DL-12; et (b) station submersible au site BSV-2. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

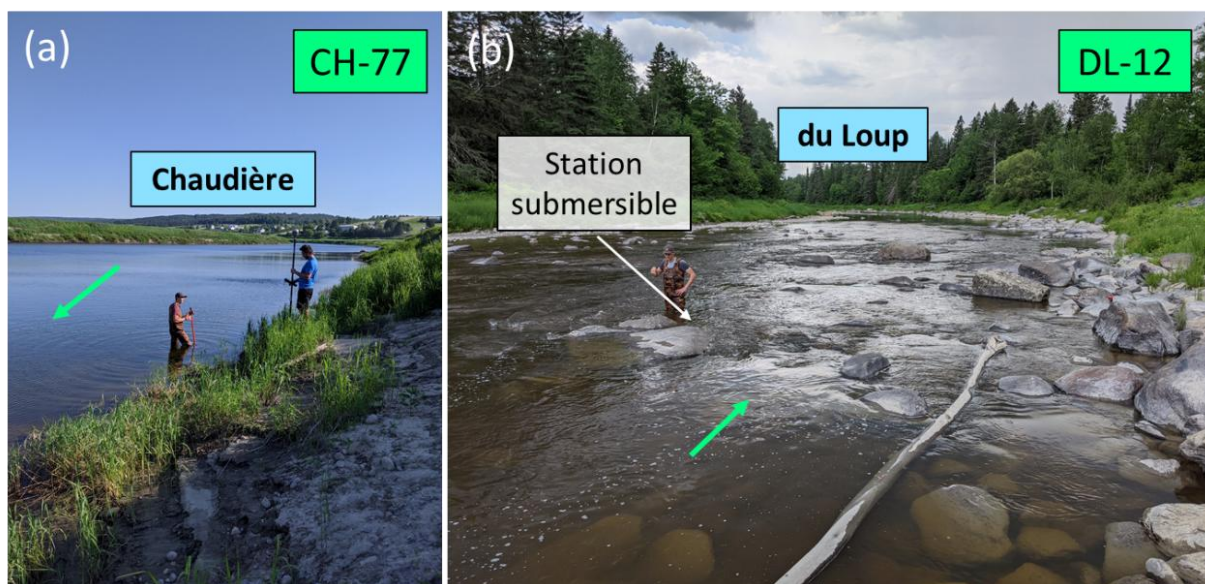


Figure 14. Récupération des instruments dans le bassin versant de la CH au printemps 2020 : (a) station submersible au site CH-77; et (b) station submersible au site DL-12. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

4.2.1.2 Données hydrométriques et météorologiques

Pour la débâcle 2020, les données de certaines stations du MELCCFP ainsi que du COBARIC ont été utilisées afin de compléter le portrait du bassin versant de la rivière CH.

Le MELCCFP opère deux stations pertinentes qui recueillent des données de débit sur la rivière CH, soit les stations de Saint-Martin (023448) au km 120,5 et de Saint-Georges (023429) à l'aval du barrage Sartigan au km 102,5. Le MELCCFP possède aussi une station hydrométrique sur la rivière FA (023422) au km 6,6 offrant également des données de débit. La station de Saint-Martin a été utilisée pour fournir des données hydrométriques en amont de la confluence DL tandis que celles de Saint-Georges et de la FA ont été utilisées pour fournir des données hydrométriques sur la CH en amont de la confluence FA et sur la rivière FA elle-même, respectivement.

Deux stations fictives ont été créées afin d'obtenir de l'information supplémentaire sur les rivières DL et CH. Une première station virtuelle au km 0,8 DL, appelée « 0234DL », a été construite en soustrayant le débit à la station Saint-Georges de celui à la station Saint-Martin pour obtenir le débit approximatif de la rivière DL. Cette station fictive a été construite sous l'hypothèse que le barrage Sartigan a maintenu le même nombre de vannes ouvertes pour la période étudiée et donc qu'un débit quotidien constant a traversé la structure hydraulique durant la débâcle. La seconde station virtuelle au km 77,4 CH, nommée « 0234BV », a été créée en additionnant le débit des stations de Saint-Georges et de la FA afin d'estimer le débit de la rivière CH en amont de la confluence BSV. Enfin, la station en amont du barrage Sartigan (023446) au km 102,8, enregistrant des niveaux d'eau, a aussi été utilisée pour compléter les informations recueillies pour cette section.

Les stations du COBARIC, fournissant des données sur le niveau d'eau à Saint-Georges (km 99,3) et à Saint-Joseph-de-Beauce (km 67,8), ont également été utilisées pour caractériser les conditions en amont de la confluence FA et en aval de la confluence BSV, respectivement. Les images captées à la station de Saint-Georges ont en outre permis d'analyser la débâcle de 2020.

De plus, les données météorologiques des stations de Saint-Georges (7027283), exploitée par le MELCCFP, et de Beauceville (7028754), exploitée par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), ont été utilisées. La première a servi à obtenir les précipitations (pluie et neige) ainsi que l'épaisseur de neige au sol, et la seconde a servi à obtenir la température de l'air, la vitesse du vent et la pression atmosphérique.

4.2.2 Débâcle 2021

4.2.2.1 Instrumentation des sites étudiés

Pour la débâcle 2021, un total de 15 sites ont été étudiés dans le bassin versant de la CH accueillant un total de 13 caméras UL, 13 plateformes submersibles UL, deux sondes de pression atmosphérique posées dans des hôtels de ville, une à Saint-Georges et l'autre à Beauceville et un capteur de température de l'air dans chaque tributaire étudié.

La figure 15 présente les sites étudiés dans le bassin versant de la CH lors de la débâcle 2021 tandis que la figure 16, la figure 17 et la figure 18 montrent l'emplacement des instruments pour chacune des confluences à l'étude ainsi que les éléments géomorphologiques et les structures anthropiques près des confluences. Ces sites sont également superposés au profil d'élévation de leurs rivières respectives à la figure 19. Le tableau 7 présente le détail des instruments à chaque site par confluence.

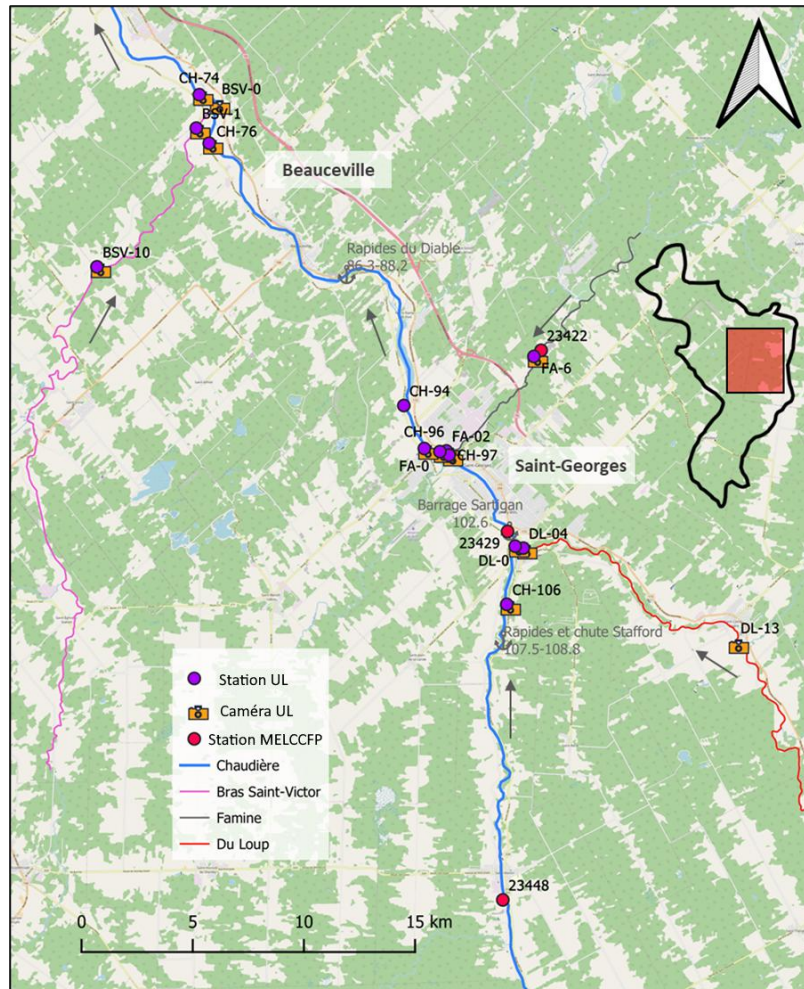


Figure 15. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 dans le bassin versant de la CH. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement et le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte.

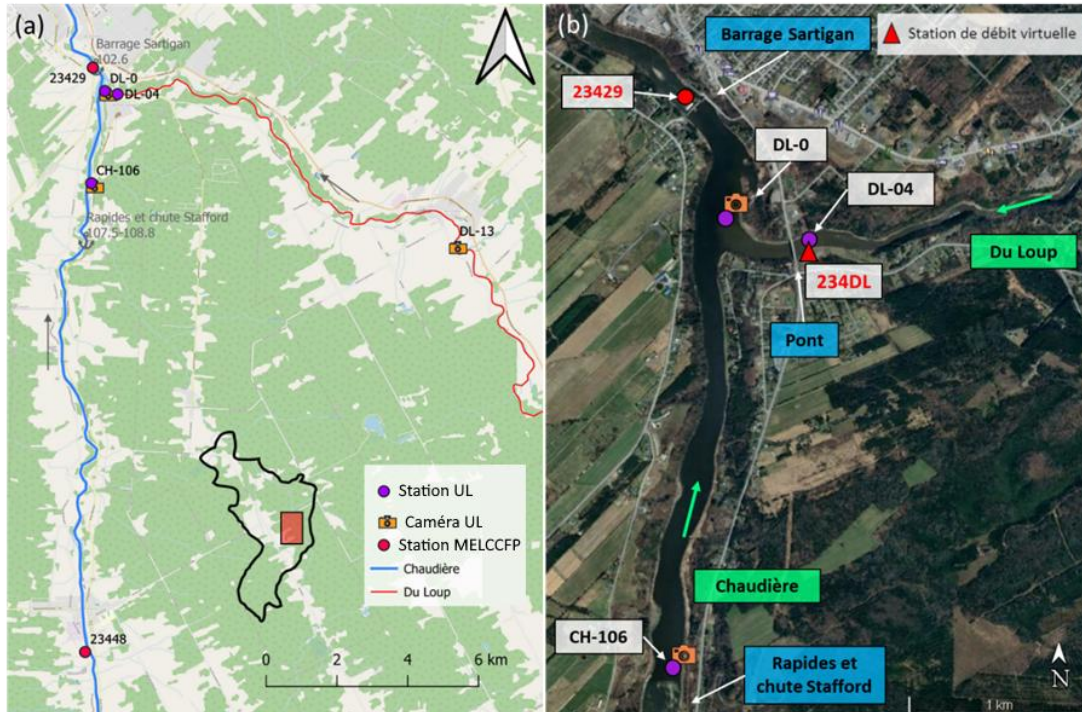


Figure 16. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

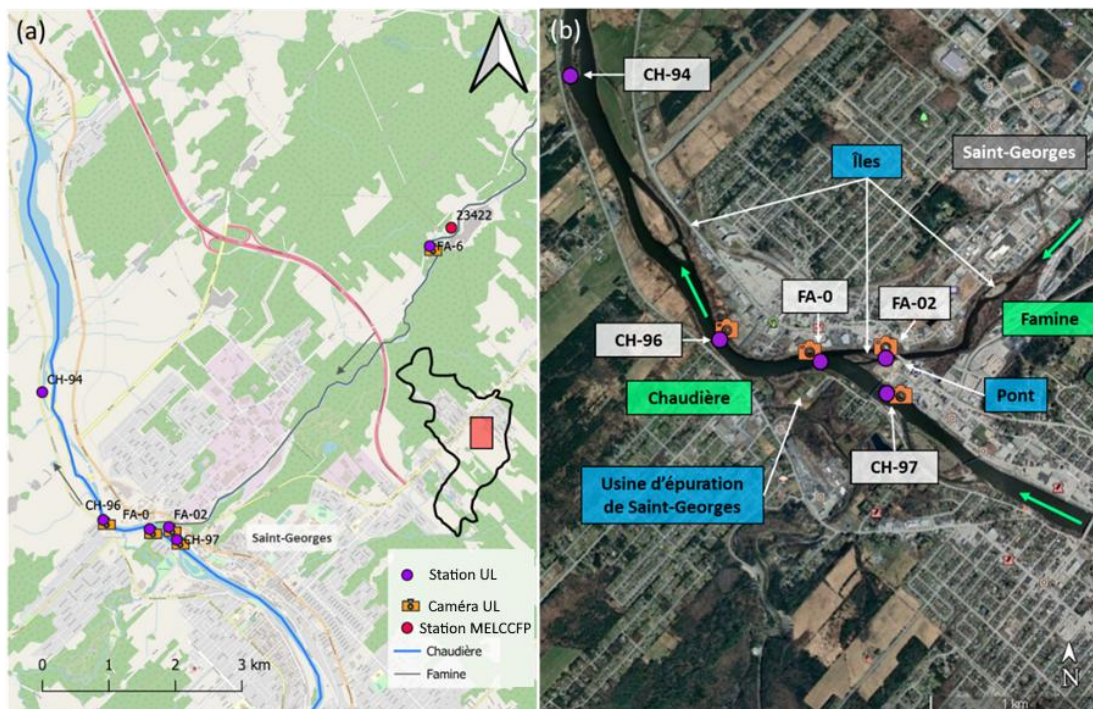


Figure 17. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

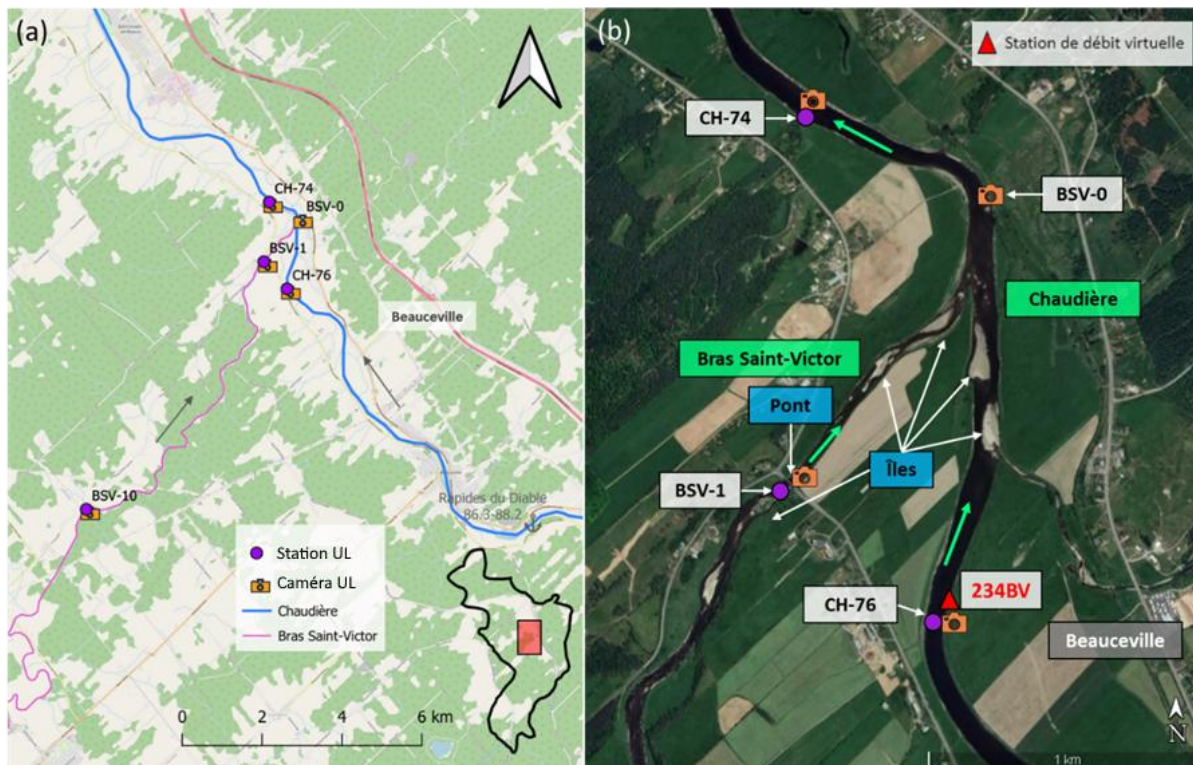


Figure 18. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

*Tableau 7. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière
CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.*

Point d'observation Emplacement de la station*	Nom du site	Niveau d'eau Intervalle	Température de l'eau Intervalle	État de la glace Intervalle	Débit Intervalle
Confluence du Loup					
km 13,5 du Loup	DL-13	-	-	20 min	-
km 0,4 du Loup	DL-04	10 min	1 min	-	-
km 103,4 Chaudière, aval de la confl.	DL-0	10 min	1 min	60 min	1 jour
km 106,0 Chaudière, amont de la confl.	CH-106	10 min	1 min	60 min	1 jour
Confluence Famine					
km 6,6 Famine	FA-6	10 min	1 min	60 min	1 jour
km 0,2 Famine	FA-02	10 min	1 min	60 min	-
km 97,9 Chaudière, amont de la confl.	CH-97	10 min	1 min	60 min	1 jour
km 97,5 Chaudière, à la confl.	FA-0	10 min	1 min	60 min	-
km 96,7 Chaudière, aval de la confl.	CH-96	10 min	1 min	60 min	-
km 94,6 Chaudière, entre FA et BSV	CH-94	10 min	1 min	-	-
Confluence Bras Saint-Victor					
km 10,6 Bras Saint-Victor	BSV-10	10 min	1 min	60 min	-
km 1,2 Bras Saint-Victor	BSV-1	10 min	1 min	30 min	-
km 76,9 Chaudière, amont de la confl.	CH-76	10 min	1 min	60 min	1 jour
km 75,1 Chaudière, à la confl.	BSV-0	-	-	60 min	-
km 74,2 Chaudière, aval de la confl.	CH-74	10 min	1 min	60 min	-

*Distance à partir du barrage des Chutes-de-la-Chaudière dans la CH et de la confluence dans les tributaires.

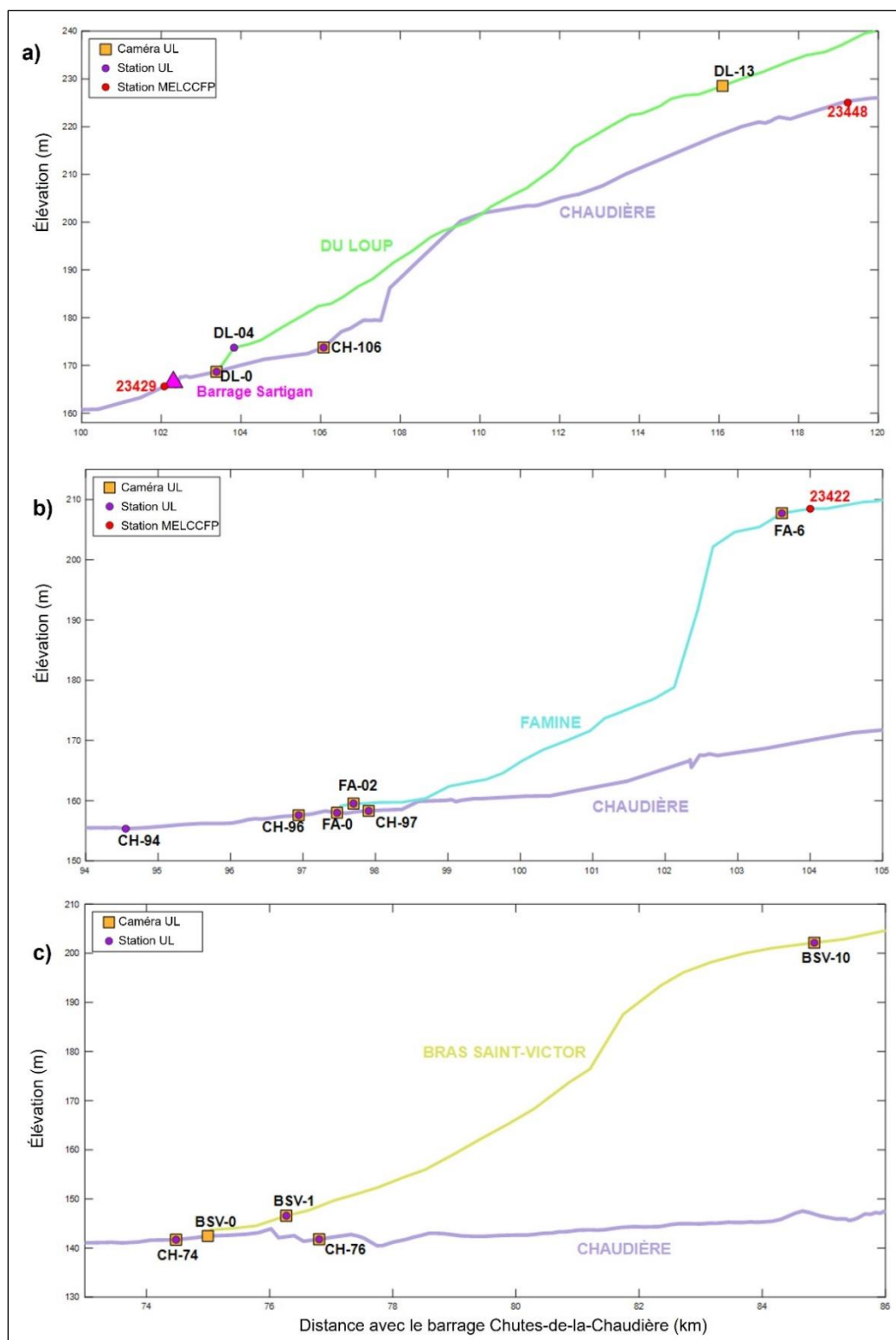


Figure 19. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL; (b) CH et FA; (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2021.

À la confluence DL, deux sites munis d'une station submersible et d'une caméra UL ont été installés, soit dans la rivière principale en amont de la confluence (CH-106) et à la confluence elle-même (DL-0). Dans le tributaire, une station submersible a été installée près de la confluence (DL-04) et une caméra a été installée en amont de DL (DL-13).

Pour la confluence FA, cinq sites comprenant une station submersible et une caméra UL ont été installés. De ces sites, trois se trouvaient dans la rivière principale, soit à l'amont de la confluence (CH-97), à la confluence elle-même (FA-0) et en aval de la confluence (CH-96), et deux sont dans le tributaire (FA-02 et FA-6). Le site FA-6 a été choisi entre autres en raison d'une coupure dans la pente du lit du tributaire qui connaît une forte pente avant ce point puis une pente beaucoup plus faible par la suite. De plus, une station submersible supplémentaire a été installée plus en aval dans la CH (CH-94) afin d'étudier la dynamique dans la rivière principale entre les deux confluences.

Concernant la confluence BSV, quatre sites munis d'une station submersible et d'une caméra UL ont été installés autour de la confluence BSV, soit deux dans la CH, l'une en amont et l'autre en aval de la confluence (CH-76 et CH-74 respectivement), ainsi que deux dans le tributaire (BSV-1 et BSV-10). Le site BSV-10 a été choisi entre autres en raison d'une coupure dans la pente du lit du tributaire qui connaît une forte pente avant ce point puis une pente beaucoup plus faible par la suite. Une caméra supplémentaire a également été posée à la confluence elle-même dans la CH (BSV-0).

Pour terminer la saison, plusieurs traceurs GPS ont été insérés dans le couvert de glace des rivières étudiées dans le bassin versant de la rivière CH pour la débâcle 2021 (figure 20).

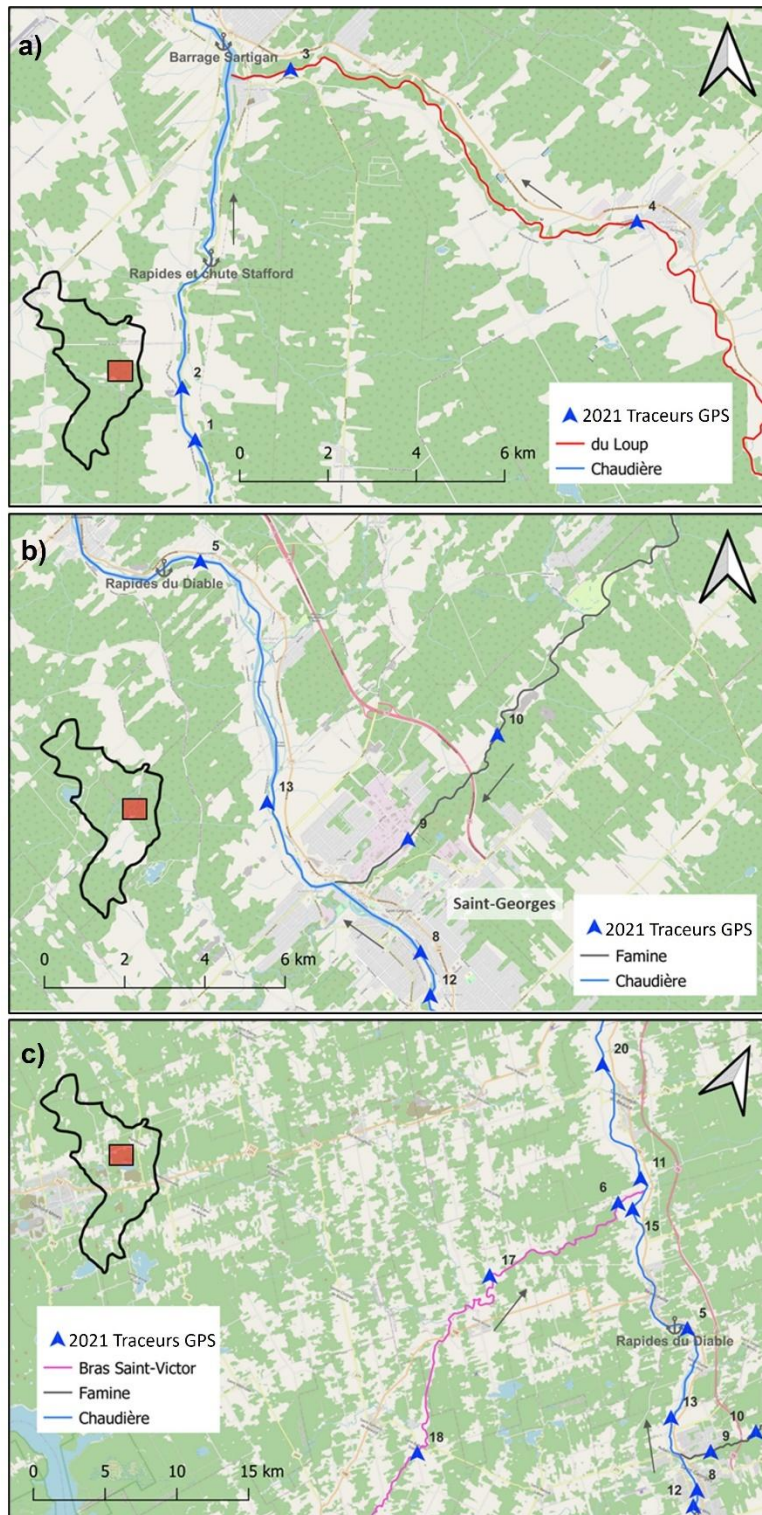


Figure 20. Traceurs GPS placés avant la débâcle 2021 dans le couvert de glace pour la confluence CH (a) DL; (b) FA et (c) BSV (sauf 9 et 10). Le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte et les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement.

L'installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour la saison 2020-2021 a eu lieu au mois d'octobre 2020, soit les 26, 28 et 29 octobre (figure 21). Deux activités de terrain ont été réalisées en mars 2021. Les piles des caméras de surveillance ont été changées les 3 et 4 mars 2021, puis des traceurs GPS ont été installés dans le couvert de glace de la rivière CH et de ses tributaires le 16 mars 2021 (figure 22). La récupération des instruments installés à l'automne précédent s'est déroulée les 20 et 21 avril 2021 (figure 23). De plus, des vols de drone ont eu lieu entre les 23 et 25 mars 2021 inclusivement.

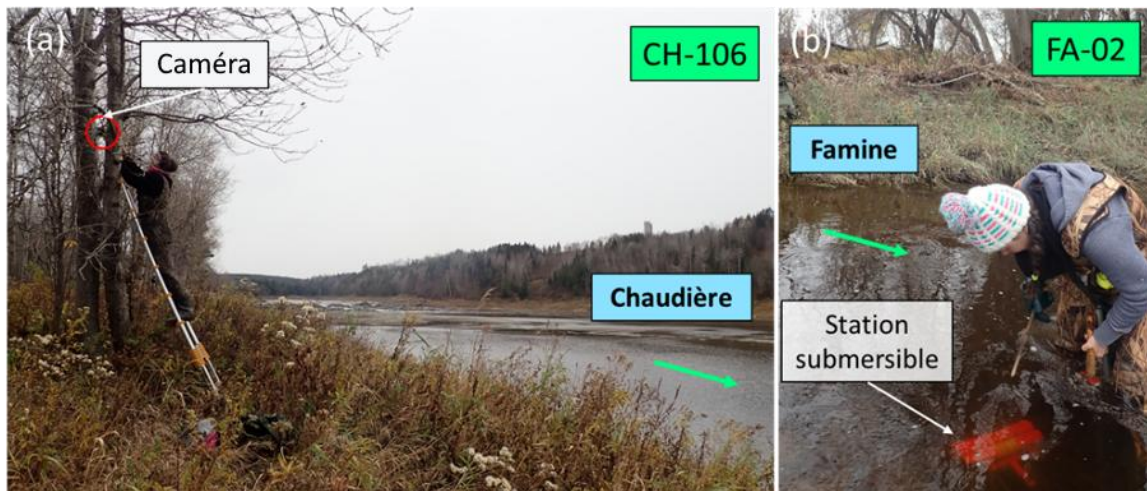


Figure 21. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour la débâcle 2021 : (a) caméra au site CH-106; et (b) station submersible au site FA-02. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

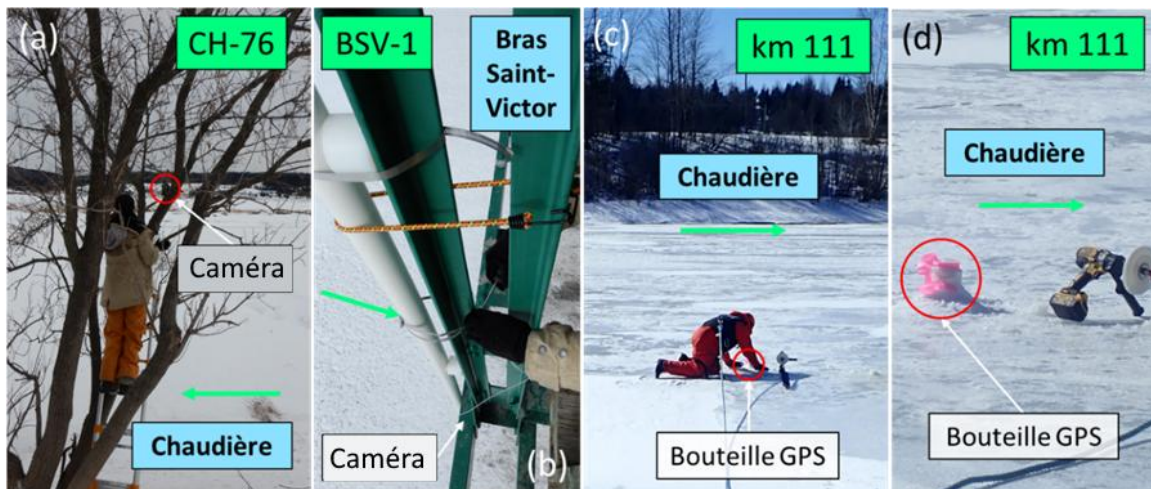


Figure 22. Travail de terrain dans le bassin versant de la rivière CH durant l'hiver 2020-2021 : (a) changement des piles des caméras aux sites CH-76 et (b) BSV-1. Pose de traceurs GPS au km 111 dans la CH : (c) installation et (d) bouteille contenant le traceur GPS. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

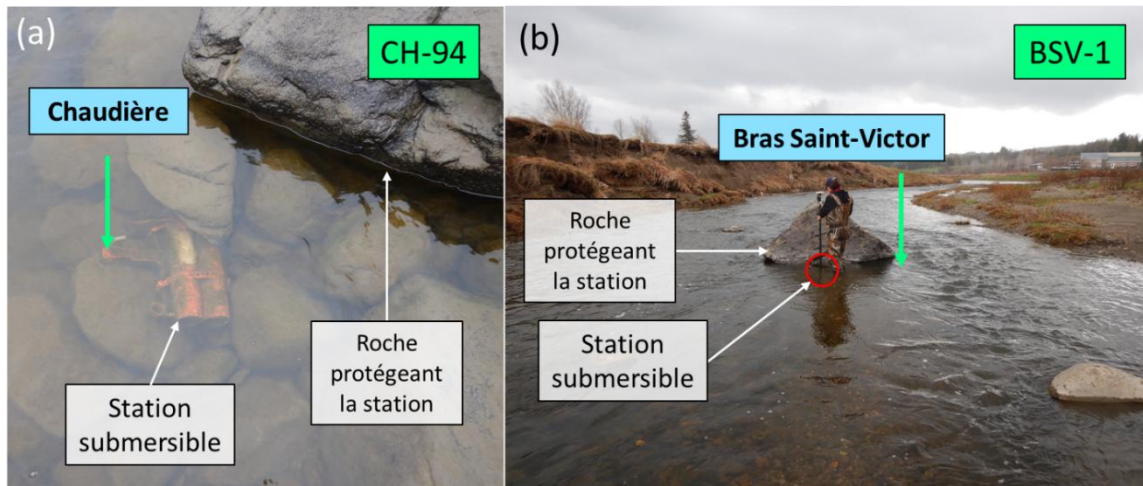


Figure 23. Récupération des instruments dans le bassin versant de la rivière CH au printemps 2021 : (a) station submersible au site CH-94 et (b) au site BSV-1. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

4.2.2.2 Données hydrométriques et météorologiques

Pour la saison de la débâcle 2021, les données de certaines stations du MELCCFP offrant des données de débit ont à nouveau été utilisées, soit les stations 023448 (km 120,5 CH), 023429 (km 102,5 CH) et 023422 (km 6,6 FA). De plus, les stations virtuelles 0234DL (placée au km 0,4 DL) et 0234BV (placée au km 76,9 CH) ont été recrées à des fins d'analyse. Toutes ces stations ont été exploitées de la même manière que durant la débâcle 2020 afin d'obtenir le débit dans la CH en amont de chaque confluence (023448 pour DL, 023429 pour FA et 0234BV pour BSV) et dans les rivières DL (0234DL) et FA (023422).

De plus, les données météorologiques des stations de Saint-Georges (7027283) et de Beauceville (7028754) ont de nouveau été utilisées afin d'obtenir les précipitations (pluie et neige) ainsi que l'épaisseur de neige au sol (station de Saint-Georges), puis la vitesse du vent, la température de l'air ainsi que la pression atmosphérique (station de Beauceville).

4.2.3 Débâcle 2022

4.2.3.1 Instrumentation des sites étudiés

Pour la débâcle 2022, 16 sites ont été étudiés dans le bassin versant de la rivière CH accueillant un total de 12 caméras UL, 13 plateformes submersibles UL et deux sondes de pression atmosphérique posées dans des hôtels de ville, une à Saint-Georges et l'autre à Sainte-Marie.

La figure 24 présente les sites étudiés dans le bassin versant de la CH lors de la débâcle 2022 tandis que la figure 25, la figure 26 et la figure 27 présentent l'emplacement des instruments pour chacune des confluences à l'étude ainsi que les éléments géomorphologiques et les structures anthropiques près des confluences. Ces sites sont également superposés au profil d'élévation de leurs rivières respectives à la figure 28. Le tableau 8 présente le détail des instruments à chaque site par confluence.

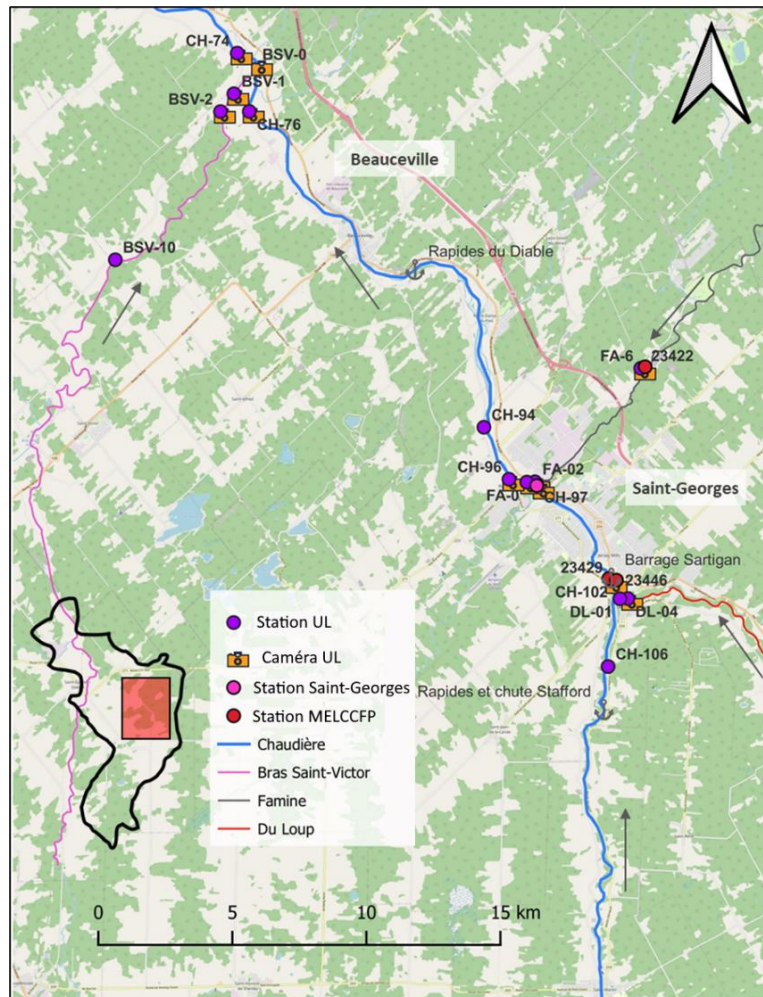


Figure 24. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 dans le bassin versant de la CH. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement et le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte.

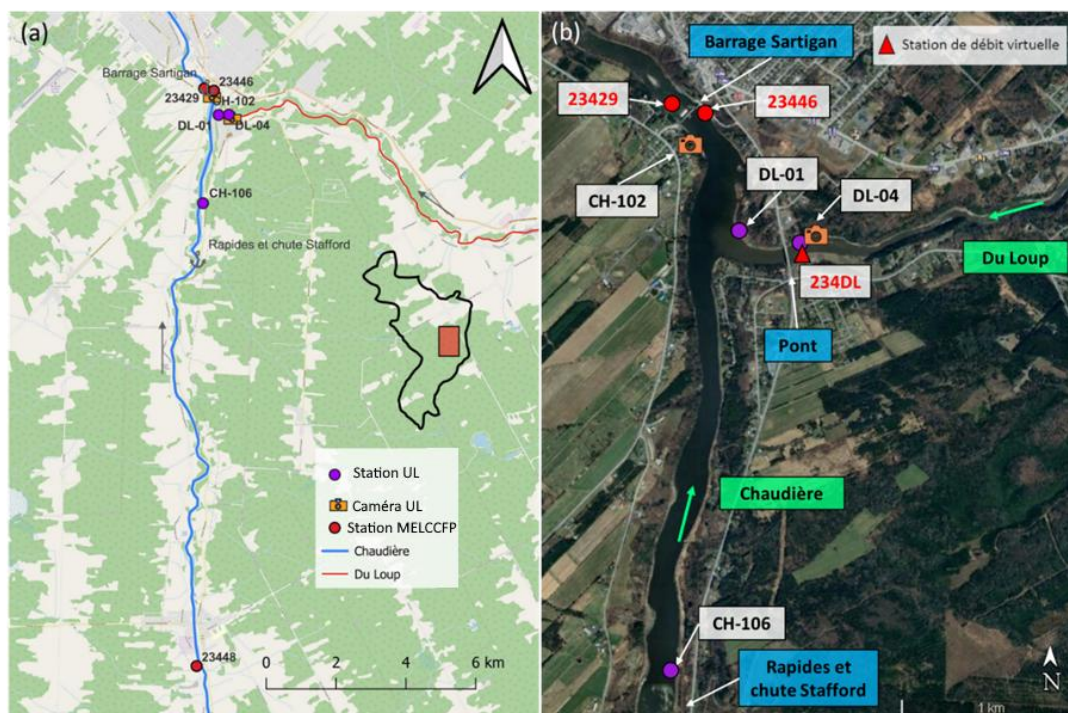


Figure 25. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

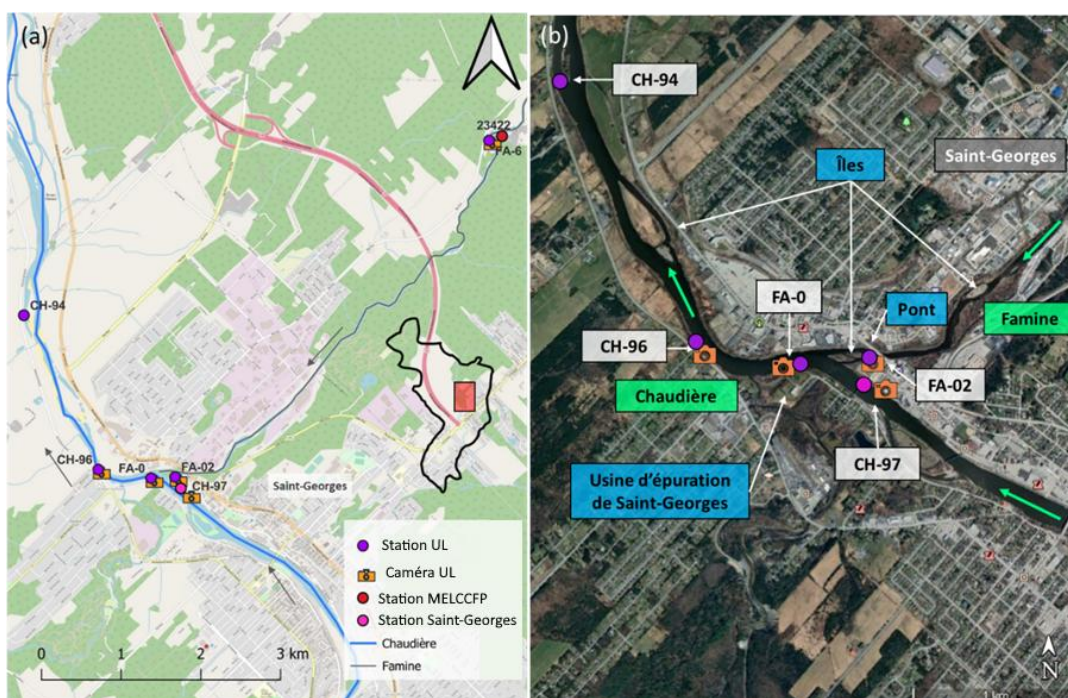


Figure 26. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

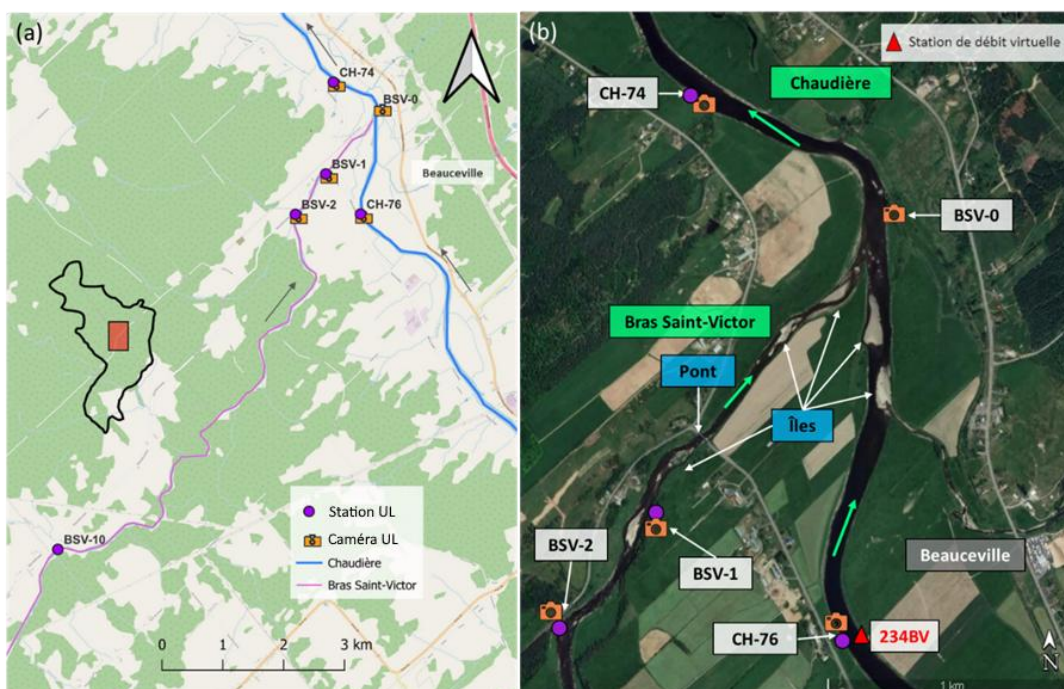


Figure 27. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

Tableau 8. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.

Point d'observation	Nom du site	Niveau d'eau	Température de l'eau	État de la glace	Débit
Emplacement de la station*		Intervalle	Intervalle	Intervalle	Intervalle
Confluence du Loup					
km 0,4 du Loup	DL-04	10 min	1 min	30 min	-
km 0,1 du Loup	DL-01	10 min	1 min	-	1 jour
km 106,0 Chaudière, amont de la confl.	CH-106	10 min	1 min	-	1 jour
km 102,7 Chaudière, aval de la confl.	CH-102	1 jour	-	30 min	-
Confluence Famine					
km 6,6 Famine	FA-6	10 min	1 min	30 min	1 jour
km 0,2 Famine	FA-02	10 min	1 min	30 min	-
km 97,9 Chaudière, amont de la confl.	CH-97	4 min	-	30 min	1 jour
km 97,5 Chaudière, à la confl.	FA-0	10 min	1 min	30 min	-
km 96,7 Chaudière, aval de la confl.	CH-96	10 min	1 min	30 min	-
km 94,6 Chaudière, entre FA et BSV	CH-94	10 min	1 min	-	-
Confluence Bras Saint-Victor					
km 10,6 Bras Saint-Victor	BSV-10	10 min	1 min	-	-
km 2,1 Bras Saint-Victor	BSV-2	15 min	15 min	30 min	-
km 1,2 Bras Saint-Victor	BSV-1	10 min	1 min	30 min	-
km 76,9 Chaudière, amont de la confl.	CH-76	10 min	1 min	30 min	1 jour
km 75,1 Chaudière, à la confl.	BSV-0	-	-	30 min	-
km 74,2 Chaudière, aval de la confl.	CH-74	10 min	1 min	30 min	-

*Distance à partir du barrage des Chutes-de-la-Chaudière dans la CH et de la confluence dans les tributaires.

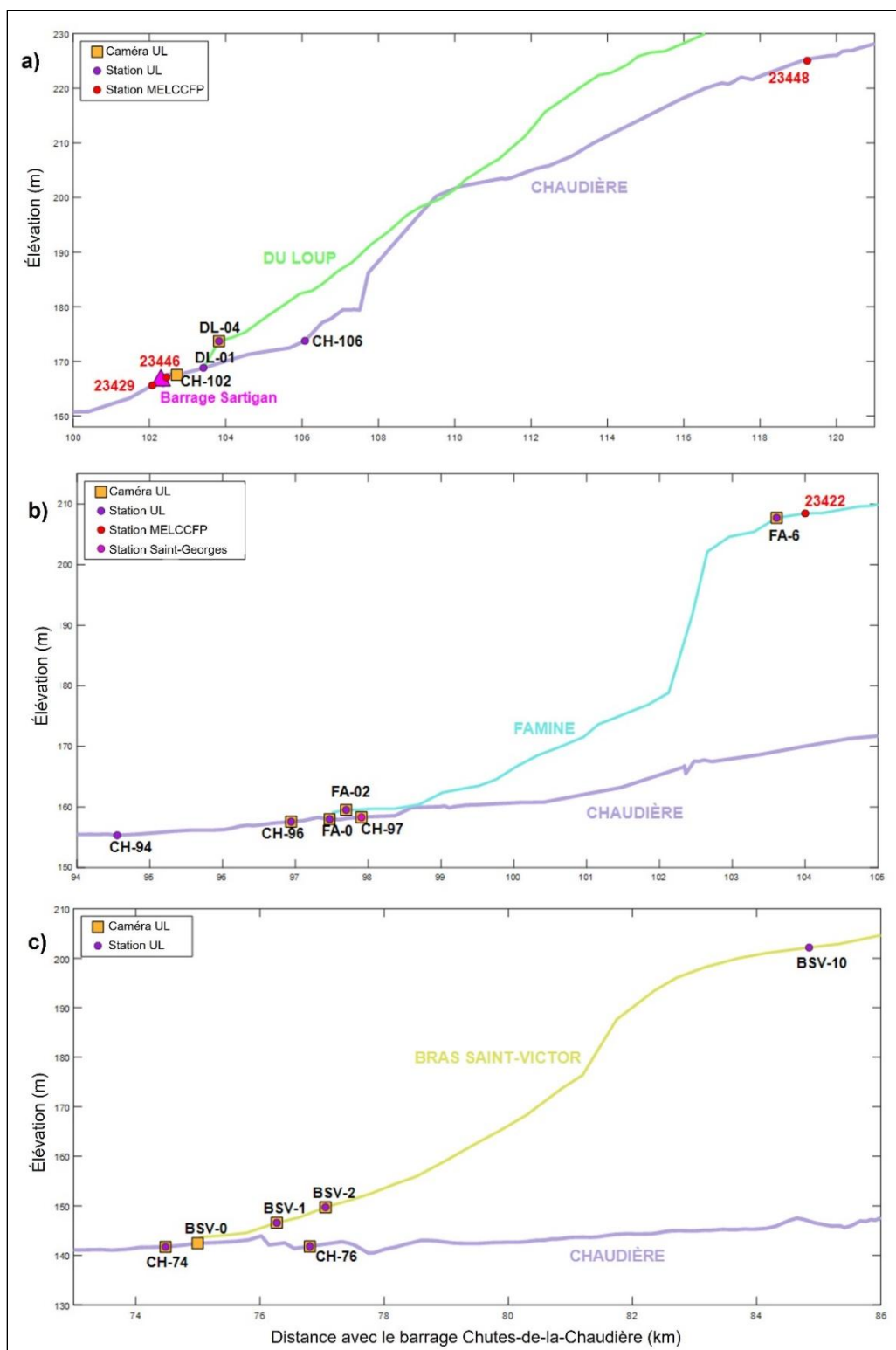


Figure 28. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL; (b) CH et FA; (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2022.

Autour de la confluence DL, trois stations submersibles UL ont été posées, soit une dans la rivière principale en amont de la confluence (CH-106) et deux dans le tributaire (DL-01 et DL-04). De plus, deux caméras UL ont été installées, l'une dans le tributaire (DL-04) et l'autre dans la CH près du barrage Sartigan (CH-102).

Pour la confluence FA, quatre sites comprenant une station submersible et une caméra UL ont été installés. De ces sites, deux se trouvent dans la rivière principale, soit à la confluence elle-même (FA-0) et en aval de la confluence (CH-96), et deux sont dans le tributaire (FA-02 et FA-6). Le site FA-6 a été choisi entre autres en raison d'une coupure dans la pente du lit du tributaire qui connaît une forte pente avant ce point puis une pente beaucoup plus faible par la suite. Une caméra supplémentaire a été installée dans la CH en amont de la confluence (CH-97) tout près du barrage gonflable de la Ville de Saint-Georges dont les données de niveau d'eau sont utilisées. De plus, une station submersible supplémentaire a été installée plus en aval dans la CH (CH-94) afin d'étudier la dynamique dans la rivière principale entre les deux confluences.

Concernant la confluence BSV, quatre sites munis d'une station submersible et d'une caméra UL ont été installés autour de la confluence BSV, soit deux dans la CH, l'une en amont et l'autre en aval de la confluence (CH-76 et CH-74 respectivement), ainsi que deux dans le tributaire (BSV-1 et BSV-2). Une caméra supplémentaire a également été posée à la confluence elle-même dans la CH (BSV-0) et une station submersible supplémentaire en amont dans le tributaire (BSV-10). Le site BSV-10 a été choisi entre autres en raison d'une coupure dans la pente du lit du tributaire qui connaît une forte pente avant ce point puis une pente beaucoup plus faible par la suite.

L'installation des instruments a eu lieu au mois d'octobre 2021, entre les 14 et 21 octobre inclusivement (figure 29). Leur récupération s'est déroulée les 5, 6 et 13 mai 2022 (figure 30). De plus, des vols de drone ont eu lieu en date du 31 mars 2022.

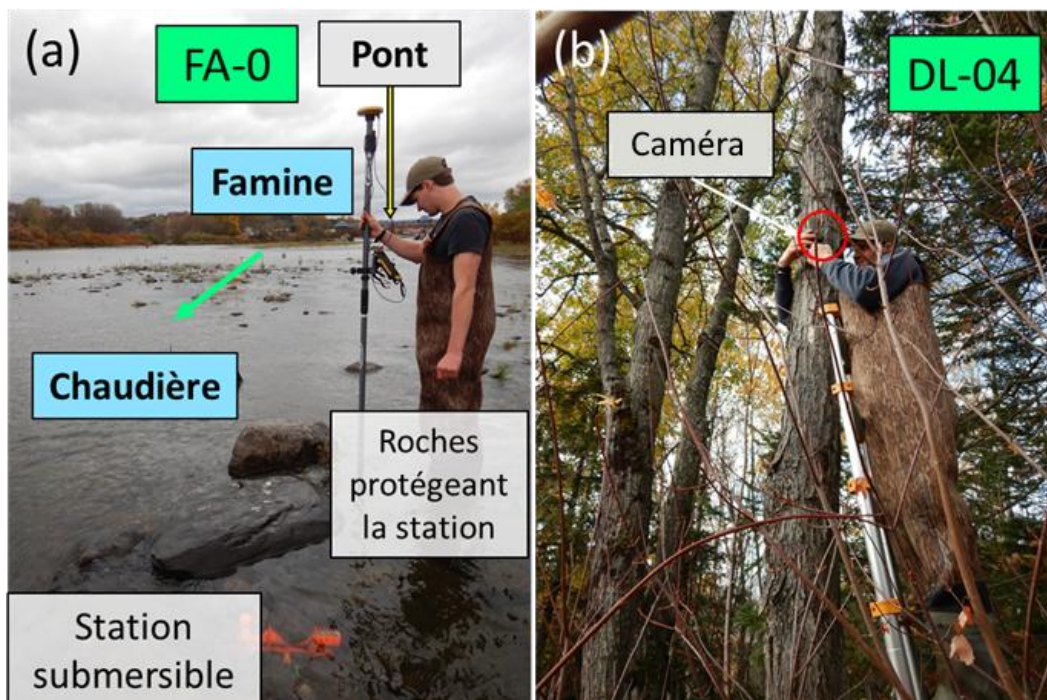


Figure 29. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour la débâcle 2022 : (a) station submersible au site FA-0 et (b) caméra au site DL-04. La flèche verte indique le sens de l'écoulement.

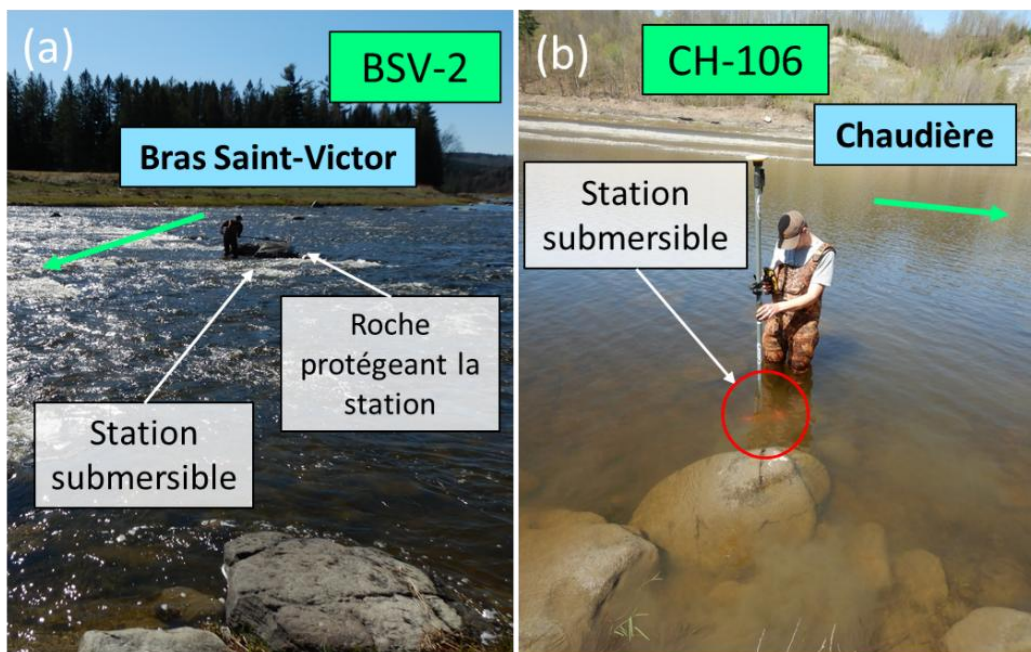


Figure 30. Récupération des instruments dans le bassin versant de la rivière CH au printemps 2022 : (a) station submersible au site BSV-2 et (b) au site CH-106. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

4.2.3.2 *Données hydrométriques et météorologiques*

Pour la saison de la débâcle 2022, les stations 023448 (km 120,5 CH), 023429 (km 102,5 CH) et 023422 (km 6,6 FA) du MELCCFP offrant des données de débit ont à nouveau été utilisées pour cette saison. De plus, les stations virtuelles 0234DL (placée au km 0,4 DL) et 0234BV (placée au km 76,9 CH) ont été recrées à des fins d'analyse. Toutes ces stations ont été exploitées de la même manière que durant la débâcle précédente afin d'obtenir le débit dans la rivière CH à l'amont de chaque confluence (023448 pour DL, 023429 pour FA et 0234BV pour BSV) et dans les rivières DL (0234DL) et FA (023422). La station 023446 (km 102,8 CH) en amont du barrage Sartigan enregistrant des niveaux d'eau a été utilisée pour compléter les informations dans cette section. Les données de niveau d'eau captées au barrage gonflable de la Ville de Saint-Georges (km 97,9 CH) ont également été exploitées pour obtenir de l'information sur l'amont de la confluence FA.

Les données météorologiques des stations de Saint-Georges (7027283) et de Beauceville (7028754) ont à nouveau été utilisées afin d'obtenir les précipitations (pluie et neige) ainsi que l'épaisseur de neige au sol (station Saint-Georges), puis la température de l'air, la vitesse du vent ainsi que la pression atmosphérique (station Beauceville).

4.2.4 Débâcle 2023

4.2.4.1 Instrumentation des sites étudiés

Pour la débâcle 2023, 15 sites ont été étudiés dans le bassin versant de la CH accueillant un total de 12 caméras UL et 15 plateformes submersibles UL. La figure 31 présente les sites étudiés dans le bassin versant de la CH lors de la débâcle 2023 tandis que la figure 32, la figure 33 et la figure 34 présentent l'emplacement des instruments pour chacune des confluences à l'étude ainsi que les éléments géomorphologiques et les structures anthropiques près des confluences. Ces sites sont également superposés au profil d'élévation de leurs rivières respectives à la figure 35. Le tableau 9 présente le détail des instruments à chaque site par confluence.



Figure 31. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 dans le bassin versant de la CH. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement et le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte.

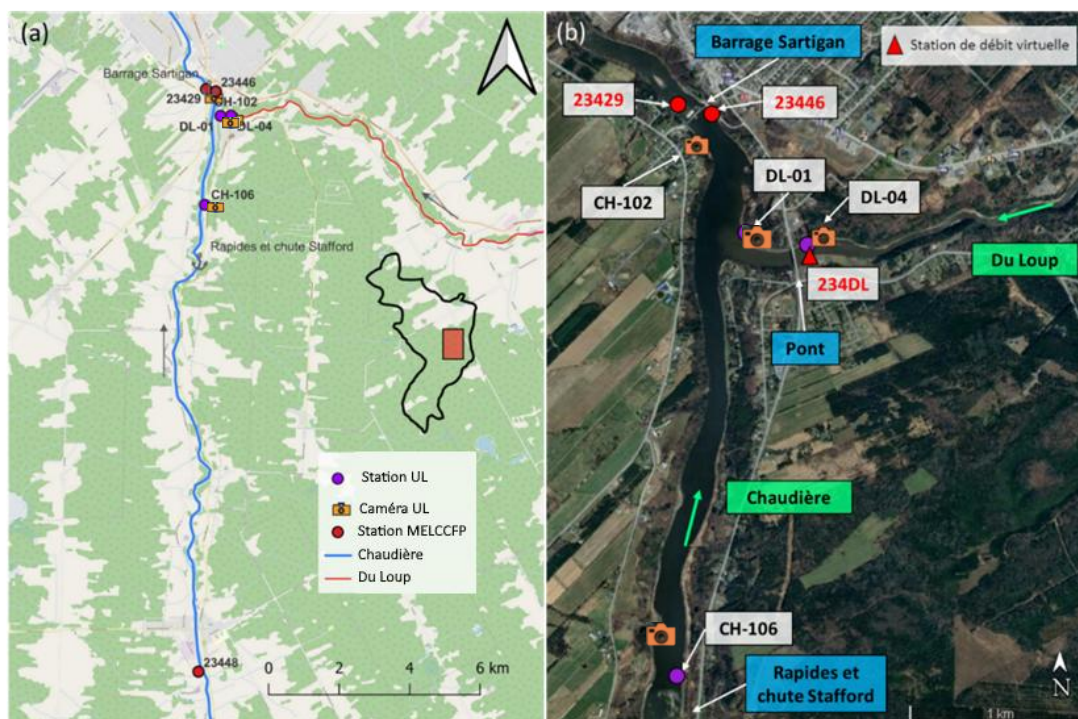


Figure 32. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches vertes et grises indiquent le sens de l'écoulement.

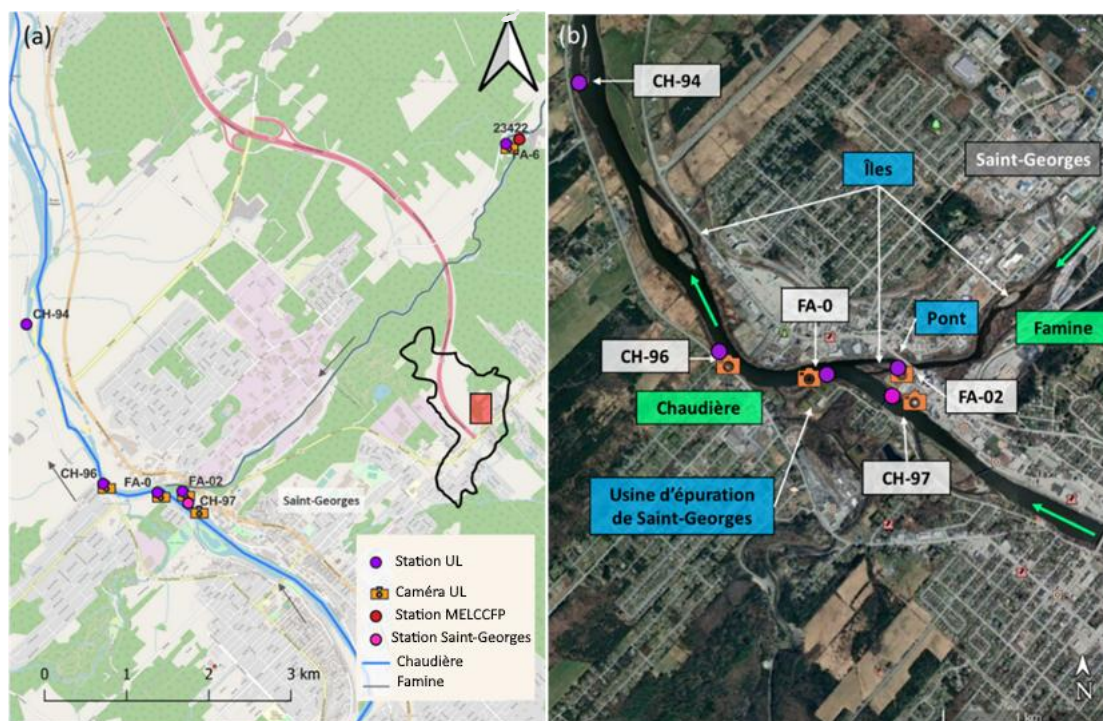


Figure 33. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches indiquent le sens de l'écoulement.

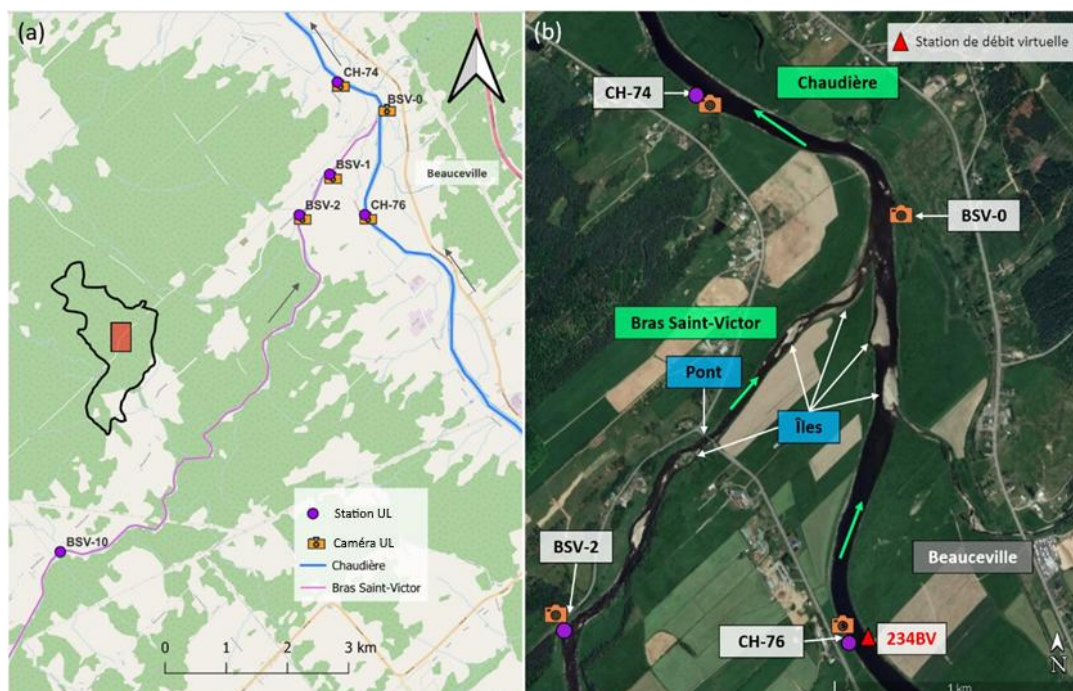


Figure 34. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

Tableau 9. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 dans le bassin versant de la rivière CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.

Point d'observation	Nom du site	Niveau d'eau	Température de l'eau	État de la glace	Débit
Emplacement de la station*		Intervalle	Intervalle	Intervalle	Intervalle
Confluence du Loup					
km 0,4 du Loup	DL-04	15 min	1 min	30 min	-
km 0,1 du Loup	DL-01	15 min	1 min	30 min	1 jour
km 106,0 Chaudière, amont de la confl.	CH-106	15 min	1 min	30 min	1 jour
km 102,7 Chaudière, aval de la confl.	CH-102	15 min	1 min	30 min	-
Confluence Famine					
km 6,6 Famine	FA-6	-	1 min	-	1 jour
km 0,2 Famine	FA-02	15 min	1 min	30 min	-
km 97,9 Chaudière, amont de la confl.	CH-97	-	1 min	30 min	1 jour
km 97,5 Chaudière, à la confl.	FA-0	15 min	1 min	30 min	-
km 96,7 Chaudière, aval de la confl.	CH-96	15 min	1 min	30 min	-
km 94,6 Chaudière, entre FA et BSV	CH-94	15 min	1 min	-	-
Confluence Bras Saint-Victor					
km 10,6 Bras Saint-Victor	BSV-10	15 min	1 min	30 min	-
km 1,2 Bras Saint-Victor	BSV-1	15 min	1 min	30 min	-
km 76,9 Chaudière, amont de la confl.	CH-76	15 min	1 min	-	1 jour
km 75,1 Chaudière, à la confl.	BSV-0	15 min	15 min	30 min	-
km 74,2 Chaudière, aval de la confl.	CH-74	15 min	1 min	30 min	-

*Distance à partir du barrage des Chutes-de-la-Chaudière dans la CH et de la confluence dans les tributaires.

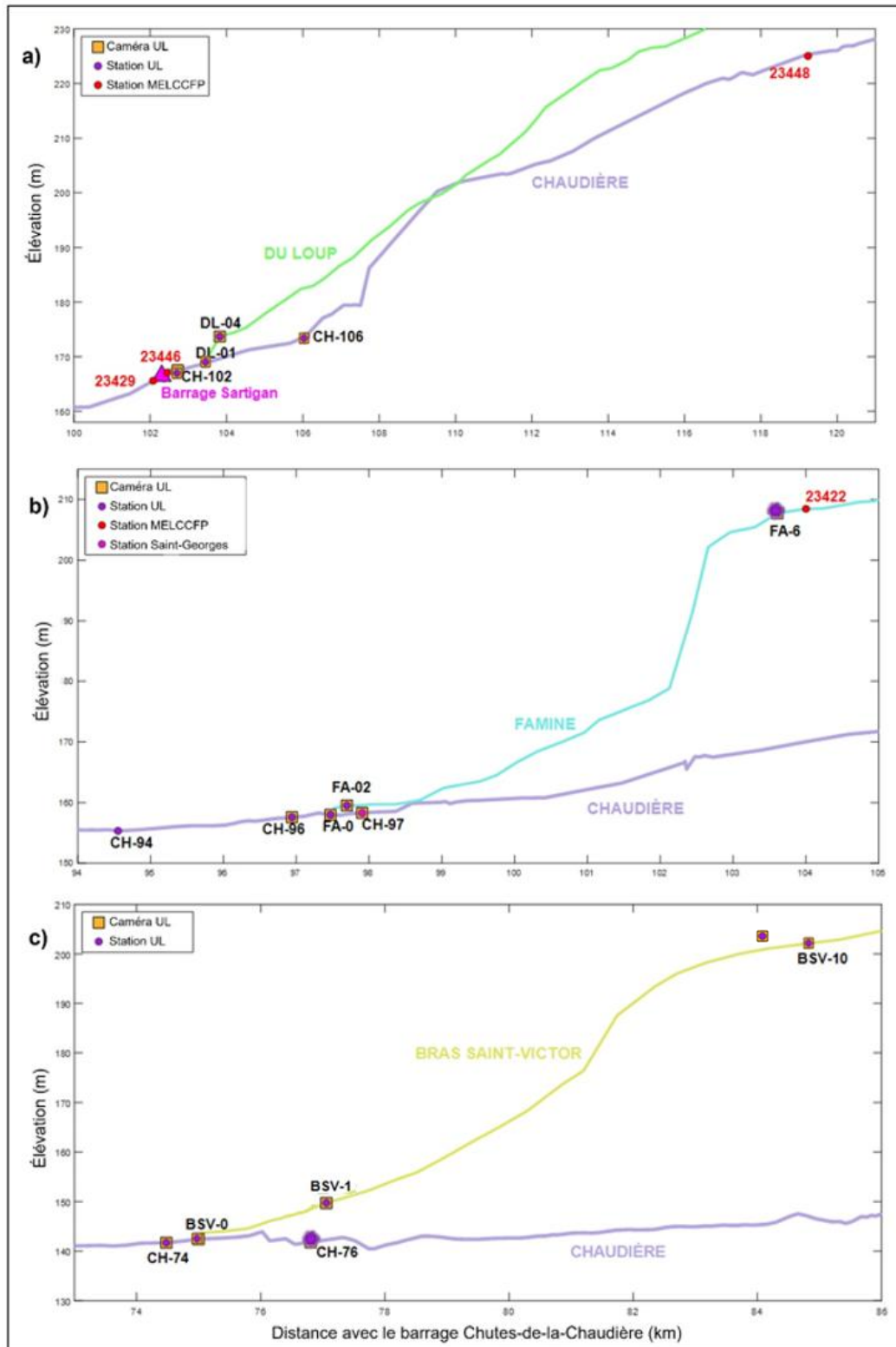


Figure 35. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL, (b) CH et FA, (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2023.

Autour de la confluence DL, quatre stations submersibles UL ont été posées, soit deux dans la rivière principale en amont de la confluence (CH-106) ainsi qu'en aval (CH-102) et deux dans le tributaire (DL-01 et DL-04). De plus, quatre caméras UL ont été installées, deux dans le tributaire (DL-01 et DL-04) et les deux autres dans la CH près du barrage Sartigan (CH-102) et en amont de la confluence (CH-106).

Pour la confluence FA, quatre sites comprenant une station submersible et une caméra UL ont été installés. Trois de ces sites se trouvent dans la rivière principale, soit à la confluence elle-même (FA-0), en amont (CH-97) et en aval de la confluence (CH-96), et un se trouve dans le tributaire (FA-02). Deux plateformes submersibles ont en plus été installées, soit une dans le tributaire (FA-6) et une en aval de la confluence (CH-94) afin d'étudier la dynamique dans la rivière principale entre les deux confluences. Le site FA-6 a été choisi entre autres en raison d'une coupure dans la pente du lit du tributaire qui connaît une forte pente avant ce point puis une pente beaucoup plus faible par la suite. Les données de niveau d'eau du barrage gonflable de la Ville de Saint-Georges (CH-97) ont aussi été utilisées.

Concernant la confluence BSV, quatre sites munis d'une station submersible et d'une caméra UL ont été installés autour de la confluence BSV, soit deux dans la CH, l'une à la confluence et l'autre en aval de la confluence (BSV-0 et CH-74 respectivement), ainsi que deux dans le tributaire (BSV-1 et BSV-10). Le site BSV-10 a été choisi entre autres en raison d'une coupure dans la pente du lit du tributaire qui connaît une forte pente avant ce point puis une pente beaucoup plus faible par la suite. Une plateforme submersible supplémentaire a également été posée en amont de la confluence dans la CH (CH-76).

L'installation des instruments dans le bassin versant de la CH pour la saison 2022-2023 a eu lieu au mois d'octobre 2022, entre le 3 et le 5 octobre inclusivement (figure 36 et figure 37). De plus, un vol de drone a eu lieu en date du 20 janvier 2023.

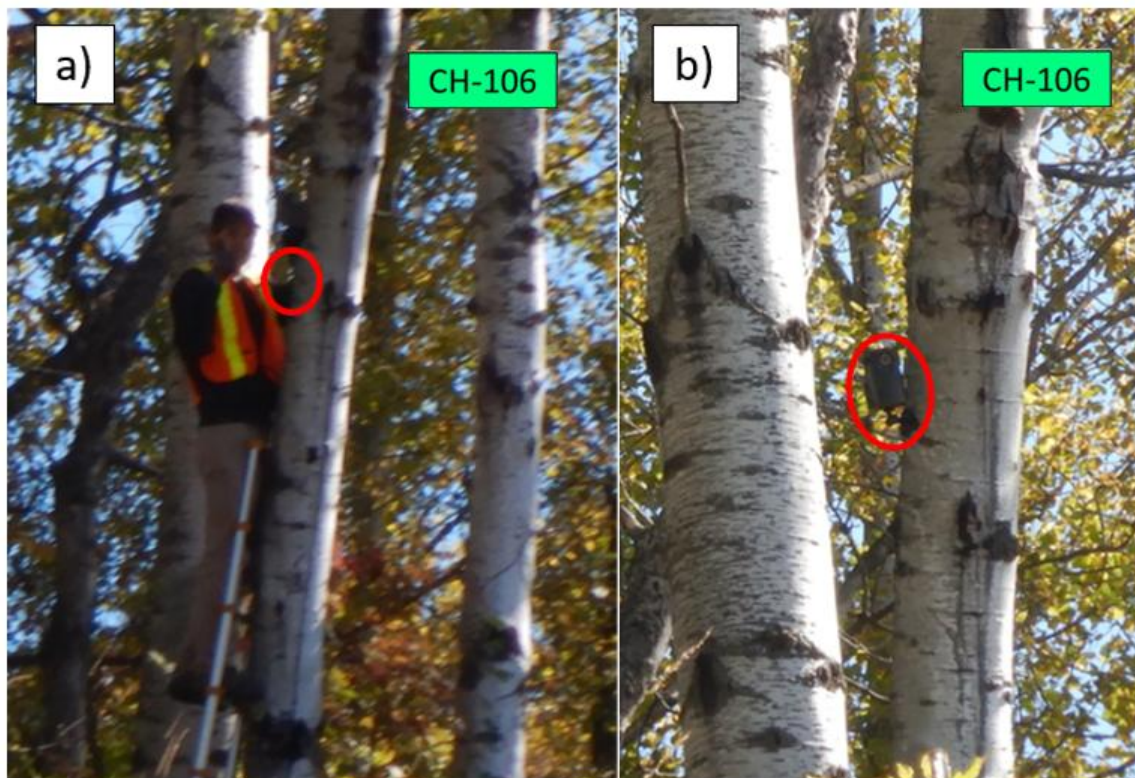


Figure 36. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour la débâcle 2023 : (a) caméra au site CH-106 et (b) caméra au site CH-106.



Figure 37. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière CH pour l'hiver 2022-2023 : (a) emplacement de la station submersible au site CH-106 et (b) station submersible au site FA-0. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

4.2.4.2 *Données hydrométriques et météorologiques*

Pour la saison de la débâcle 2023, les stations Saint-Martin (023448 au km 120,5 CH), Saint-Georges (023429 au km 102,5 CH), Famine (023422 au km 6,6 FA) et Du Loup (023428 au km 12 DL) du MELCCFP, offrant des données de débit, ont été utilisées pour cette saison. De plus, la station virtuelle 0234BV (placée au km 76,9 CH) a été recréée à des fins d'analyse. Toutes ces stations ont été exploitées de la même manière que durant la débâcle précédente afin d'obtenir le débit dans la CH à l'amont de chaque confluence (023448 pour DL, 023429 pour FA et 0234BV pour BSV) et dans les rivières DL (023428) et FA (023422). Enfin, la station 023446 (km 102,8 CH) en amont du barrage Sartigan enregistrant des niveaux d'eau a également été utilisée pour compléter les informations recueillies pour cette section d'étude. Les données de niveau d'eau captées au barrage gonflable de la Ville de Saint-Georges (km 97,9 CH) ont également été exploitées pour obtenir de l'information sur l'amont de la confluence FA.

Les données météorologiques des stations de Saint-Georges (7027283) et de Beauceville (7028754) ont à nouveau été utilisées afin d'obtenir les précipitations (pluie et neige) ainsi que l'épaisseur de neige au sol (station Saint-Georges), puis la température de l'air, la vitesse du vent ainsi que la pression atmosphérique (station Beauceville).

4.2.5 *Débâcle 2024*

4.2.5.1 *Instrumentation des sites étudiés*

Pour la débâcle 2024, 13 sites ont été étudiés dans le bassin versant de la rivière CH accueillant un total de 10 caméras UL et 12 plateformes submersibles UL.

La figure 38 présente les sites étudiés dans le bassin versant de la CH lors de la débâcle 2024. La figure 39, la figure 40 et la figure 41 présentent l'emplacement des instruments pour chacune des confluences à l'étude ainsi que les éléments géomorphologiques et les structures anthropiques près des confluences. Ces sites sont également superposés au profil d'élévation de leurs rivières respectives à la figure 42. Le tableau 10 présente le détail des instruments à chaque site par confluence.

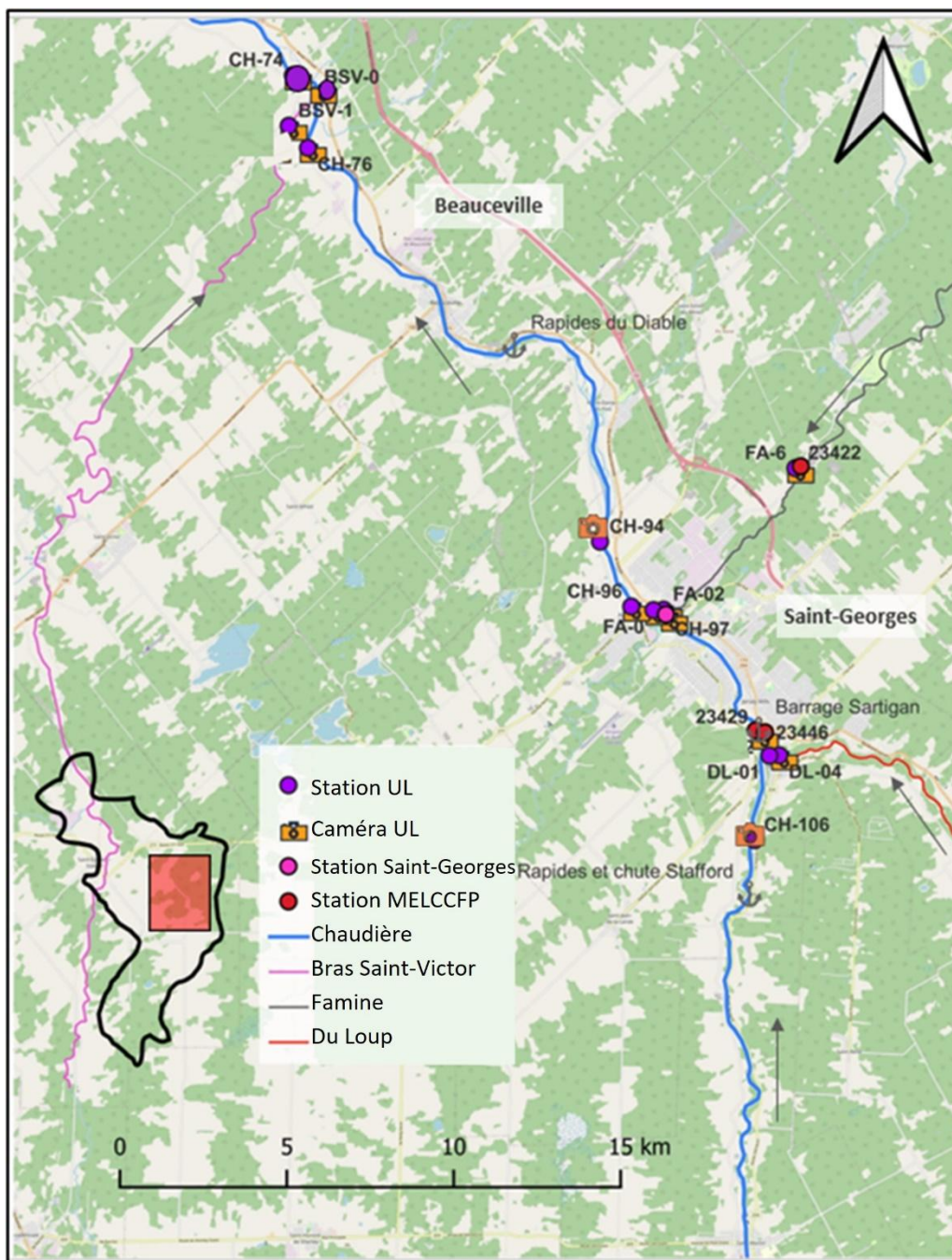


Figure 38. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 dans le bassin versant de la CH. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement et le rectangle rouge dans le tracé du bassin versant représente la partie du bassin montrée par la carte.

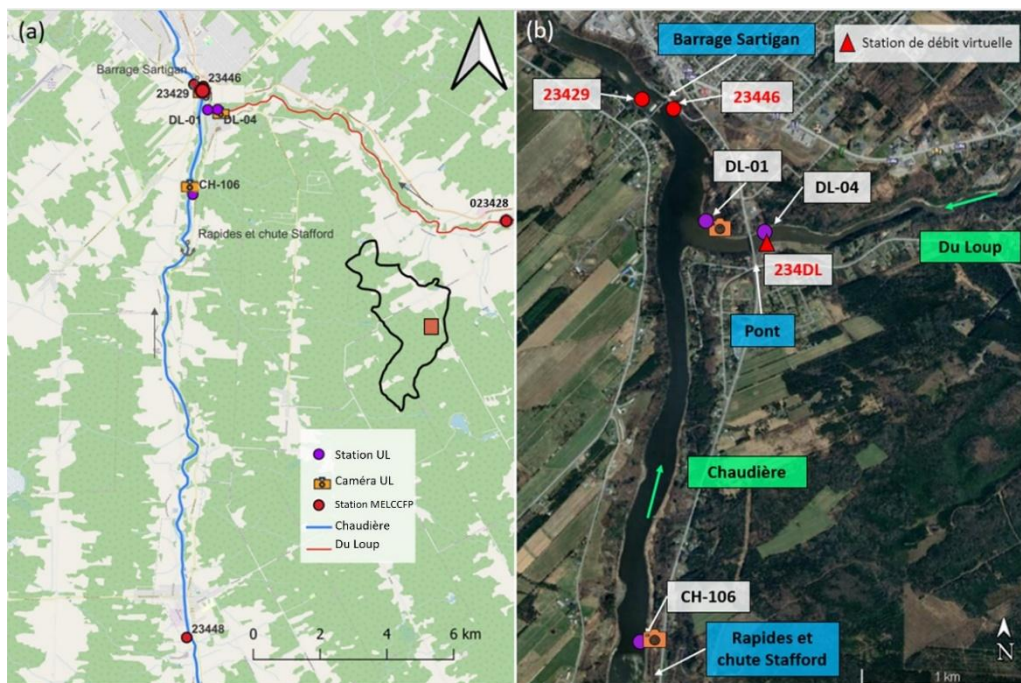


Figure 39. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 à la confluence DL : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

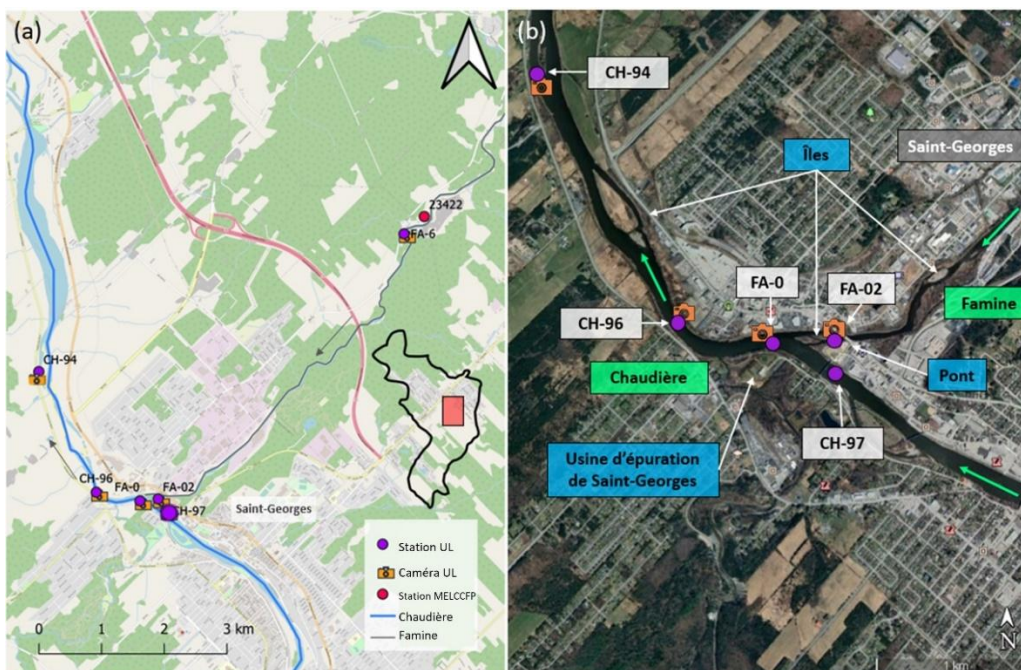


Figure 40. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 à la confluence FA : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

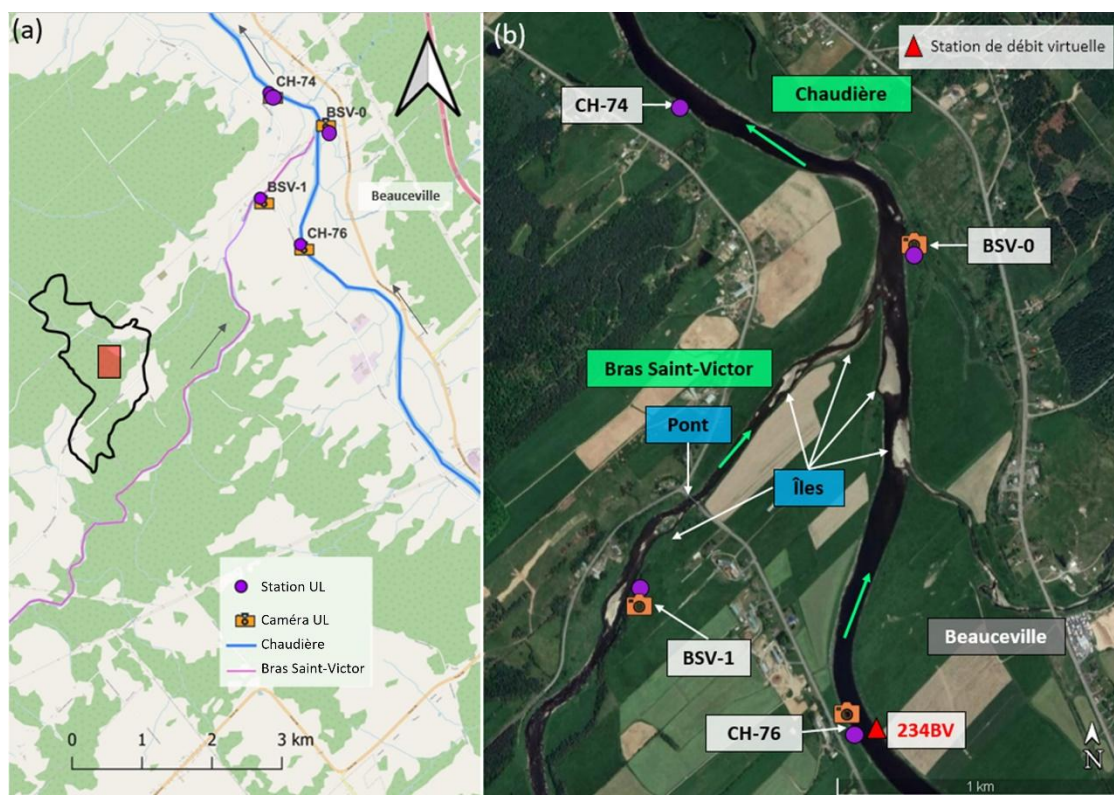


Figure 41. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 à la confluence BSV : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

Tableau 10. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 dans le bassin versant de la rivière CH : localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.

Point d'observation	Nom du site	Niveau d'eau	Température de l'eau	État de la glace	Débit
Emplacement de la station*		Intervalle	Intervalle	Intervalle	Intervalle
Confluence du Loup					
km 0,4 du Loup	DL-04	10 min	1 min	-	-
km 0,1 du Loup	DL-01	10 min	1 min	45 min	1 jour
km 106,0 Chaudière, amont de la confl.	CH-106	-	-	45 min	1 jour
Confluence Famine					
km 6,6 Famine	FA-6	-	1 min	45 min	1 jour
km 0,2 Famine	FA-02	10 min	1 min	45 min	-
km 97,9 Chaudière, amont de la confl.	CH-97	-	1 min	-	1 jour
km 97,5 Chaudière, à la confl.	FA-0	10 min	1 min	45 min	-
km 96,7 Chaudière, aval de la confl.	CH-96	10 min	1 min	45 min	-
km 94,6 Chaudière, entre FA et BSV	CH-94	10 min	1 min	45 min	-
Confluence Bras Saint-Victor					
km 1,2 Bras Saint-Victor	BSV-1	10 min	1 min	45 min	-
km 76,9 Chaudière, amont de la confl.	CH-76	10 min	1 min	45 min	1 jour
km 75,1 Chaudière, à la confl.	BSV-0	10 min	1 min	45 min	-
km 74,2 Chaudière, aval de la confl.	CH-74	10 min	1 min	-	-

*Distance à partir du barrage des Chutes-de-la-Chaudière dans la CH et de la confluence dans les tributaires.

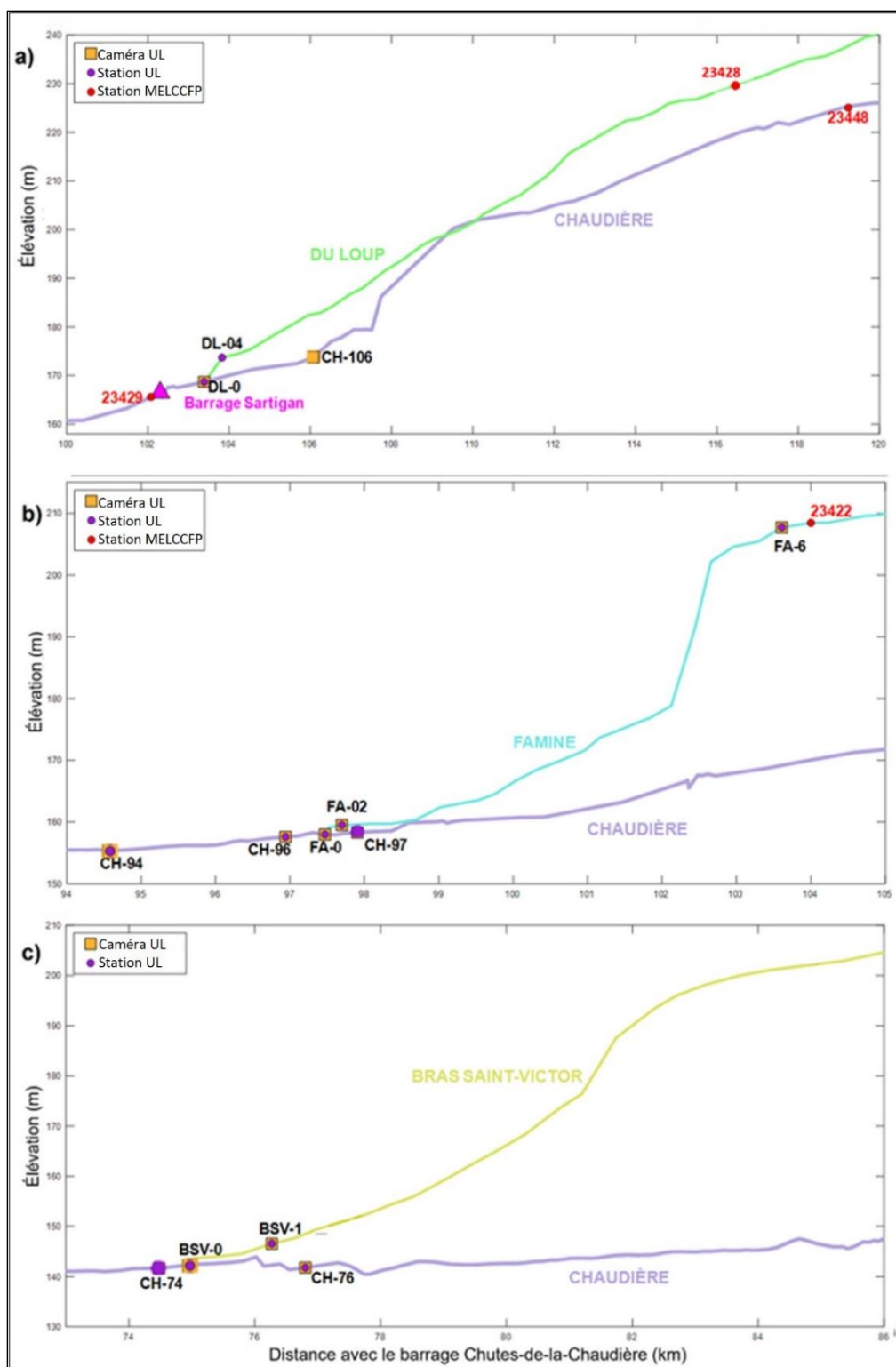


Figure 42. Profils d'élévation des rivières (a) CH et DL; (b) CH et FA; (c) CH et BSV avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2024.

Autour de la confluence DL, deux stations submersibles UL ont été déployées, l'une dans la rivière principale à la confluence (DL-0) et l'autre dans le tributaire (DL-04). De plus, deux caméras UL ont été installées, l'une à la confluence (DL-0) et l'autre dans la CH en amont de la confluence (CH-106).

Pour la confluence FA, cinq sites comprenant une station submersible et une caméra UL ont été aménagés. Trois d'entre eux étaient situés dans la rivière principale : à la confluence (FA-0) et en aval (CH-96 et CH-94). Les deux autres se trouvaient dans le tributaire (FA-02 et FA-6). Le site FA-6 a été retenu en raison d'une rupture de pente dans le lit du tributaire, où la pente est marquée avant de s'adoucir considérablement. Le site CH-94, quant à lui, permet d'étudier la dynamique de la rivière principale entre les deux confluences. Une plateforme submersible supplémentaire a été ajoutée dans la CH en amont de la confluence (CH-97), à proximité du barrage gonflable de la Ville de Saint-Georges, dont les données de niveau d'eau sont exploitées.

Pour la confluence BSV, trois sites comprenant une station submersible et une caméra UL ont été mis en place : deux dans la CH, à la confluence (BSV-0) et en amont (CH-76), ainsi qu'un dans le tributaire (BSV-1). Une plateforme submersible additionnelle a également été installée en aval de la confluence dans la CH (CH-74).

L'installation des instruments a eu lieu les 2 et 3 octobre 2023 (figure 43). Leur récupération s'est déroulée les 22 et 23 juillet 2024 (figure 44). En complément, des vols de drone ont été réalisés le 21 décembre 2023 et le 5 mars 2024.



Figure 43. Installation d'une caméra dans le bassin versant de la rivière CH pour étudier la débâcle 2024.

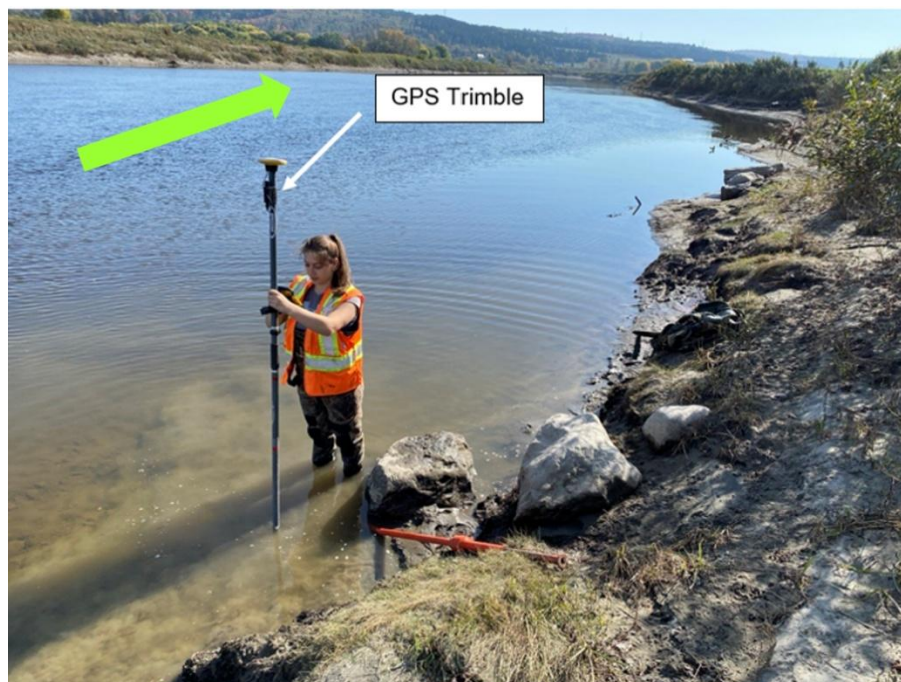


Figure 44. Mesure de l'emplacement optimal d'une plateforme submersible avant son installation dans le bassin versant de la rivière CH pour la saison hivernale 2023-2024. La flèche verte indique le sens de l'écoulement.

4.2.5.2 Données hydrométriques et météorologiques

Pour la débâcle 2024, les stations Saint-Martin (023448 au km 120,5 CH), Saint-Georges (023429 au km 102,5 CH), Famine (023422 au km 6,6 FA) et Du Loup (023428 au km 12 DL) du MELCCFP, fournissant des données de débit, ont été utilisées. De plus, la station virtuelle 0234BV (située au km 76,9 CH) a été recrée à des fins d'analyse.

Toutes ces stations ont été exploitées de la même manière que pour la débâcle précédente afin d'obtenir les débits dans la CH en amont de chaque confluence (023448 pour DL, 023429 pour FA et 0234BV pour BSV) et dans les rivières DL (023428) et FA (023422). Enfin, la station Barrage Sartigan (023446 au km 102,8 CH) en amont du barrage Sartigan, enregistrant les niveaux d'eau, a également été utilisée pour compléter les données recueillies pour cette section d'étude. Les données de niveau d'eau captées au barrage gonflable de la Ville de Saint-Georges (km 97,9 CH) ont aussi été utilisées pour obtenir des informations sur l'amont de la confluence FA.

Les stations Saint-Georges (7027283) et Beauceville (7028754) ont une fois de plus été utilisées pour obtenir des données météorologiques. Elles ont fourni des informations sur les précipitations (pluie et neige) et l'épaisseur de neige au sol à Saint-Georges, ainsi que des données sur la température de l'air, la vitesse du vent et la pression atmosphérique à Beauceville.

4.3 Bassin versant de la rivière Sainte-Anne

Cette section présente les sites étudiés pour la confluence BDN dans le bassin versant de la rivière STA. Celle-ci a été étudiée durant quatre saisons hivernales, soit 2020-2021 à 2023-2024.

4.3.1 Débâcle 2021

4.3.1.1 Instrumentation des sites étudiés

Pour la débâcle 2021, cinq caméras et deux stations submersibles UL ont été installées autour de la confluence BDN. Trois caméras ont été posées dans la rivière principale, soit en amont de la confluence (STA-20), à la confluence elle-même (BDN-0) et en aval de la confluence (STA-0), et deux caméras ont été installées dans le tributaire (BDN-1 et BDN-5). Les stations submersibles se trouvent à la confluence elle-même dans la STA (BDN-0) et dans le tributaire (BDN-1). Les données de la Ville de Saint-Raymond, récoltées dans la STA aux km 5,2 et 6,2 (caméras) et au km 20,3 (station hydrométrique), ont également été utilisées. Finalement, un capteur de température de l'air a été installé dans le tributaire étudié.

La figure 45 présente l'emplacement des instruments à la confluence BDN pour la débâcle 2021 ainsi que les éléments géomorphologiques et les structures anthropiques près de la confluence. Ces sites sont également superposés au profil d'élévation de leurs rivières respectives à la figure 46. Le tableau 11 présente le détail des instruments à chaque site à la confluence BDN.

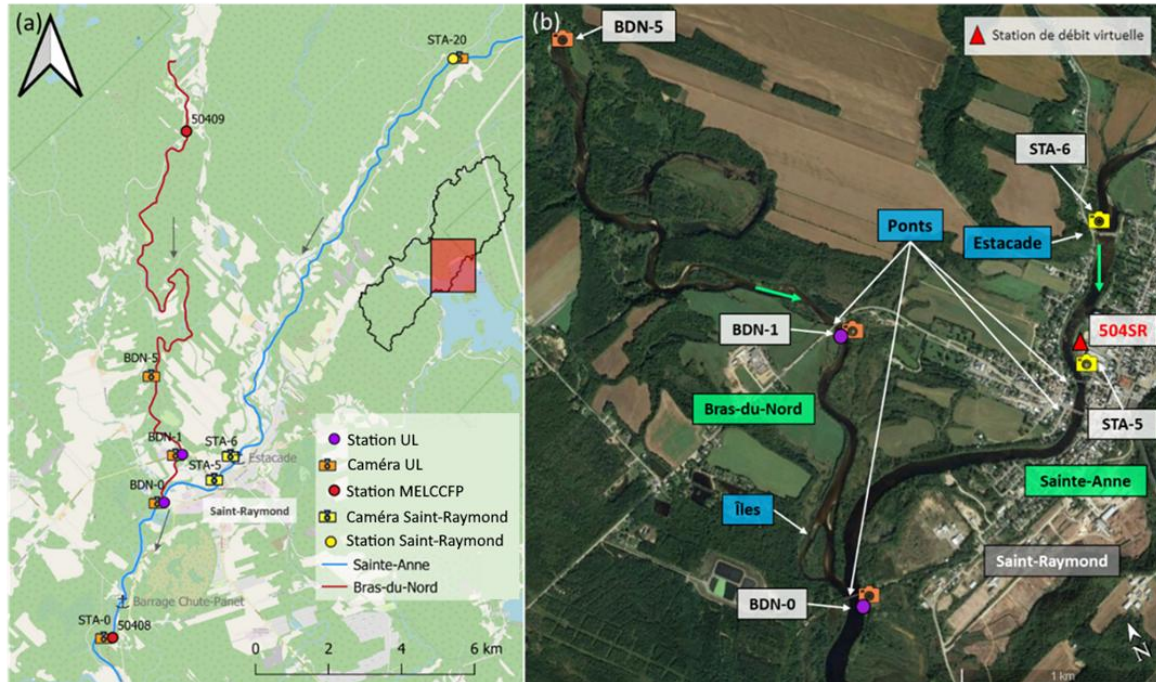


Figure 45. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière STA pour la confluence BDN : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement.

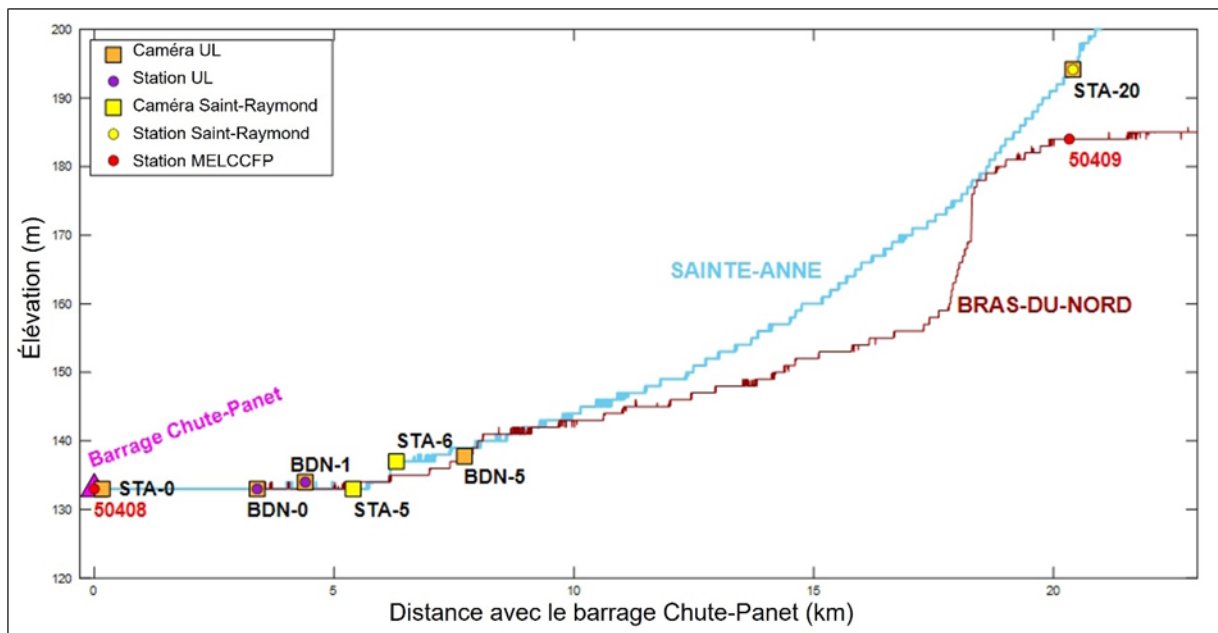


Figure 46. Profils d'élévation des rivières STA et BDN (adapté du travail de Thomas Simard-Robitaille, 2021) avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2021.

Tableau 11. Sites étudiés lors de la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière STA: localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.

Point d'observation	Nom du site	Niveau d'eau	Température de l'eau	État de la glace	Débit
Emplacement de la station*		Intervalle	Intervalle	Intervalle	Intervalle
km 5,1 Bras-du-Nord	BDN-5	-	-	30 min	1 jour
km 1,7 Bras-du-Nord	BDN-1	10 min	1 min	30 min	-
km 20,7 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-20	5 min	5 min	60 min	-
km 6,2 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-6	-	-	120 min	-
km 5,2 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-5	-	-	20-60 min	1 jour
km 3,3 Sainte-Anne, à la confl.	BDN-0	10 min	1 min	30 min	-
km 0 Sainte-Anne, aval de la confl.	STA-0	-	-	30 min	1 jour

*À partir de la confluence pour BDN et à partir du BCP pour la STA.

L'installation des instruments dans le bassin versant de la STA pour la saison 2020-2021 a eu lieu les 16 et 27 octobre 2020 (figure 47). Leur récupération s'est déroulée les 22 et 23 avril 2021.

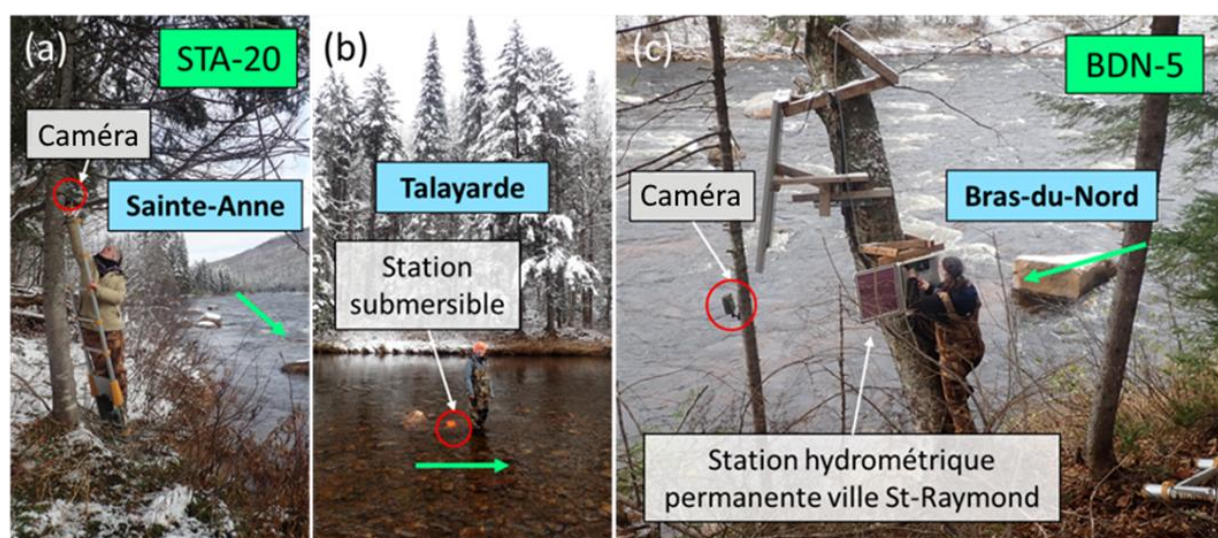


Figure 47. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière STA pour l'hiver 2020-2021 : (a) caméra au site STA-20; (b) station submersible dans la rivière Talayarde (données inutilisables); et (c) entretien de la station permanente BDN km 7,7 de la Ville de Saint-Raymond. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

4.3.1.2 Données hydrométriques et météorologiques

Pour la saison de la débâcle 2021, les données de trois stations opérées par la Ville de Saint-Raymond ont été utilisées pour obtenir de l'information sur l'amont de la confluence BDN dans la STA. Les stations km 5,2 et km 6,2 ont fourni des images du couvert de glace et la station km 20,3 a fourni des données de température et de pression d'eau, dans la rivière principale.

Le MELCCFP opère deux stations pertinentes dans le bassin versant de la STA qui offrent des données de débit sur les rivières STA à 1,3 km en aval du BCP (050408) et BDN au km 16,5 (050409). La station 050409 a été utilisée pour connaître le débit dans le tributaire (BDN) et la station 050408 pour connaître le débit en aval de la confluence dans la rivière principale (STA). Enfin, une station virtuelle nommée « 0504SR » (placée au km 5,2 STA) a été créée en soustrayant le débit de la station 050409 à celui de la station 050408 à l'aval de la confluence afin d'obtenir le débit sur la STA en amont de la confluence BDN. Cette station fictive a été construite sous l'hypothèse que le BCP a maintenu le même nombre de vannes ouvertes durant la période étudiée et donc qu'un débit quotidien constant a traversé la structure hydraulique durant la débâcle.

Les données météorologiques des stations de Sainte-Christine (7017000) exploitée par le MELCCFP ont aussi été utilisées pour obtenir les précipitations (pluie et neige) et l'épaisseur de neige au sol. De plus, deux stations opérées par la Ville de Saint-Raymond (km 6,2 et km 13,5) ont servi à obtenir des données de pression atmosphérique et de température de l'air.

4.3.2 Débâcle 2022

4.3.2.1 Instrumentation des sites étudiés

Pour la débâcle 2022, sept sites ont été étudiés dans le bassin versant de la STA. Ceux-ci accueillaient un total de six caméras et deux plateformes submersibles appartenant à la Ville de Saint-Raymond (figure 48 et tableau 12). À des fins d'analyse, la caméra située dans la rivière STA à la confluence a été divisée en deux sites (STA-3 et BDN-01) pour que les processus ayant lieu dans le tributaire et dans la rivière principale puissent être différenciés. L'UL n'a installé aucun instrument pour mesurer les niveaux et la température de l'eau dans le bassin versant de la STA pour la débâcle 2022, car le système de surveillance de la Ville de Saint-Raymond couvre bien le territoire étudié. Toutefois, en raison de dysfonctionnements du système de surveillance de la Ville dans plusieurs stations hydrométriques, seuls deux sites, soit le tributaire (BDN-5) et la rivière principale (BDN-0), ont récolté des données par rapport au niveau et à la température de l'eau.

La figure 48 présente l'emplacement des instruments à la confluence BDN pour la débâcle 2022 ainsi que les éléments géomorphologiques et les structures anthropiques près de la confluence. Ces sites sont également superposés au profil d'élévation de leurs rivières respectives à la figure 49. Le tableau 12 présente le détail des instruments à chaque site par confluence.

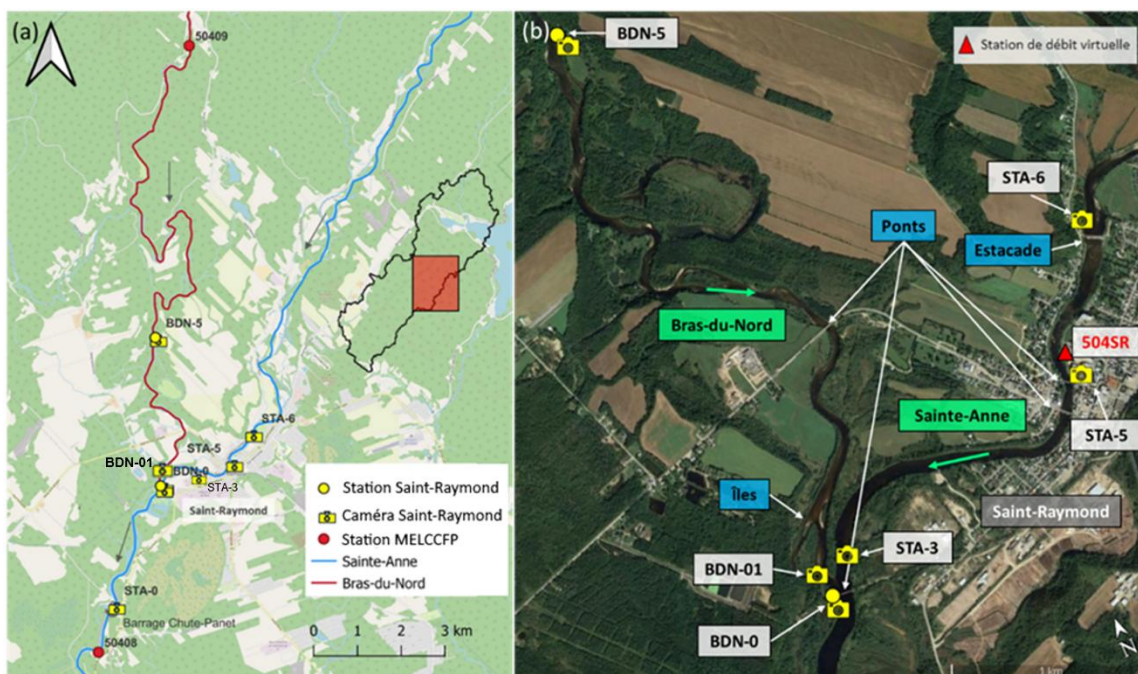


Figure 48. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière STA pour la confluence BDN : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises indiquent le sens de l'écoulement.

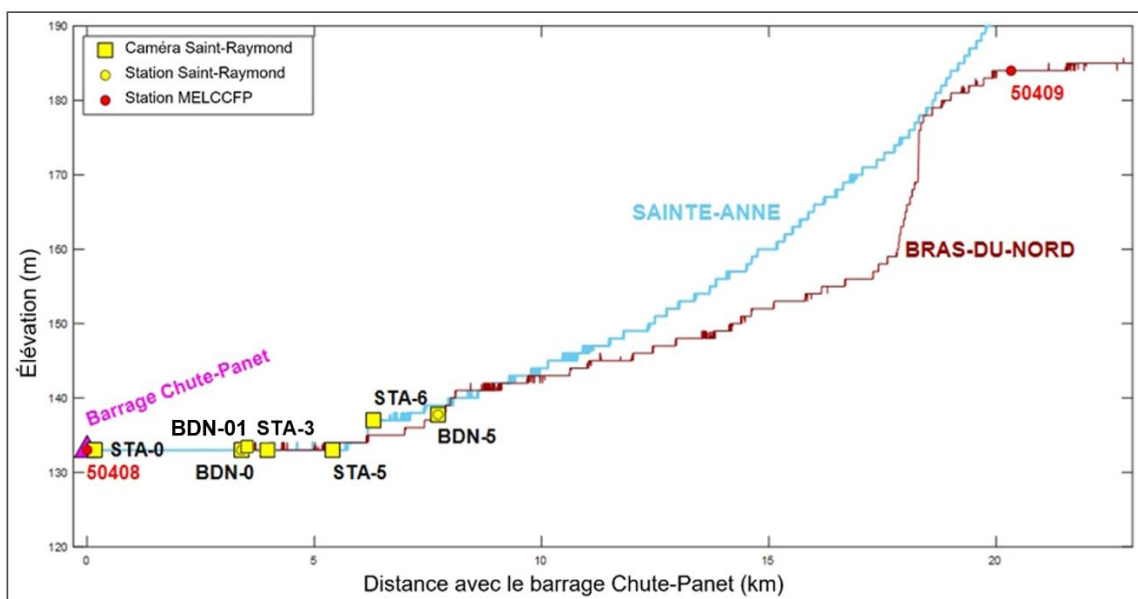


Figure 49. Profils d'élévation des rivières STA et BDN avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2022 (adapté de Simard-Robitaille, 2021).

Tableau 12. Sites étudiés lors de la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière STA: localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.

Point d'observation Emplacement de la station*	Nom du site	Niveau d'eau Intervalle	Température de l'eau Intervalle	État de la glace Intervalle	Débit Intervalle
km 5,1 Bras-du-Nord	BDN-5	5 min	5 min	60-120 min	1 jour
km 6,2 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-6	-	-	30-60 min	-
km 5,2 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-5	-	-	60 min	1 jour
km 3,6 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-3	-	-	60 min	-
km 0,1 Bras-du-Nord	BDN-01	-	-	60 min	-
km 3,3 Sainte-Anne, à la confl.	BDN-0	5 min	5 min	60 min	-
km 0 Sainte-Anne, aval de la confl.	STA-0	-	-	60 min	1 jour

*À partir de la confluence avec la STA pour BDN et à partir du BCP pour la STA.

L'installation de deux stations permanentes supplémentaires a été effectuée le 21 et le 23 octobre 2021 par l'équipe de l'UL (figure 50).

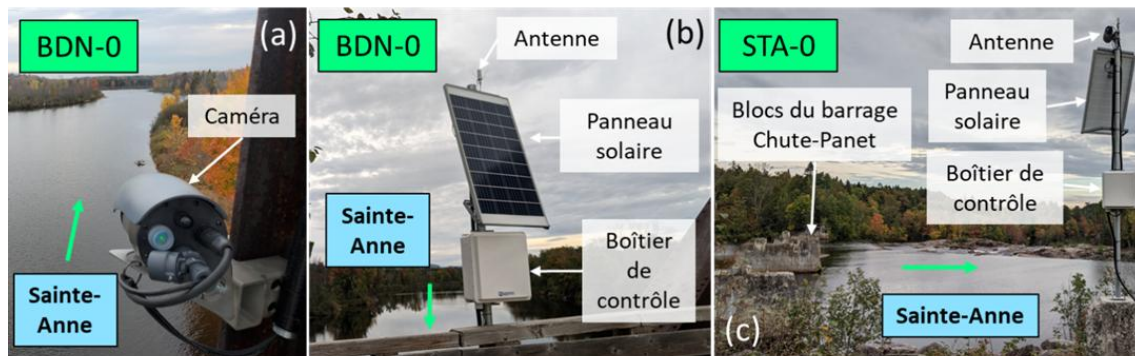


Figure 50. Installation de deux stations hydrométriques permanentes dans la rivière Sainte-Anne: (a) caméra au pont du parc riverain (BDN-0); (b) station hydrométrique au pont du parc riverain (BDN-0) et (c) station hydrométrique au barrage Chute-Panet (STA-0).

4.3.2.2 Données hydrométriques et météorologiques

Pour la saison de la débâcle 2022, les données du système de surveillance de la Ville de Saint-Raymond ont été utilisées pour obtenir de l'information sur toutes les zones de la confluence BDN. Les images de caméras dans la STA, soit les stations Chute-Panet (km 0), Pont du parc riverain de la vélopiste Jacques-Cartier/Portneuf (pont du parc riverain au km 3,3), km 5,2 et km 6,2, ainsi que les images dans la BDN, soit la station km 7,7, ont été utilisées afin d'étudier l'état du couvert de glace. Les stations hydrométriques km 7,7 (BDN) et pont du parc riverain (km 3,3 STA) ont quant à elles fourni des données de température et de pression d'eau.

Les données de certaines stations du MELCCFP offrant des données de débit ont à nouveau été utilisées pour cette saison, soit les stations 050408 (1,3 km en aval du BCP) et 050409 (km 16,5 BDN). De plus, la station virtuelle 0504SR (placée au km 5,2 STA) a

été recréée à des fins d'analyse. Toutes ces stations ont été exploitées de la même manière que durant la débâcle précédente afin d'obtenir le débit à l'amont de la confluence (0504SR), à l'aval de la confluence (050408) et dans le tributaire (050409).

Les données météorologiques des stations de Sainte-Christine (7017000) ont à nouveau été utilisées pour obtenir les précipitations (pluie et neige) et l'épaisseur de neige au sol, en plus de la température de l'air. De plus, la station km 6,2 opérée par la Ville de Saint-Raymond a servi à obtenir des données de pression atmosphérique.

4.3.3 Débâcle 2023

4.3.3.1 Instrumentation des sites étudiés

Pour la débâcle 2023, six sites ont été étudiés dans le bassin versant de la STA. Ceux-ci accueilleraient un total de trois caméras UL et six plateformes submersibles UL. De plus, une sonde de pression atmosphérique a été installée dans le garage municipal de la Ville de Saint-Raymond. Étant donné les difficultés avec les stations permanentes de la Ville de Saint-Raymond lors de la saison précédente, il a été décidé de travailler de la manière la plus autonome possible, c'est-à-dire avec les instruments déployés par l'UL uniquement.

La figure 51 présente l'emplacement des instruments à la confluence BDN pour la débâcle 2023 ainsi que les éléments géomorphologiques et les structures anthropiques près de la confluence. Ces sites sont également superposés au profil d'élévation de leurs rivières respectives à la figure 52. Le

tableau 13 présente le détail des instruments à chaque site par confluence.

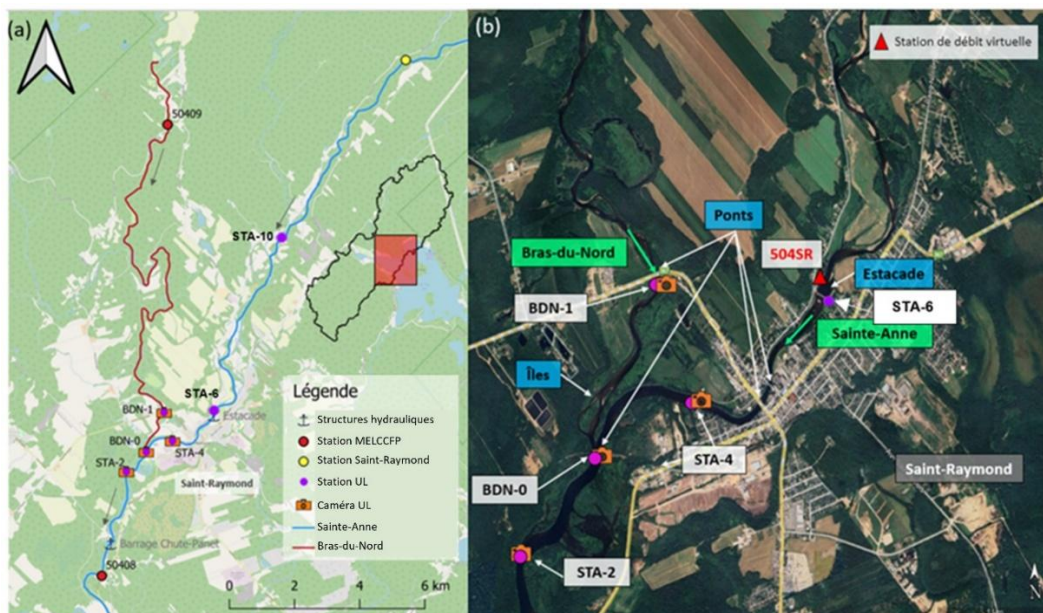


Figure 51. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 dans le bassin versant de la rivière STA pour la confluence BDN : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

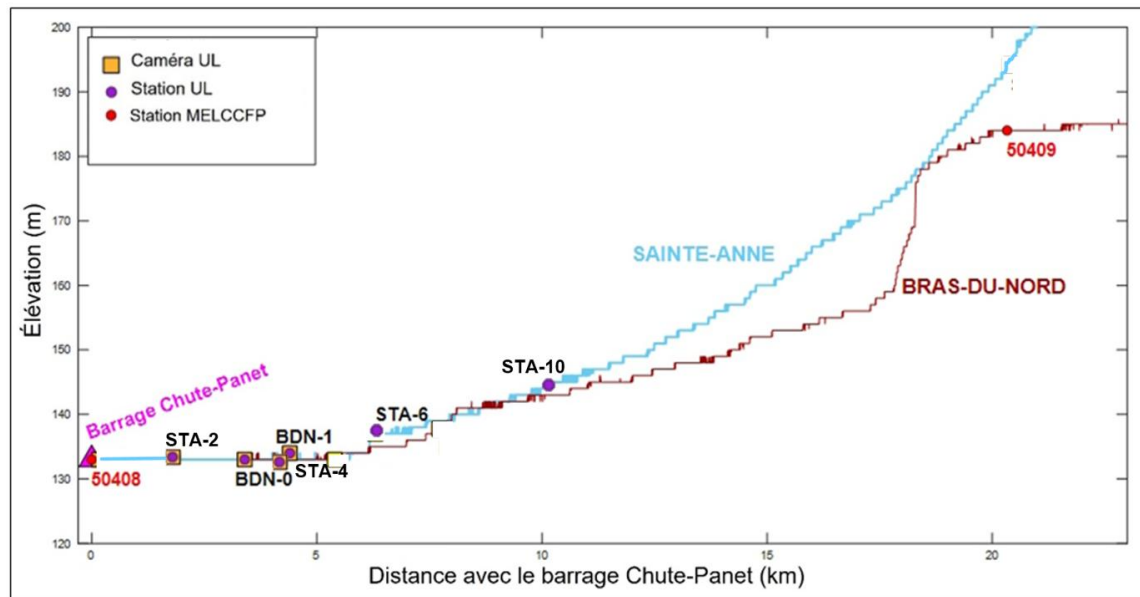


Figure 52. Profils d'élévation des rivières STA et BDN (adapté du travail de Thomas Simard-Robitaille, 2021) avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2023.

Tableau 13. Sites étudiés lors de la débâcle 2023 dans le bassin versant de la rivière STA: localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.

Point d'observation	Nom du site	Niveau d'eau	Température de l'eau	État de la glace	Débit
Emplacement de la station*		Intervalle	Intervalle	Intervalle	Intervalle
km 1,5 Bras-du-Nord	BDN-1	15 min	1 min	60 min	1 jour
km 4,4 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-4	15 min	1 min	60 min	1 jour
km 3,3 Sainte-Anne, à la confl.	BDN-0	15 min	1 min	60 min	-
km 2,5 Sainte-Anne, aval de la confl.	STA-2	15 min	1 min	60 min	1 jour
km 6,2 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-6	15 min	1 min	-	-
km 10 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-10	15 min	1 min	-	-

*À partir de la confluence avec STA pour BDN et à partir du BCP pour la STA.

L'installation des instruments dans le bassin versant de la STA pour la saison 2022-2023 a eu lieu le 30 septembre 2022 (figure 53).



Figure 53. Installation des instruments dans le bassin versant de la rivière STA pour l'hiver 2022-2023 : (a) emplacement de la caméra (derrière l'arbre) au site BDN-0; (b) emplacement de la station submersible au site BDN-0. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

4.3.3.2 Données hydrométriques et météorologiques

Le MELCCFP opère deux stations pertinentes dans le bassin versant de la STA qui offrent des données de débit sur les rivières STA à 1,3 km en aval du BCP (050408) et BDN au km 16,5 (050409). La station 050409 a été utilisée pour connaître le débit dans le tributaire et la station 050408 pour connaître le débit en aval de la confluence dans la rivière principale. Enfin, une station virtuelle nommée « 0504SR » (placée au km 4,4 STA) a été créée en soustrayant le débit de la station 050409 BDN à celui de la station 050408 à l'aval de la confluence afin d'obtenir le débit de la STA en amont de la confluence BDN. Cette station fictive a été construite sous l'hypothèse que le BCP a maintenu le même nombre de vannes ouvertes durant la période étudiée et donc qu'un débit quotidien constant a traversé la structure hydraulique durant la débâcle.

Les données météorologiques de la station de Sainte-Christine (7017000) exploitée par le MELCCFP ont été utilisées pour obtenir les précipitations (pluie et neige) et l'épaisseur de la neige au sol. De plus, la station ISAINTE3307, située au garage municipal et opérée par la Ville de Saint-Raymond, a permis de recueillir des données de pression atmosphérique et de température de l'air.

4.3.4 Débâcle 2024

4.3.4.1 Instrumentation des sites étudiés

Pour la débâcle 2024, six sites ont été étudiés dans le bassin versant de la STA. Ceux-ci accueillaient un total de quatre caméras UL et six plateformes submersibles UL.

La figure 54 présente l'emplacement des instruments à la confluence BDN pour la débâcle 2024 ainsi que les éléments géomorphologiques et les structures anthropiques près de la confluence. Ces sites sont également superposés au profil d'élévation de leurs rivières respectives à la figure 55. Le tableau 14 présente le détail des instruments à chaque site par confluence.

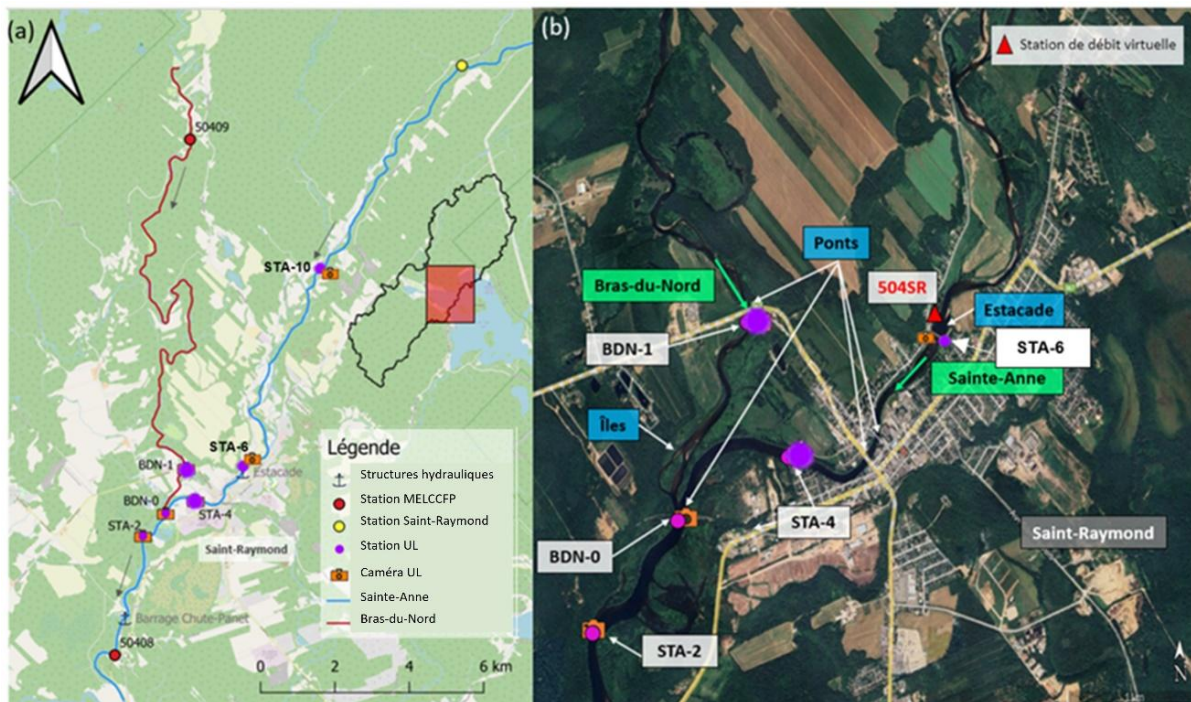


Figure 54. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 dans le bassin versant de la rivière STA pour la confluence BDN : (a) vue d'ensemble des sites et (b) image satellite de la confluence. Les flèches grises et vertes indiquent le sens de l'écoulement.

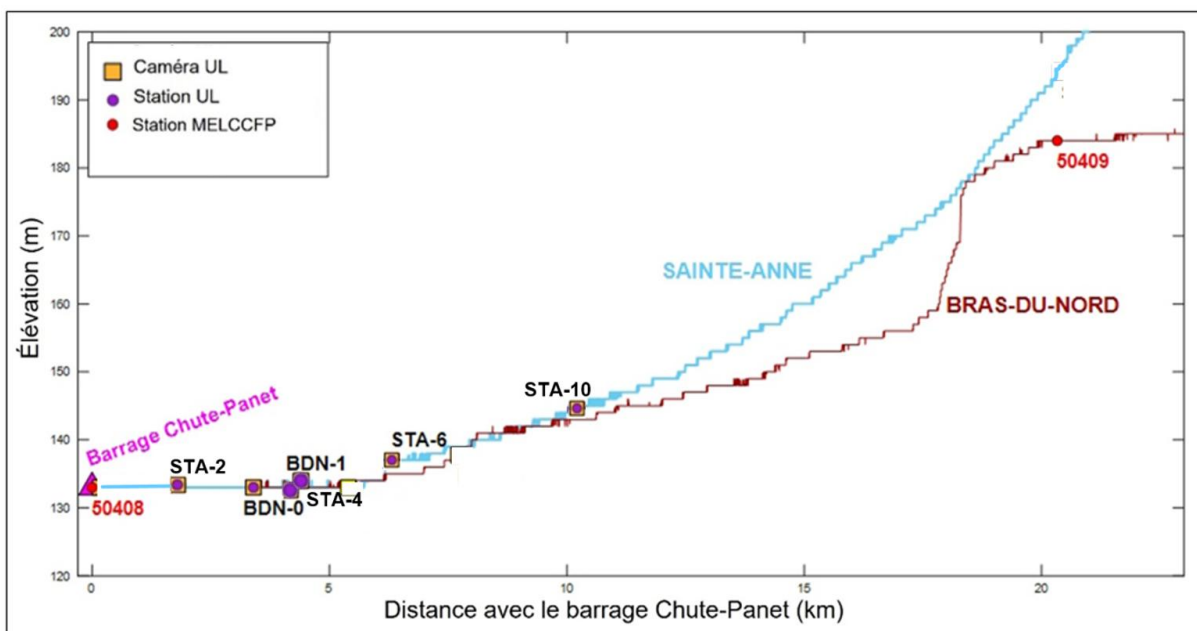


Figure 55. Profils d'élévation des rivières STA et BDN (adapté du travail de Thomas Simard-Robitaille, 2021) avec marqueurs aux sites étudiés pour la débâcle 2024.

Tableau 14. Sites étudiés lors de la débâcle 2024 dans le bassin versant de la rivière STA: localisation et identification des sites et intervalle d'enregistrement des instruments.

Point d'observation	Nom du site	Niveau d'eau	Température de l'eau	État de la glace	Débit
Emplacement de la station*		Intervalle	Intervalle	Intervalle	Intervalle
km 1,5 Bras-du-Nord	BDN-1	15 min	1 min	-	1 jour
km 4,4 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-4	15 min	1 min	-	1 jour
km 3,3 Sainte-Anne, à la confl.	BDN-0	15 min	1 min	45 min	-
km 2,5 Sainte-Anne, aval de la confl.	STA-2	15 min	1 min	45 min	1 jour
km 6,2 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-6	15 min	1 min	45 min	-
km 10 Sainte-Anne, amont de la confl.	STA-10	15 min	1 min	45 min	-

*À partir de la confluence avec STA pour BDN et à partir du BCP pour la STA.

L'installation des instruments dans le bassin versant de la STA pour la saison 2023-2024 a eu lieu les 2 et 3 octobre 2023. Leur récupération s'est déroulée le 8 août 2024 (figure 56).



Figure 56. Récupération des instruments dans le bassin versant de la rivière STA pour l'hiver 2023-2024 : Plateforme submersible en aval de l'estacade à STA-6. La flèche verte indique le sens de l'écoulement.

4.3.4.2 Données hydrométriques et météorologiques

Le MELCCFP opère deux stations pertinentes dans le bassin versant de la STA qui offrent des données de débit sur les rivières STA à 1,3 km en aval du BCP (050408) et BDN au km 16,5 (050409). La station 050409 a été utilisée pour connaître le débit dans le tributaire et la station 050408 pour connaître le débit en aval de la confluence dans la rivière principale. Enfin, une station virtuelle nommée « 0504SR » (placée au km 4,4 STA) a été créée en soustrayant le débit de la station 050409 BDN à celui de la station 050408 à l'aval de la confluence afin d'obtenir le débit de la STA en amont de la confluence BDN. Cette station fictive a été construite sous l'hypothèse que le BCP a maintenu le même nombre de vannes ouvertes durant la période étudiée et donc qu'un débit quotidien constant a traversé la structure hydraulique durant la débâcle.

Les données météorologiques de la station de Sainte-Christine (7017000) exploitée par le MELCCFP ont été utilisées pour obtenir les précipitations (pluie et neige) et l'épaisseur de neige au sol. De plus, la station ISAIN3307 située au garage municipal et opérée par la Ville de Saint-Raymond a servi à obtenir des données de pression atmosphérique et de température de l'air.

5 Résultats

Cette section présente l'analyse des résultats des débâcles de 2020 à 2024 de la rivière CH et des débâcles de 2021 à 2024 de la rivière STA. Les périodes de débâcles des bassins versants des rivières CH et STA pour chaque année sont présentées au Tableau 15.

Tableau 15. Périodes de débâcle des bassins versants des rivières CH et STA pour chaque année de la période d'étude

Année	Période de débâcle -CH	Période de débâcle - STA
2020	2 mars – 6 avril	-
2021	11 mars – 1 ^{er} avril	21 mars – 9 avril
2022	18 mars – 11 avril	20 mars – 18 avril
2023	11 mars – 19 avril	15 mars – 18 avril
2024	5 mars – 26 avril	30 mars – 4 avril

5.1 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques incluant la température de l'air, les précipitations totales, la neige au sol et les degrés-jours de dégel cumulatifs au-dessus de -5 °C (DJDC-5) sont présentées pour chaque saison. Les DJDC-5 permettent de quantifier l'accumulation de chaleur au cours d'une période où la température de l'air dépasse -5 °C. Cette mesure donne une idée de l'intensité et de la durée du dégel pour la période observée. Pour calculer les DJDC-5, la température moyenne quotidienne est observée. Chaque jour où cette température est supérieure à -5 °C, la différence entre cette température et le seuil de -5 °C est enregistrée. Ces différences sont ensuite cumulées sur la période d'intérêt pour obtenir les degrés-jours de dégel cumulatifs (°C.J).

5.1.1 Bassin versant de la rivière Chaudière

5.1.1.1 Débâcle 2020

La figure 57 montre les conditions météorologiques dans le bassin versant de la rivière CH durant la débâcle 2020. La température de l'air a monté au-dessus de -5 °C quotidiennement à partir du 2 mars 2020 et les DJDC-5 ont connu une montée constante à partir de ce moment pour terminer la saison avec une valeur de 150,8 °C.J (figure 57b, c). Des pluies totalisant une hauteur de 23,6 mm ont eu lieu entre les 9 et 13 mars 2020 (figure 57d), engendrant la perte de la majorité du couvert neigeux au sol, soit une diminution de 18 cm entre le 8 et le 15 mars 2020 (figure 57e). Durant cette même période, soit le 13 mars en matinée, les vents ont atteint une vitesse de 33 km/h (figure 57a). Les 10 derniers cm de neige ont terminé leur fonte en date du 26 mars à la suite de pluies de 8 mm et 3,6 mm les 20 et 26 mars 2020, respectivement (figure 57e). Pour conclure la saison, une pluie de 15,4 mm a eu lieu le 2 avril 2020 (figure 57d).

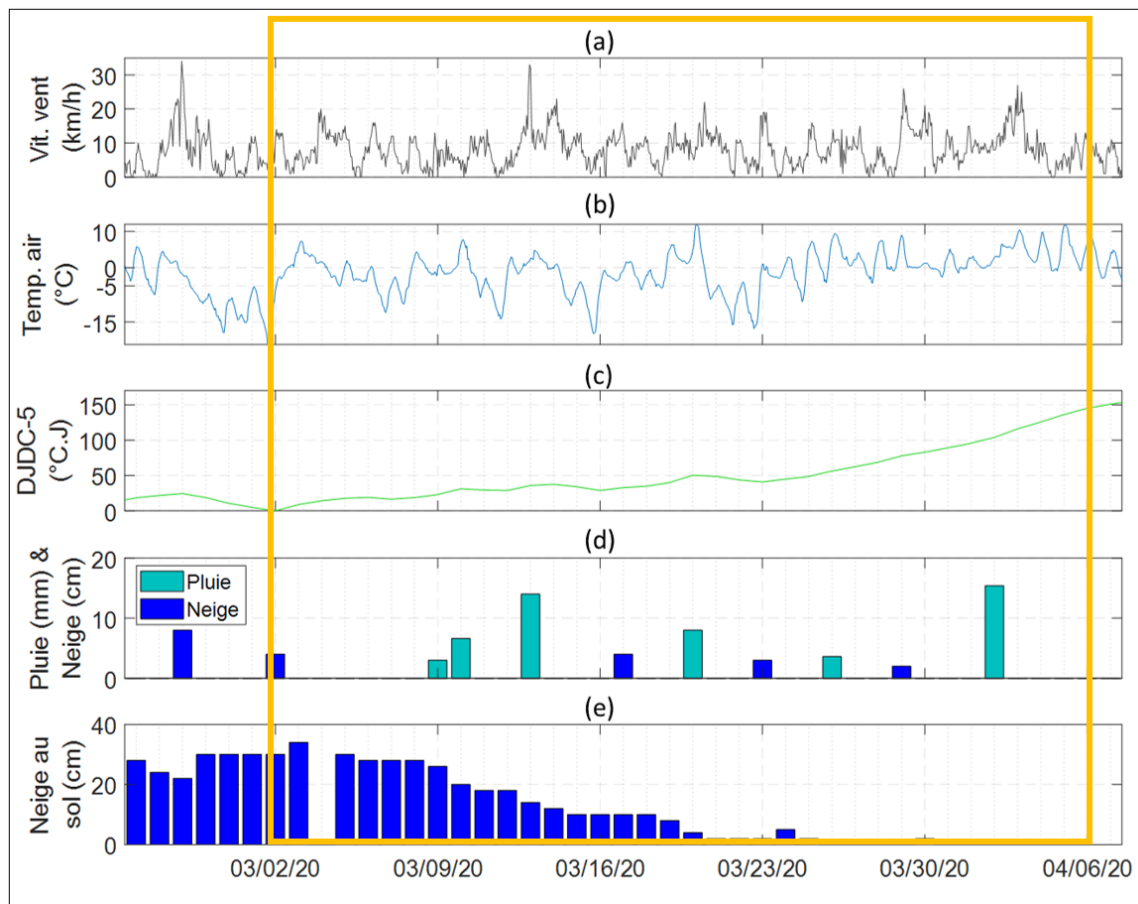


Figure 57. Conditions météorologiques pour la débâcle 2020 dans le bassin versant de la rivière CH (données du 25 février au 7 avril 2020) : (a) vitesse du vent; (b) température de l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (2 mars au 6 avril).

5.1.1.2 Débâcle 2021

La figure 58 présente les conditions météorologiques dans le bassin versant de la rivière CH durant la débâcle 2021. Comme les températures de l'air mesurées dans chaque tributaire étaient très semblables (à ± 1 °C), seules les températures de l'air de la rivière FA, le tributaire central, sont présentées (figure 58b).

Les températures de l'air se sont élevées quotidiennement au-dessus de -5 °C à partir du 7 mars 2021, à l'exception du 15 mars, et les DJDC-5 ont commencé à s'accumuler à partir du 9 mars 2021 pour terminer la saison à 132 °C.J (figure 58b, c). L'épaisseur de la neige a commencé à diminuer à ce moment et la neige au sol avait complètement disparu en date du 20 mars 2021 pour une perte de 36 cm durant cette période (figure 58e). Enfin, un événement pluvieux prolongé totalisant 48,4 mm de pluie a eu lieu sur la zone d'étude entre le 24 et le 31 mars 2021 (figure 58.d), période pendant laquelle la vitesse du vent a

connu son maximum pour la saison avec une valeur de 29 km/h le 28 mars 2021 (figure 58a).

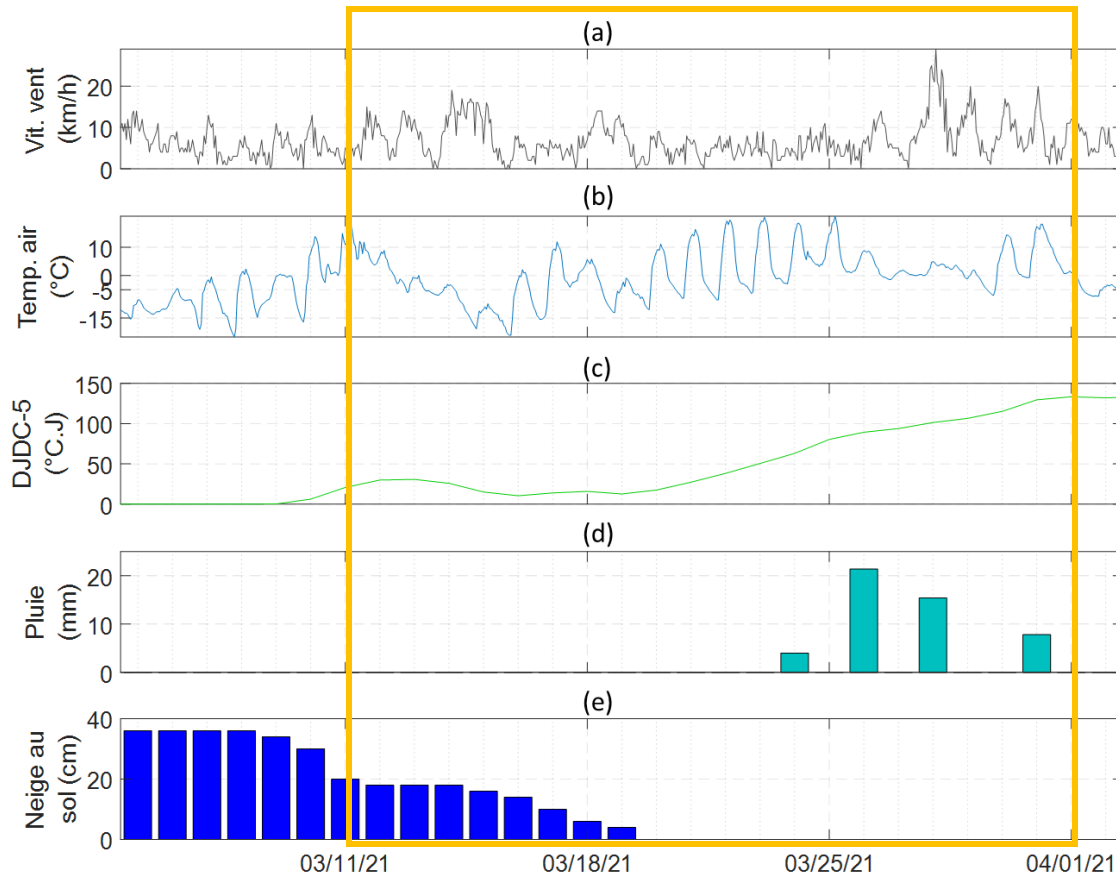


Figure 58. Conditions météorologiques pour la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière CH (données du 5 mars au 2 avril 2021) : (a) vitesse du vent; (b) température de l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5°C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (11 mars au 1er avril).

5.1.1.3 Débâcle 2022

La figure 59 présente les conditions météorologiques dans le bassin versant de la rivière CH durant la débâcle 2022. À partir du 14 mars 2022, les températures de l'air quotidiennes ont régulièrement dépassé -5°C , à l'exception du 28 et du 29 mars, qui ont été des jours nettement plus froids (figure 59b). Par conséquent, durant la période de dégel, les DJDC-5 ont enregistré deux phases d'augmentation continue, aboutissant à des totaux respectifs de 89°C.J et $189,7^{\circ}\text{C.J}$ (figure 59c). La dernière chute de neige significative de la saison 2022 s'est produite le 12 mars, avec un apport de 16 cm. À la suite de cet événement, la couverture neigeuse au sol a entamé une phase de réduction, passant de 24 cm le 13 mars à seulement 6 cm le 17 mars 2022, date à laquelle la présence de neige au sol a été observée pour la dernière fois (figure 59e).

Deux événements importants de précipitations liquides ont eu lieu durant la débâcle, le premier en date du 18 et du 19 mars 2022 totalisant 25,4 mm de pluie et le second entre le 7 et le 11 avril 2022 totalisant 35,6 mm de pluie tombée (figure 59d).

En outre, le 7 avril 2022 figure parmi les jours ayant enregistré l'une des plus fortes vitesses de vent de la saison, atteignant 21 km/h, juste derrière le 24 mars 2022 qui a obtenu la vitesse maximale de la saison avec 22 km/h (figure 59a).

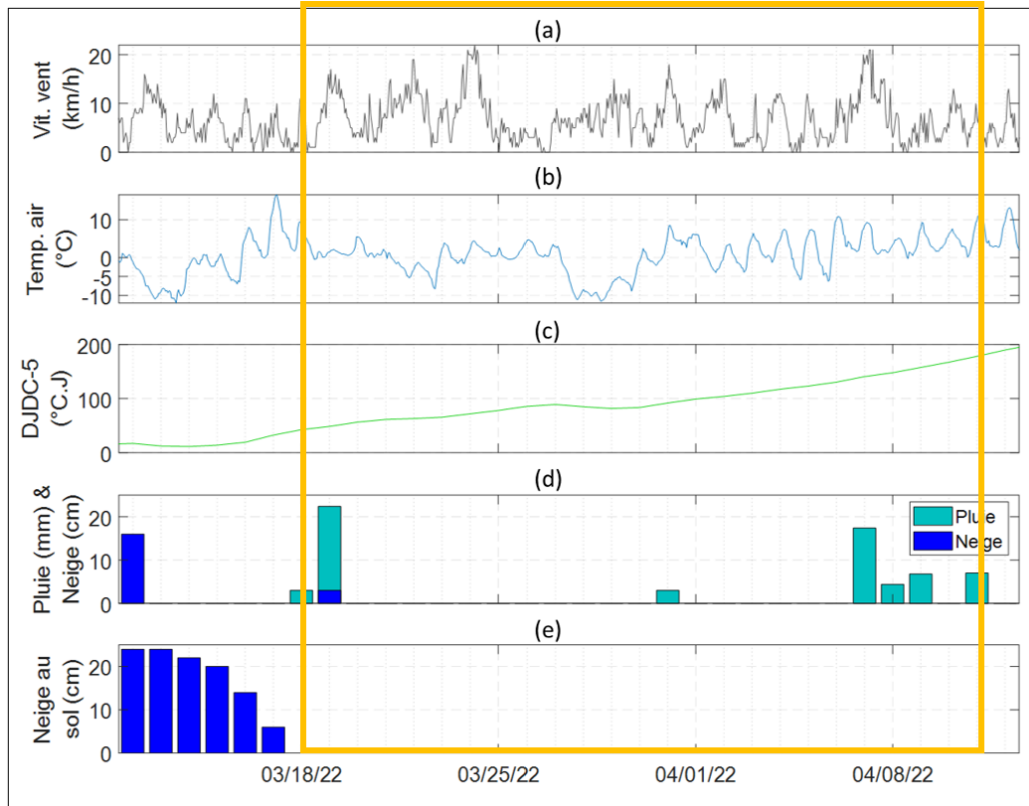


Figure 59. Conditions météorologiques pour la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière CH (données du 12 mars au 12 avril 2022) : (a) vitesse du vent; (b) température de l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (18 mars au 11 avril).

5.1.1.4 Débâcle 2023

La figure 60 présente les conditions météorologiques dans le bassin versant de la CH durant la débâcle 2023. La température de l'air a connu des valeurs moyennes supérieures à -5 °C quotidiennement à partir du 5 mars 2023, à l'exception des journées du 10 au 12 mars, du 19 mars et du 30 mars, qui ont été plus froides (figure 60b). Par conséquent, durant la période de dégel, les DJDC-5 ont montré une augmentation continue, qui s'est accélérée à partir du 9 avril, avec des températures plus élevées, culminant à un total de 288 °C.J le 19 avril 2023 (figure 60c).

La dernière chute de neige importante de la saison 2023 (12 cm) a eu lieu le 2 mars, après quoi la quantité de neige au sol a commencé à diminuer, passant de 72 cm le 3 mars à 10 cm le 24 mars (figure 60e). Par ailleurs, la vitesse du vent maximale de la saison, atteignant 25 km/h, a été observée le 17 avril (figure 60a). Il est également à noter que le 6 mars a été l'une des journées présentant les vitesses de vent les plus élevées, avec une valeur maximale de 21 km/h.

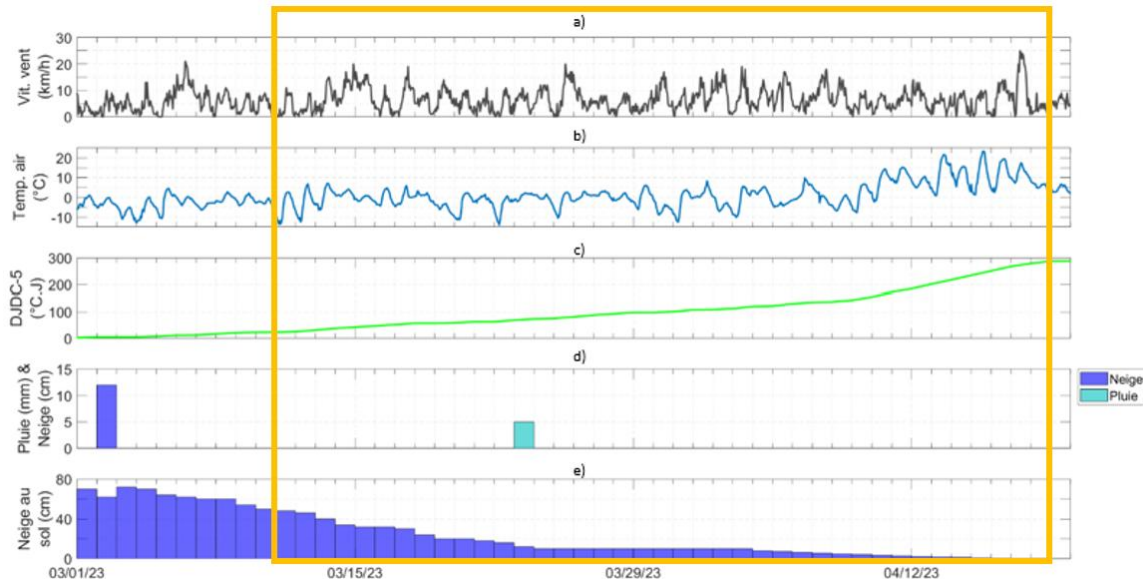


Figure 60. Conditions météorologiques pour la débâcle 2023 dans la rivière CH (données du 1^{er} mars au 19 avril 2023) : (a) vitesse du vent; (b) température de l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5°C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (11 mars au 19 avril).

5.1.1.5 Débâcle 2024

La figure 61 présente les conditions météorologiques dans le bassin versant de la CH durant la débâcle 2024. La température de l'air a connu des valeurs moyennes supérieures à -5 °C quotidiennement à partir du 2 mars 2024, à l'exception de la période du 21 au 25 mars qui a été plus froide (figure 61b). Les DJDC-5 ont connu une augmentation presque constante durant la débâcle, à l'exception de la période du 21 au 25 mars, où ils sont demeurés stables avec une valeur totale de 114,6 °C.J, en raison des températures plus faibles que -5 °C. Les DJDC-5 se sont soldés à une valeur totale de 465,4 °C.J le 30 avril 2024 (figure 61c).

La dernière chute de neige importante de la saison 2024 (16 cm) a eu lieu en date du 23 mars, après quoi la quantité de neige au sol a commencé à diminuer, passant de 16 cm le 23 mars à 0 cm le 30 mars (figure 61e). Deux autres épisodes de neige ont également été enregistrés après cette date, soit le 4 et le 24 avril 2024, avec des accumulations respectives de 5 cm et de 3,5 cm. Toutefois, cette neige a fondu dans la même journée en raison des températures ambiantes élevées.

La débâcle a été marquée par deux épisodes de pluie significatifs, soit le 6 mars 2024 (14 mm) et du 10 au 13 avril 2024 (22,8 mm) (figure 61d). De plus, la vitesse maximale du vent de la saison, atteignant 30 km/h, a été observée le 4 avril (figure 61a). Il est à noter que le 9 et le 30 mars ont également été marqués par des vitesses de vent parmi les plus élevées, avec 24 km/h chacune.

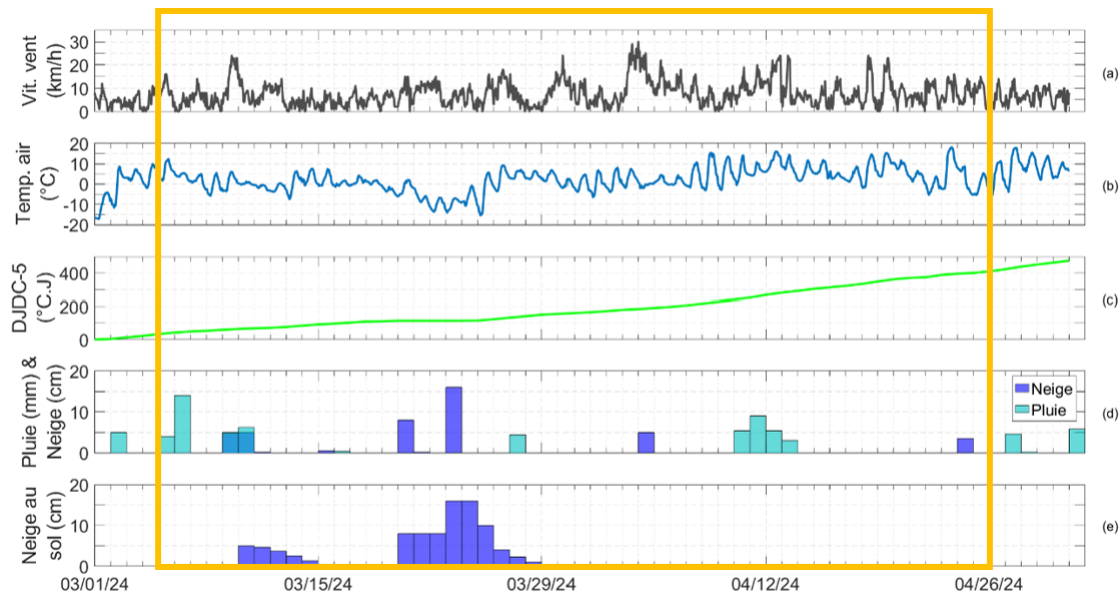


Figure 61 : Conditions météorologiques pour la débâcle 2024 dans la rivière CH (données du 1^{er} mars au 30 avril 2024) : (a) vitesse du vent; (b) température de l'air; (c) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5°C (DJDC-5); (d) précipitations et (e) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (5 mars au 26 avril).

5.1.1.6 Résumé

De façon générale, l'analyse des conditions météorologiques observées entre 2020 et 2024 dans le bassin versant de la CH met en évidence une récurrence du rôle déclencheur de la hausse soutenue des températures de l'air au-dessus de -5 °C, se répercutant en une accumulation rapide des degrés-jours de dégel (DJDC-5). Dans toutes les années étudiées, la fonte de neige a débuté peu après cette remontée thermique et a souvent été accélérée par un ou plusieurs épisodes de pluie significatifs, survenant en moyenne dans les premiers dix jours de la période de débâcle. Ces pluies, souvent combinées à des vents modérés à forts, ont favorisé la dégradation du couvert de glace et la mobilisation de la neige fondante dans le réseau hydrographique. À l'échelle interannuelle, la période d'amorce de la débâcle tend à se situer de plus en plus tôt en mars, traduisant une variabilité saisonnière influencée par les conditions thermiques printanières. Ainsi, la synergie entre la hausse des températures, la fonte du couvert neigeux et la pluie apparaît comme le principal facteur contrôlant le déclenchement de la débâcle dans le bassin versant de la CH au cours des dernières années.

5.1.2 Bassin versant de la rivière Sainte-Anne

5.1.2.1 Débâcle 2021

La figure 62 présente les conditions météorologiques dans le bassin versant de la STA durant la débâcle 2021. Près de la rivière BDN, la température de l'air s'est élevée au-dessus de -5°C de manière continue à partir du 21 mars 2021 et les DJDC-5 ont alors commencé une montée continue à partir de ce moment pour terminer la saison avec $182,9^{\circ}\text{C}\cdot\text{J}$ (figure 62a, b). La neige au sol s'est également mise à fondre en date du 21 mars 2021 et a complètement disparu à partir du 2 avril 2021 pour une perte totale de 45 cm pendant cette période (figure 62d).

Deux périodes de pluies importantes ont eu lieu durant la débâcle entraînant 36 mm et 40,2 mm de pluie le 26 et le 28 mars 2021, respectivement (figure 62c). Finalement, le 31 mars et le 1^{er} avril 2021, une accumulation de 11,8 cm de neige a eu lieu, mais celle-ci a rapidement fondu en raison des températures élevées (figure 62c).

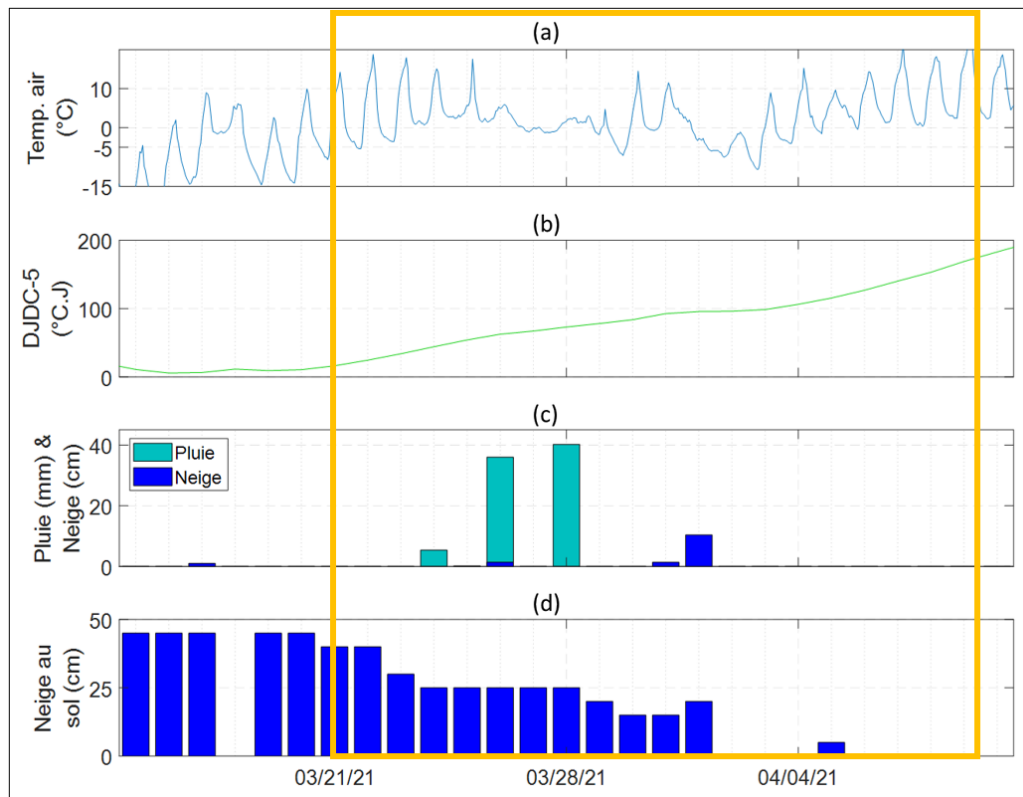


Figure 62. Conditions météorologiques pour la débâcle 2021 dans le bassin versant de la rivière STA (données du 15 mars au 10 avril 2021) : (a) température de l'air; (b) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5°C (DJDC-5); (c) précipitations et (d) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (21 mars au 9 avril).

5.1.2.2 Débâcle 2022

La figure 63 présente les conditions météorologiques dans le bassin versant de la rivière STA durant la débâcle 2022. La température de l'air s'est maintenue au-dessus de -5°C quotidiennement à partir du 15 mars 2022, à l'exception des journées du 28 et du 29 mars qui ont été plus froides (figure 63a). Les DJDC-5 ont donc connu deux périodes d'augmentation constante durant la débâcle, qui se sont soldées par des valeurs respectives de $75,9^{\circ}\text{C.J}$ et de $236,5^{\circ}\text{C.J}$ (figure 63b). La quantité de neige au sol a diminué lors de l'augmentation initiale des températures, passant de 110 cm à 85 cm entre le 14 et le 19 mars 2022, puis a connu une diminution constante à compter du 29 mars jusqu'à la fin de la saison de la débâcle où subsistaient encore 20 cm au sol (figure 63d). Des précipitations solides et liquides ont eu lieu sporadiquement tout au long de la période de débâcle, mais la quantité de neige reçue la plus importante de la saison a été observée au début de la période de débâcle avec un total de 20,4 cm le 24 et le 25 mars 2022 (figure 63c). Des événements de pluie importants se sont produits le 19 et le 24 mars 2022 avec une accumulation de 18,4 mm et 11 mm de pluie respectivement, puis le 14 avril 2022 avec une quantité de 13,8 mm de pluie accumulée. La pluie la plus importante de la saison (35,4 mm) a eu lieu le 8 et le 9 avril 2022 (figure 63c).

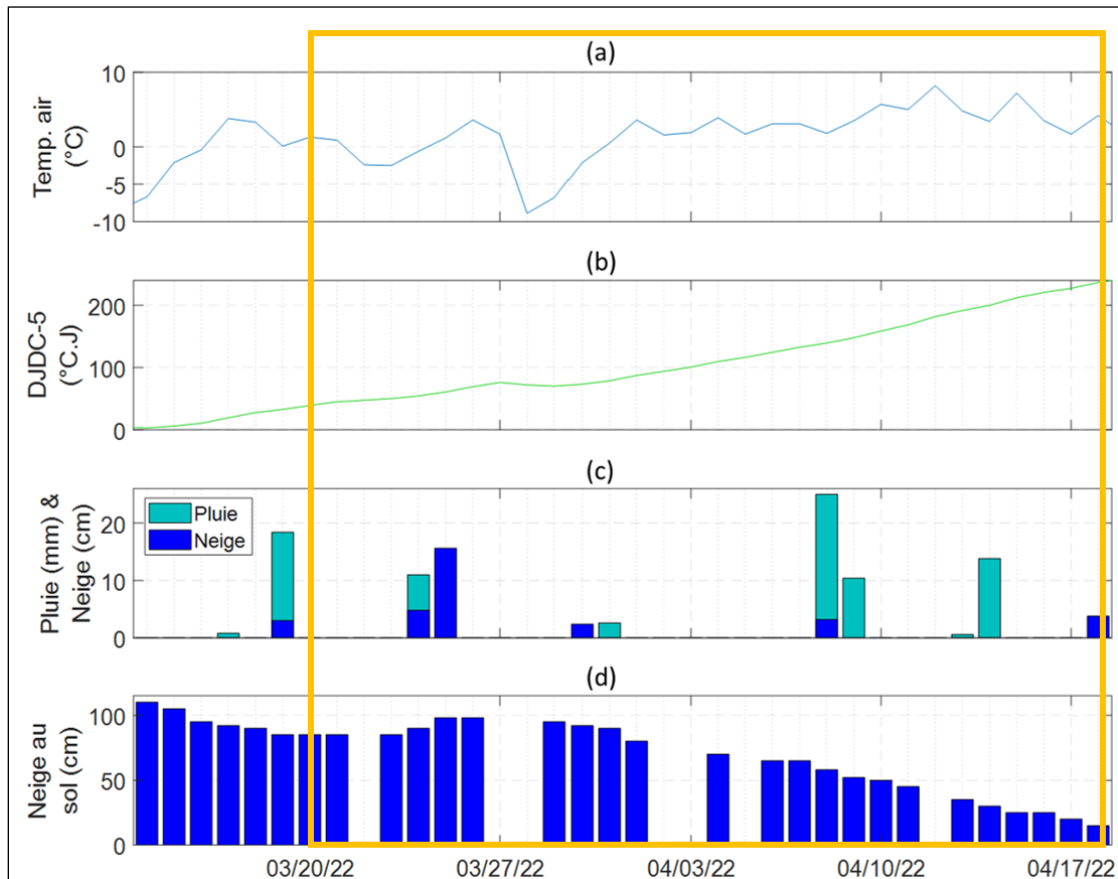


Figure 63. Conditions météorologiques pour la débâcle 2022 dans le bassin versant de la rivière STA (données du 14 mars au 18 avril 2022) : (a) température de l'air; (b)

degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (c) précipitations et (d) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (20 mars au 18 avril).

5.1.2.3 Débâcle 2023

La figure 64 présente les conditions météorologiques dans le bassin versant de la STA durant la débâcle 2023. Près de la rivière BDN, la température de l'air a grimpé au-dessus de - 5 °C de moyenne de manière continue à partir du 4 mars 2023 et les DJDC-5 ont alors commencé une montée constante à partir de ce moment pour terminer la saison à 399,5 °C.J (figure 64a, b).

La neige au sol s'est également mise à fondre en date du 4 mars pour disparaître totalement le 25 avril, représentant une fonte totale de 102 cm au cours de cette période (figure 64d). Deux pluies importantes ont eu lieu durant la période de débâcle avec respectivement 12,6 mm et 46,8 mm le 17 et le 23 avril (figure 64c). Finalement, une neige d'une hauteur totale de 19,4 cm est tombée le 25 et le 26 mars, mais celle-ci n'est pas restée au sol en raison des chaudes températures ambiantes.

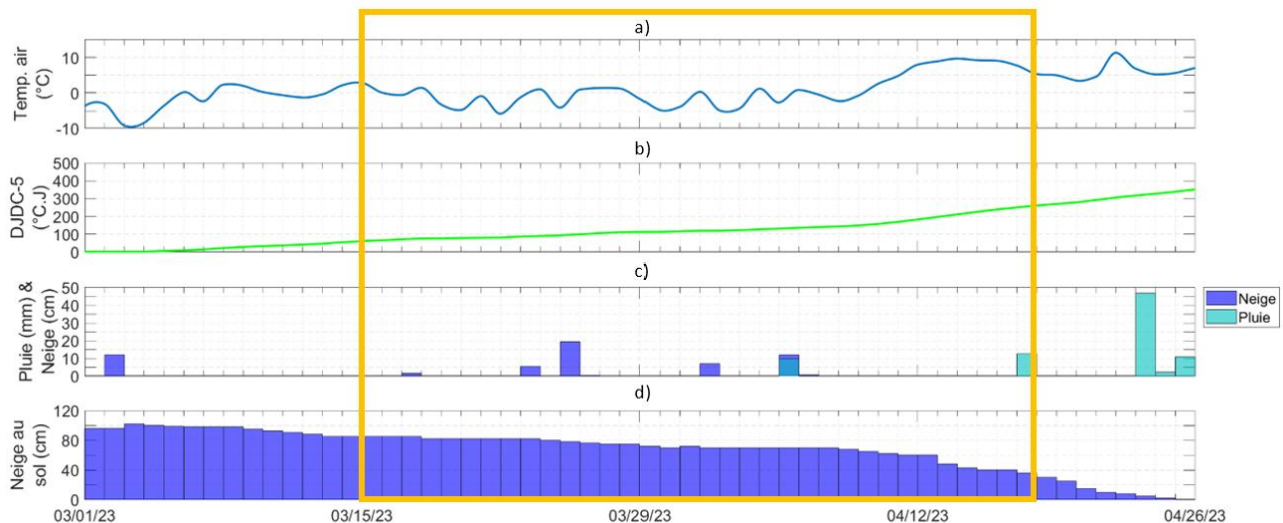


Figure 64. Conditions météorologiques pour la débâcle 2023 dans la rivière STA (données du 1^{er} mars au 26 avril 2023) : (a) température de l'air; (b) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (c) précipitations et (d) neige au sol. Le rectangle jaune cible la période de débâcle (15 mars au 18 avril).

5.1.2.4 Débâcle 2024

La figure 65 présente les conditions météorologiques dans le bassin versant de la STA durant la débâcle 2024. Près de la rivière BDN, la température de l'air s'est élevée au-dessus de - 5 °C de manière continue à partir du 2 mars 2024, à l'exception de la période du 20 au 24 mars, marquée par des températures plus froides (figure 65a). Les DJDC-5 ont alors commencé une montée continue à partir de ce moment pour terminer la saison à 499,2 °C.J le 30 avril 2024 (figure 65b).

La dernière neige importante de la saison 2024 a eu lieu le 9 mars, avec une accumulation de 28,2 cm (figure 65c). Deux faibles épisodes de neige subséquents ont eu lieu le 15 et le 23 mars, avec respectivement 7,8 cm et 6 cm. La neige au sol a commencé à fondre dès le 9 mars, avec une légère augmentation de 3 cm après la neige du 15 mars, et a complètement disparu le 11 avril, totalisant une fonte totale de 44 cm durant cette période (figure 65d). Deux pluies significatives pour la fonte du couvert ont eu lieu durant la débâcle 2024, soit le 10 mars (10,2 mm) et le 11 et le 12 avril (30,2 mm) (figure 65c).

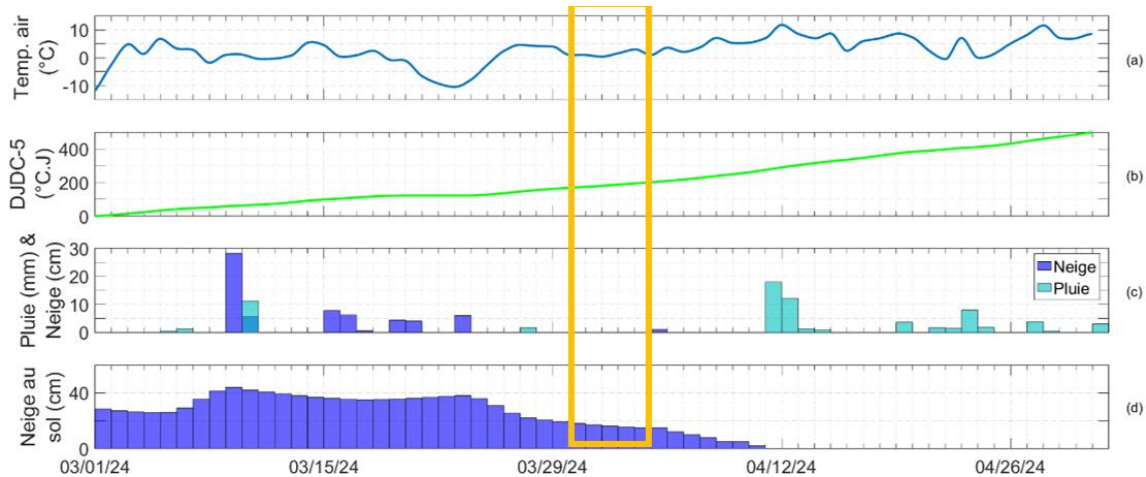


Figure 65. Conditions météorologiques pour la débâcle 2024 dans la rivière STA (données du 1^{er} mars au 30 avril 2024) : (a) température de l'air; (b) degrés-jours de dégel cumulatifs à partir de -5 °C (DJDC-5); (c) précipitations et (d) neige au sol.

5.1.2.5 Résumé

L'analyse des conditions météorologiques entre 2021 et 2024 dans le bassin versant de la rivière STA met en évidence une régularité dans le déclenchement de la débâcle associée à la hausse soutenue des températures de l'air au-dessus de -5 °C, corrélée avec l'accumulation rapide des degrés-jours de dégel cumulés (DJDC-5). Dans tous les cas, la fonte de la neige débute peu après cette élévation thermique et s'intensifie sous l'effet de pluies successives, souvent de l'ordre de 10 à 40 mm selon les années. Ces pluies printanières, combinées à la hausse des températures, contribuent à accélérer la fonte et la dégradation du couvert de glace. On note également que la neige fraîche tombée en fin de saison ne persiste généralement pas en raison des températures positives observées. À l'échelle interannuelle, la période d'amorce de la débâcle tend à se produire de plus en plus tôt en mars, ce qui suggère une influence croissante des conditions thermiques printanières précoces sur la dynamique de la débâcle dans le bassin versant de la STA.

5.2 Confluences

Les résultats pour chaque confluence étudiée sont présentés dans cette section. Trois zones ont été observées pour chacune d'elle soit l'amont de la confluence, l'aval de la

confluence et le tributaire. L'analyse est réalisée chronologiquement selon la fonte du couvert de glace de chaque section.

5.2.1 Rivière Chaudière

5.2.1.1 Confluence du Loup

Cette section fait l'analyse des données de la confluence de la rivière DL située au km 103,4 de la CH.

Débâcle 2020

Le tableau 16 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2020. Les données recueillies par les traceurs GPS sont illustrées à la figure 66 et les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 67.

Tableau 16. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2020 à la confluence DL.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

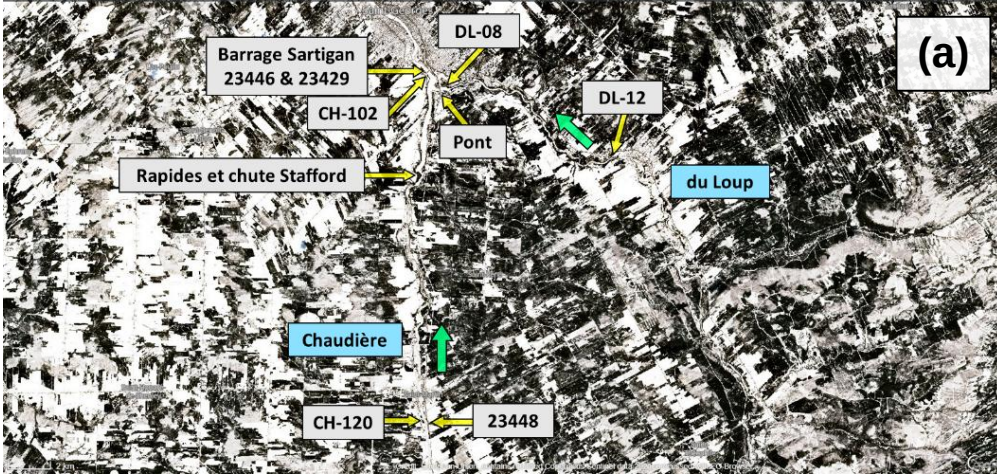
Description	Image
Image satellite prise le 8 mars 2020 à 11h50. Le couvert de glace à la confluence DL est majoritairement intact. Il y a des ouvertures à l'amont du tributaire (juste en aval de DL-12) et dans la CH à l'amont de la confluence (zone en amont des rapides et chute Stafford – RCS).	 (a)
Image de caméra prise le 11 mars 2020 à 15h21. Passage d'un embâcle au site CH-120 en amont de la confluence DL à la suite de la disparition du couvert de glace. Cette section est devenue en eau libre deux heures plus tard.	 (b)

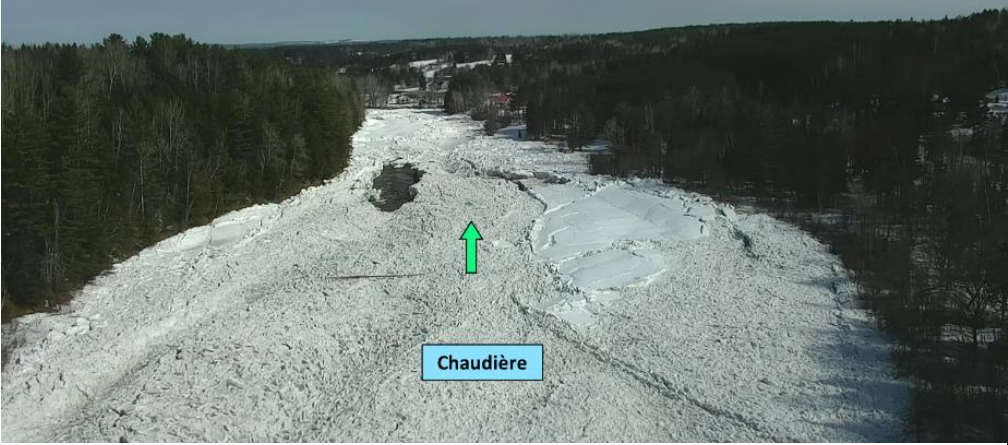
Image d'un vol de drone prise le 12 mars 2020 à 11h31. Embâcle formant le couvert de la CH en amont de la confluence DL au km 108,6 – section des rapides des chutes Stafford (RCS).	(c) km 108,6  Chaudière
Image d'un vol de drone prise le 12 mars 2020 à 11h32. Embâcle dans le couvert de la CH en amont de la confluence DL au km 107,8 – section des RCS.	(d) km 107,8  Chaudière

Image d'un vol de drone prise le 12 mars 2020 à 12h41. Couvert partiel dans la rivière DL au km 30 en aval du pont de la route 269 à Saint-Théophile.	(e) 
Image d'un vol de drone prise le 12 mars 2020 à 12h41. Couvert partiel dans la rivière DL au km 29,9.	(f) 

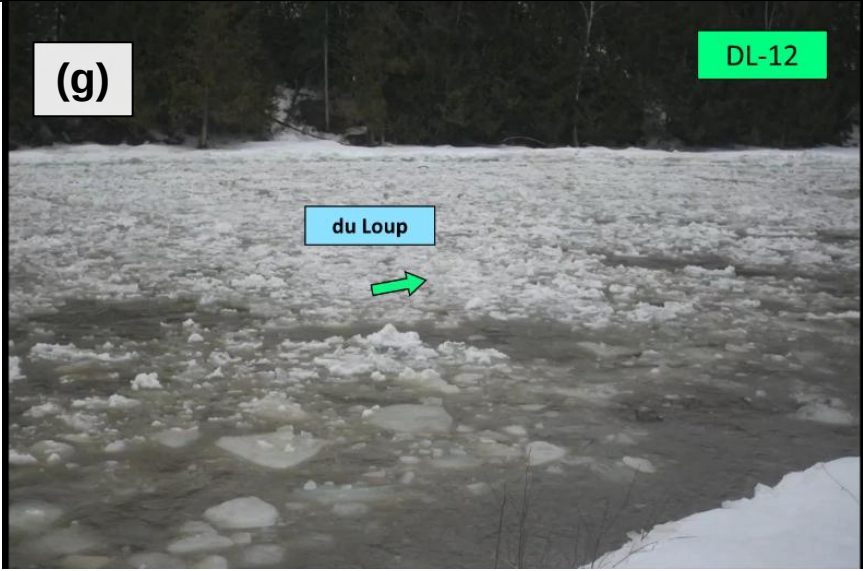
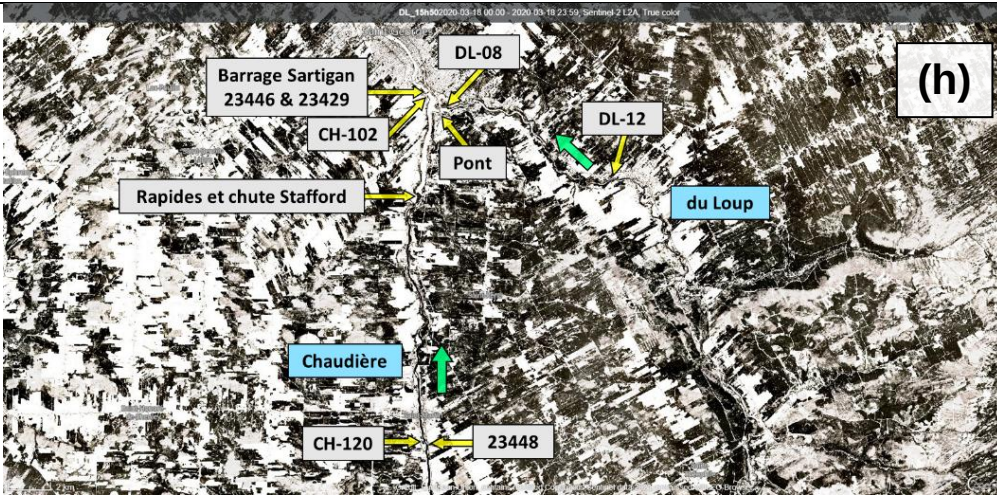
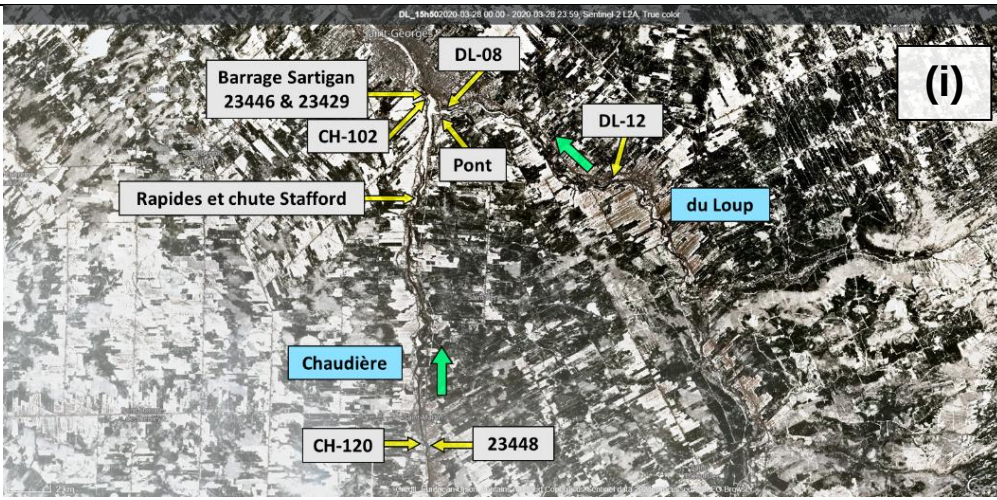
Image de caméra prise le 14 mars 2020 à 13h12. Passage d'un embâcle au site DL-12 deux jours après la disparition du couvert de glace dans cette section. Cette section est devenue libre de glace quelques heures plus tard.	
Image satellite prise le 18 mars 2020 à 11h50. L'amont de la CH (à partir des RCS vers l'amont) et du tributaire (à partir du km 7 vers l'amont) est en eau libre. Le couvert de glace est intact à la confluence et dans les cinq premiers km de la CH et DL à partir de ce point.	
Image satellite prise le 28 mars 2020 à 11h50. La CH est en eau libre à partir du km 106,5 et la rivière DL à partir du km 4,5 (vers l'amont). Le couvert près de la confluence est toujours intact.	

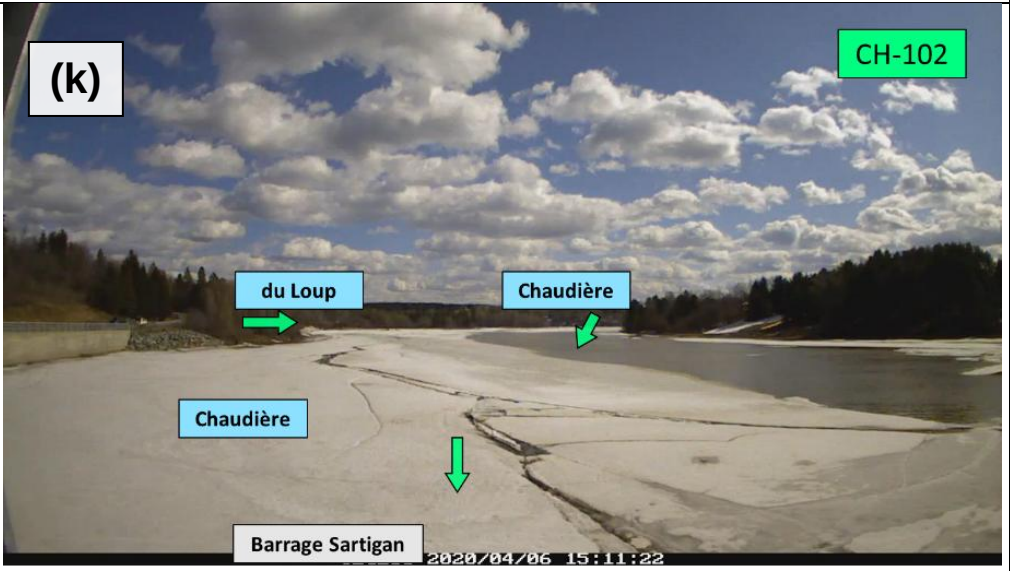
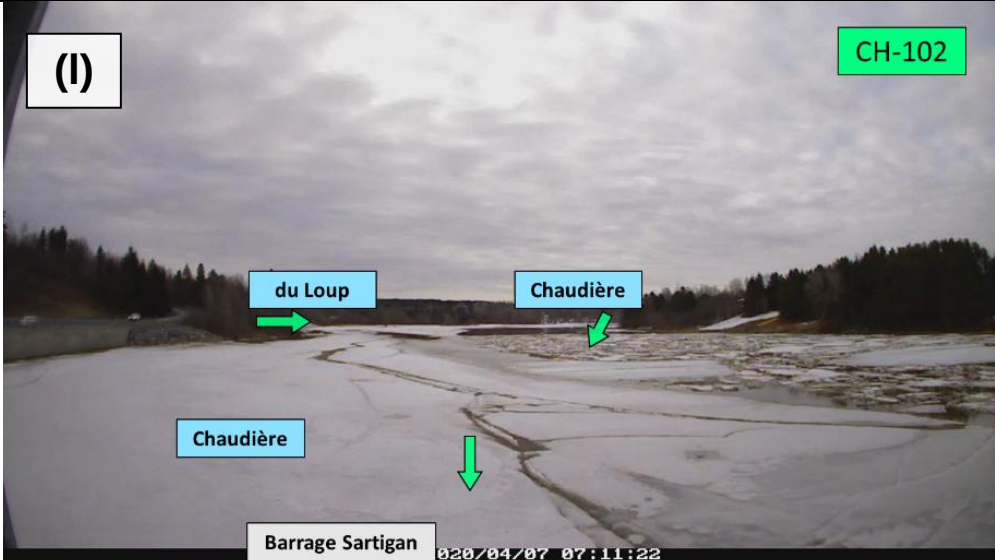
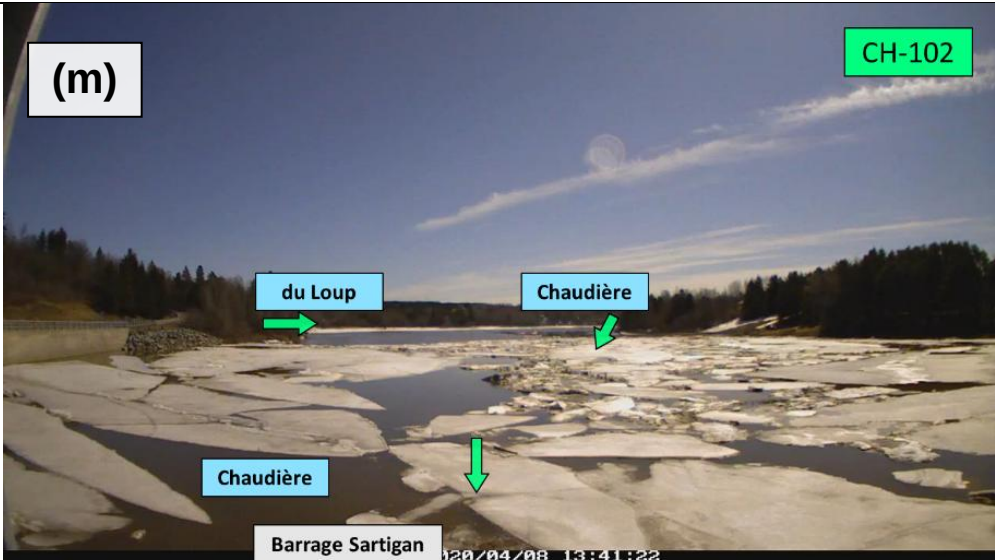
Image de caméra prise le 5 avril 2020 à 9h33. Accumulation de morceaux de glace contre un couvert intact au site DL-08 situé en amont du pont de la route 204 près de la confluence.	 DL-08 Pont du Loup (j) TLC200 2020/04/05 09:33:30
Image de caméra prise le 6 avril 2020 à 15h11. Disparition partielle du couvert de glace dans la CH au niveau du barrage Sartigan. Il y a une ouverture du côté où la CH se poursuit en amont et le couvert subsiste du côté où se trouve la rivière DL.	 (k) CH-102 du Loup Chaudière Chaudière Barrage Sartigan 2020/04/06 15:11:22

Image de caméra prise le 7 avril 2020 à 7h11. Morceaux de glace provenant du bris du couvert de la rivière DL se déplaçant dans la CH (à droite).	(l) CH-102 
Image de caméra prise le 8 avril 2020 à 13h41. Accumulation de morceaux de glace du couvert de la CH à la confluence et de la rivière DL en amont du barrage Sartigan.	(m) CH-102 

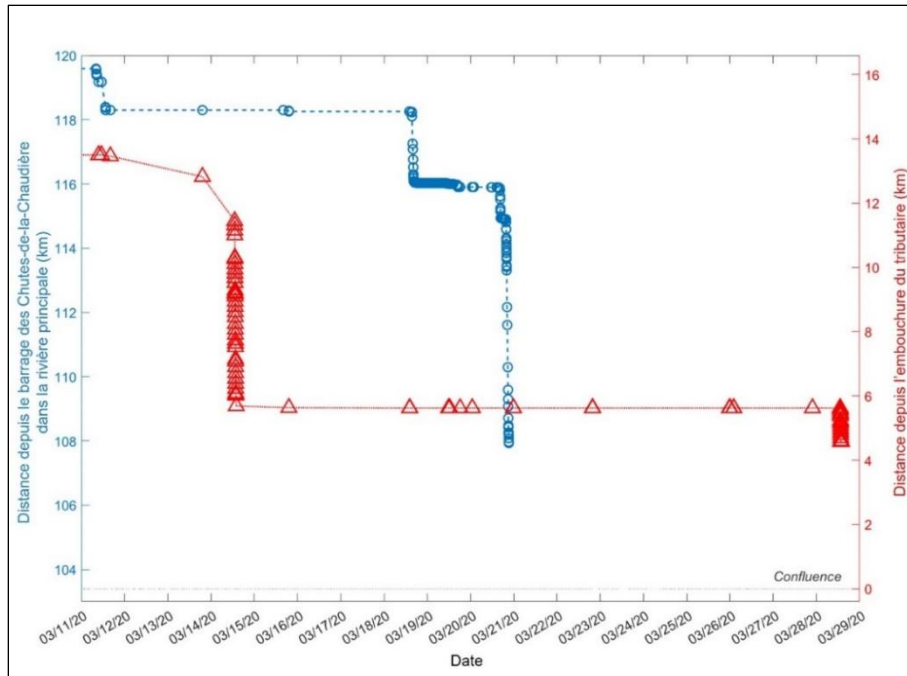


Figure 66. Données de traceurs GPS pour la confluence DL durant la débâcle 2020.

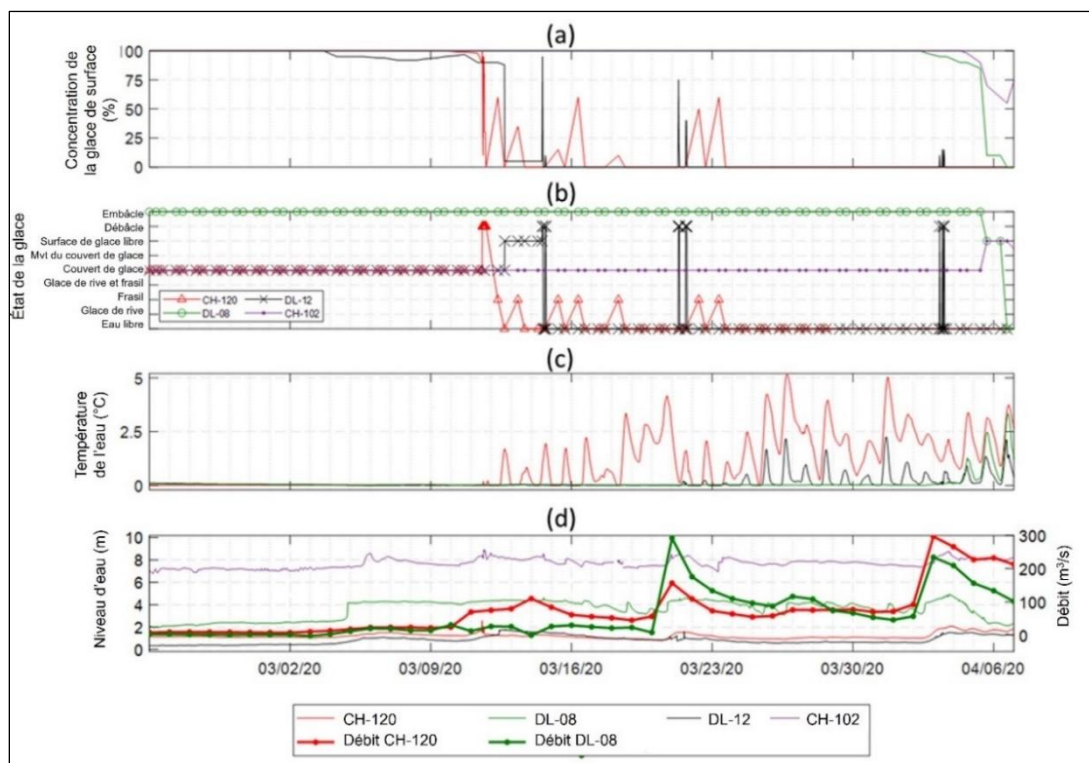


Figure 67. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2020 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 227,2 m à CH-120, 222,9 m à DL-12, 173 m à DL-08 et 167,1 m à CH-102.

La disparition du couvert de glace pour la confluence DL a commencé le 11 mars 2020 pour la section en amont de la confluence (CH-120 et secteur des RCS) (tableau 16b, c, d, figure 66 et figure 67 a, b) et le 11 et le 12 mars 2020 pour la section en amont dans le tributaire (DL-12 et km 30) (tableau 16e, f, figure 66 et figure 67a, b). Au cours du 9 et du 10 mars 2020, la température de l'air a atteint un maximum de 7,8 °C et des pluies totalisant une dizaine de millimètres, provoquant la perte de 10 cm de neige au sol (figure 57b, d, e). Le site CH-120 est passé d'un couvert de glace total à l'eau libre le 11 mars 2020. Durant cette période, la température de l'eau, le niveau d'eau et le débit ont augmenté (figure 67). Un embâcle de 200 m de longueur, formé au km 10 dans la rivière DL le 12 mars 2020, a créé une augmentation du niveau d'eau au site DL-12, provoquant le bris du couvert de glace en amont dans le tributaire cette journée (figure 67a, b, d). De plus, le couvert a disparu dans le tributaire entre le km 11,4 et le km 5,7 le 15 mars 2020, puis dans la CH en amont de la confluence entre le km 118,3 et le km 107,9 entre le 19 et le 21 mars 2020 (figure 66). La température de l'eau à DL-12 s'est mise à augmenter à partir du 22 mars 2020, à la suite d'une pluie de 8 mm et d'un DJDC-5 de 50,4 °C.J le 20 mars 2020 (figure 57 et figure 67b, d).

Au début du mois d'avril, le couvert de glace s'est mis à fondre à l'aval dans le tributaire (DL-08), puis à l'aval de la confluence (CH-102) (figure 67a et b). Au site DL-08, le bris du couvert de glace a commencé le 3 avril, provoqué par une pluie de 15,4 mm et un DJDC-5 de 104,0 °C.J (figure 57c, d). Le débit a connu sa valeur maximale dans la CH et dans la rivière DL cette même journée avec des valeurs de 297 m³/s et 234 m³/s, respectivement, puis s'est mis à diminuer dès que l'ouverture dans le couvert de glace a été assez importante pour réduire significativement la friction causée par la glace (figure 67a, d). La température de l'eau s'est mise à augmenter dès le début de la perte du couvert au site DL-08 (figure 67c). L'aval du tributaire a connu des accumulations de glace le 5 avril 2020 en raison du couvert intact en aval de ce point, dans le tributaire et la rivière principale (tableau 16j). Puis, le tributaire est devenu libre de glace lorsque le couvert à la confluence dans la CH a disparu, permettant ainsi à la glace de s'échapper (tableau 16k, l). Finalement, la glace au barrage Sartigan (CH-102) a disparu entre le 5 et le 9 avril 2020 (figure 67a, b et tableau 16k, l, m). Cette perte tardive s'explique par le fait que la glace provenant du tributaire s'est amassée à l'amont du barrage Sartigan jusqu'à sa fonte sur place (tableau 16m).

En 2020, le barrage Sartigan a bien contrôlé la glace à la confluence DL en retenant les morceaux provenant de l'amont, formant ainsi un embâcle qui s'est étendu jusque dans le tributaire. Il a donc bien rempli les fonctions pour lesquelles il a été bâti : il a épargné la ville de Saint-Georges des trains de glace et des inondations excessives dues aux embâcles.

Débâcle 2021

Le tableau 17 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021. Les données recueillies par les traceurs GPS sont illustrées à la figure 68 et les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 69.

*Tableau 17. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021 à la confluence DL.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.*

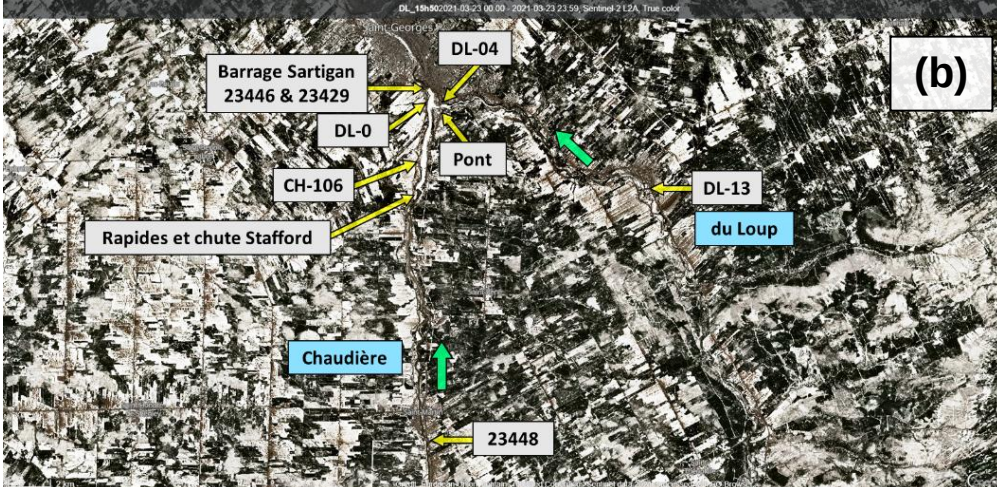
Description	Image
Image satellite prise le 13 mars 2021 à 10h50. Le couvert de glace est intact à la confluence et à l'intérieur des sections de rivières près de ce point. La couverture est partielle sur la CH à partir des RCS et plusieurs embâcles sont visibles dans la rivière DL à partir du km 4,5 vers l'amont.	
Image satellite prise le 23 mars 2021 à 11h50. Les sections de la CH à partir des RCS et dans DL à partir du km 4,5 (vers l'amont) sont en eau libre. Le couvert de glace est intact à la confluence et dans les zones à proximité.	

Image de caméra prise le 23 mars 2021 à 13h37. Accumulation de morceaux de glace contre un couvert intact au site DL-13.	(c) DL-13 du Loup 
Image d'un vol de drone prise le 23 mars 2021 à 16h52. Embâcle hivernal d'une longueur de 1,5 km avec son pied au barrage Sartigan remontant dans le tributaire en haut du pont de la route 204.	(d) Pont Chaudière km 0,7 Du Loup 

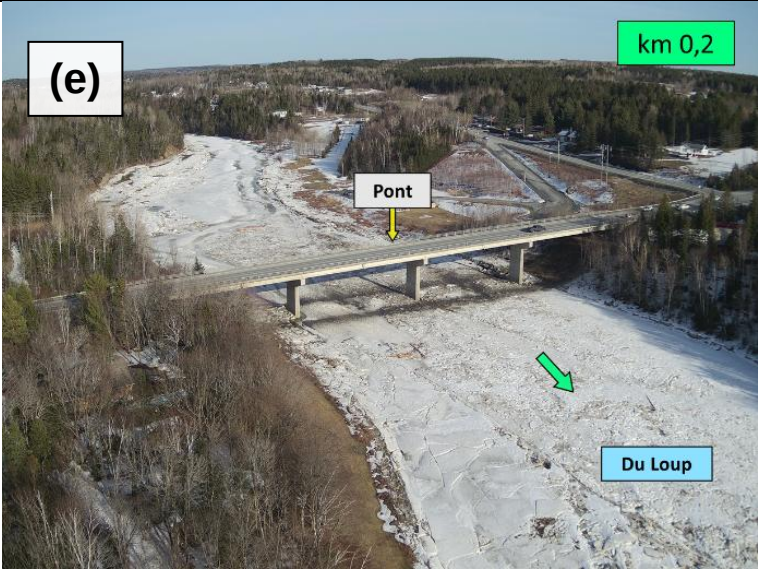
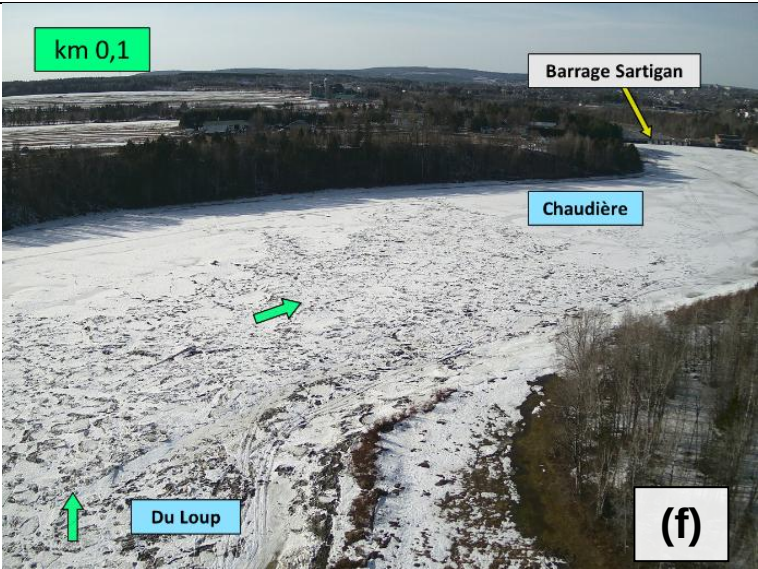
Image d'un vol de drone prise le 23 mars 2021 à 16h53. Tête de l'embâcle hivernal à l'amont du pont de la route 204 dans la rivière DL.	
Image d'un vol de drone prise le 23 mars 2021 à 16h53. Embâcle hivernal dans la CH – vue entre le barrage Sartigan et l'embouchure du tributaire.	

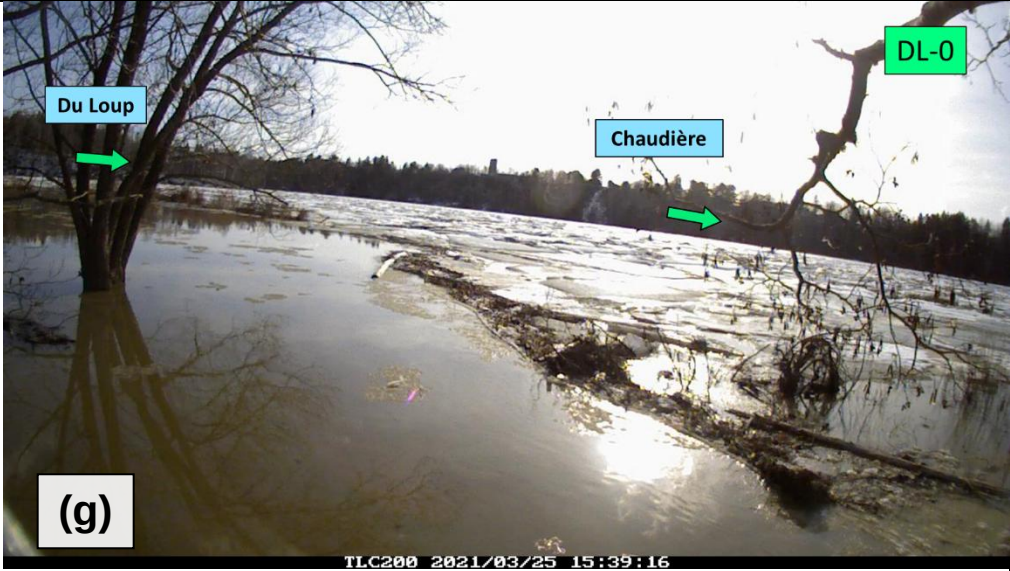
Image de caméra prise le 25 mars 2021 à 15h39. Apparition de morceaux de glace sur la rive permettant d'inférer la présence d'un embâcle dans la CH à la confluence DL à ce moment.	 (g)
Image de caméra prise le 26 mars 2021 à 5h34. Passage de morceaux de glace du bris du couvert dans la section au site CH-106 situé en amont de la confluence DL créant un embâcle observé entre 5h34 et 8h34.	 (h)

Image de caméra prise le 31 mars 2021 à 11h39.

Dernière journée où des morceaux de glace sont présents sur la rive et où la rivière est toujours couverte de glace dans la CH à la confluence DL.



(i)

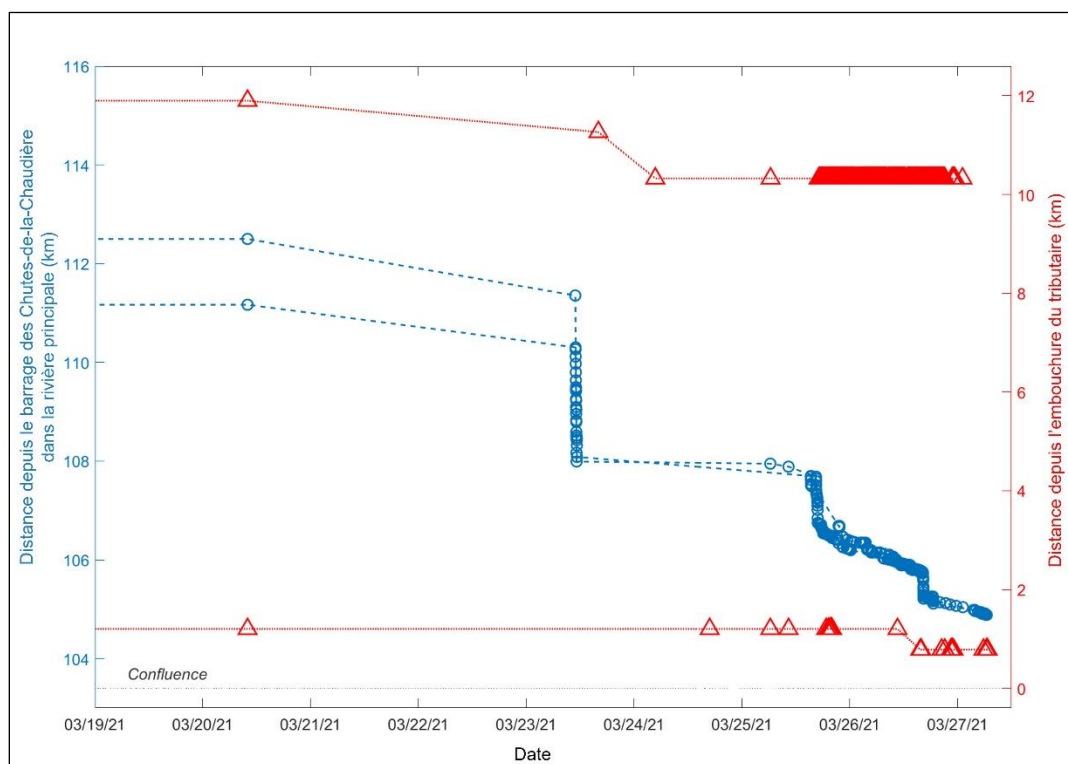


Figure 68. Données de traceurs GPS pour la confluence DL durant la débâcle 2021.

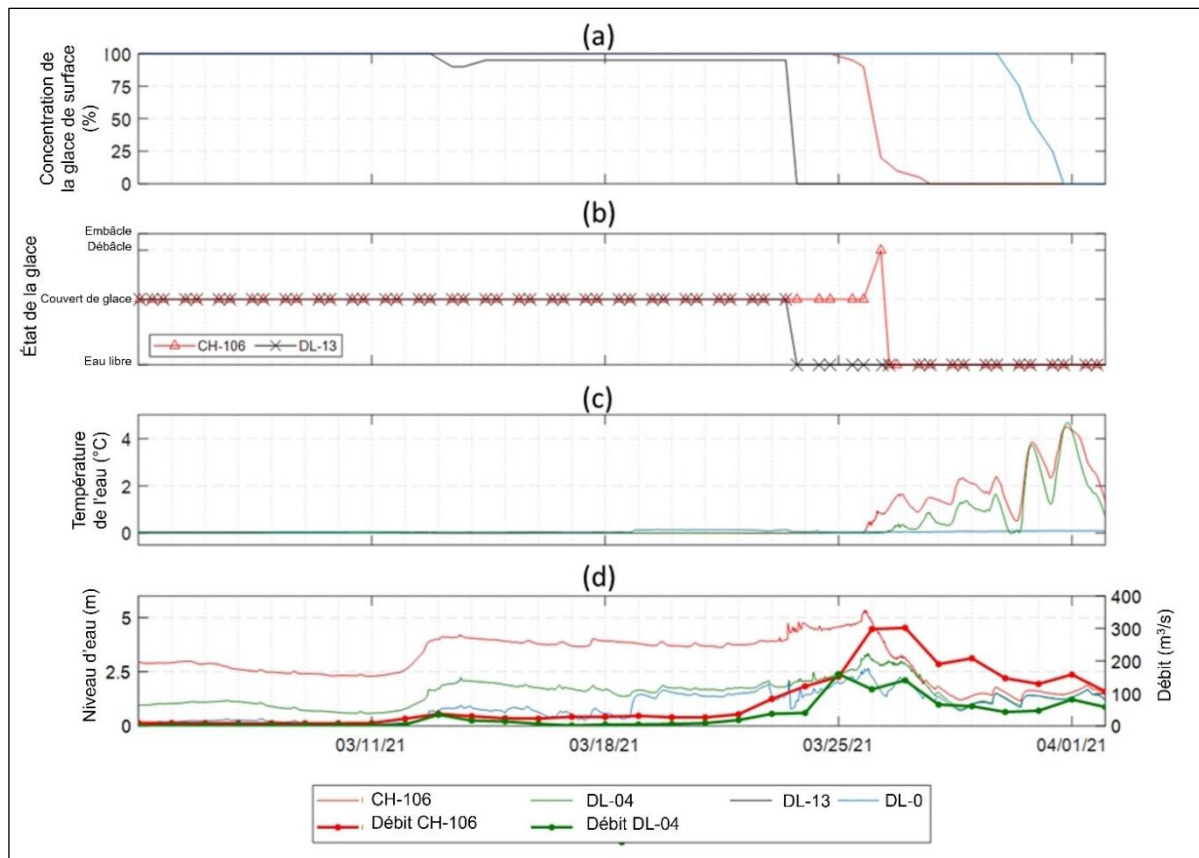


Figure 69. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2021 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 172,7 m à CH-106, 172,9 m à DL-04 et 172,8 m à DL-0.

En réponse aux pluies totalisant 25,4 mm entre le 24 et le 26 mars 2021 (figure 58c), le débit a commencé à augmenter de façon importante dans la CH, deux jours plus tard que dans la rivière DL, soit à partir du 23 mars 2021 jusqu'à son apogée le 27 mars 2021 avec une valeur de 302 m³/s (CH-106) (figure 69d). Ce phénomène, combiné à des températures de l'air constamment supérieures à -5 °C (figure 58a) a contribué à l'affaiblissement du couvert de glace. La perte du couvert de glace a débuté simultanément en amont dans le tributaire (DL-13) et dans la CH (km 111,4 à 108,1) le 23 mars 2021 (tableau 17c, figure 68 et figure 69a, b). Le site CH-106 en amont de la confluence a commencé à perdre sa couverture de glace progressivement à partir du 25 mars 2021 et est devenu libre de glace le 27 mars 2021 (tableau 17h et figure 69a, b), date à laquelle le couvert en aval du tributaire (km 1,2 à km 0,8) s'est mis à disparaître (figure 68). Pendant cette période, la température de l'eau a commencé à augmenter rapidement en réponse à l'absence du couvert de glace (figure 69c). À partir du 26 mars 2021, les niveaux d'eau ont commencé à diminuer graduellement alors que l'effet de l'événement pluvieux s'est estompé et en raison de la réduction de la friction à l'écoulement due à la disparition de la couverture de glace (figure 69d).

La confluence (DL-0) et l'aval de la confluence ont été les dernières sections à perdre leur couvert de glace. Le tableau 17 (d, e, f) montre les images d'un vol de drone effectué au-dessus de la confluence le 23 mars 2021 ayant confirmé la présence d'un embâcle hivernal d'une longueur approximative de 1,5 km dont le pied se trouve à la confluence et la tête dans le tributaire, en amont du pont de la route 204 (tableau 17d, e, f). La couverture de glace a été maintenue en place par le barrage Sartigan situé à 0,8 km en aval de la confluence dans la rivière principale et dans le tributaire (DL-0) (tableau 17g, i). Celle-ci a fondu thermiquement entre le 30 mars et le 1^{er} avril 2021 (DL-0) en réponse à l'événement pluvieux de 7,8 mm le 31 mars 2021, à des températures de l'air atteignant 18,2 °C ainsi qu'à un DJDC-5 de 133,3 °C.J le 1^{er} avril 2021 (figure 69a, b et figure 58a, b, c). La température de l'eau est restée très près de 0 °C pendant toute la période de la débâcle dans cette section (figure 69c). La disparition rapide de la couverture de glace montre qu'elle a été libérée lors de l'ouverture des vannes du barrage et donc que le niveau d'eau n'a pas varié significativement à ce moment dû au contrôle réalisé par la structure hydraulique (figure 69d).

Pour conclure, le barrage Sartigan a maintenu une couverture de glace stationnaire sur la rivière CH qui s'est étendue jusqu'à la confluence de la rivière DL. Cette couverture a forcé la formation d'un embâcle dans le tributaire où le pont de la route 204 contraignait davantage cette section et a empêché l'évacuation des morceaux de glace de la rivière DL et des sections amont dans la CH elle-même.

Débâcle 2022

Le tableau 18 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2022 alors que les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 70.

Tableau 18. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2022 à la confluence DL.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

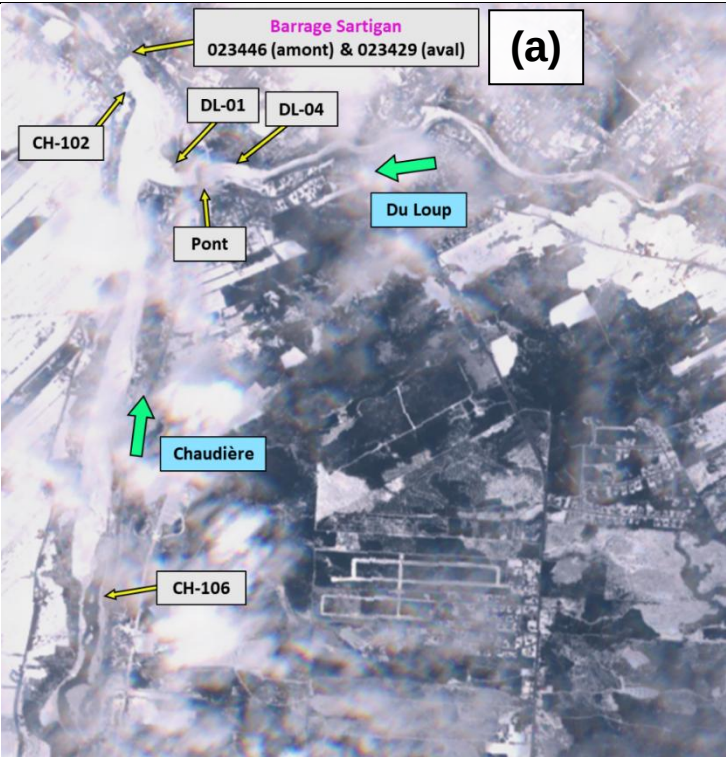
Description	Image
Image satellite prise le 18 mars 2022. Le couvert de glace est intact pour toutes les sections de la confluence DL, seule la zone en aval du barrage Sartigan commence à perdre son couvert.	

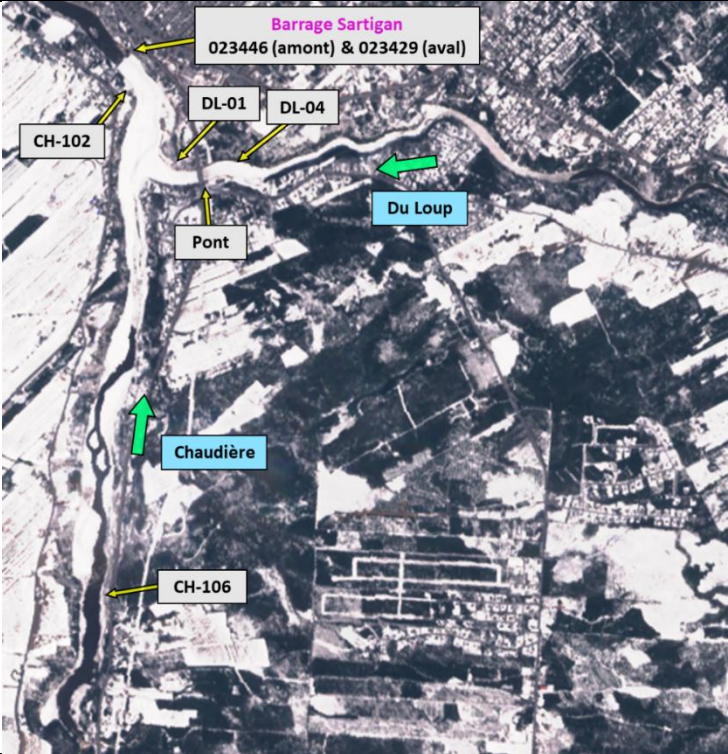
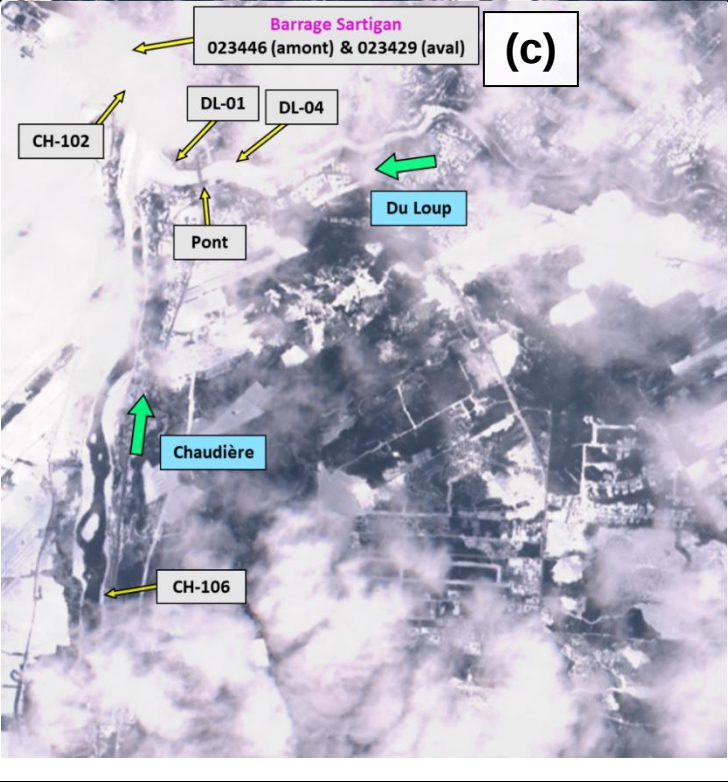
Image satellite prise le 23 mars 2022. Le couvert de glace commence à disparaître sur la CH en amont de la confluence DL et dans le tributaire à partir du km 3,4. La zone directement en aval du barrage Sartigan est libre de glace.	
Image satellite prise le 28 mars 2022. La perte du couvert de glace s'accroît dans la CH en amont de la confluence DL et le tributaire est majoritairement libre de glace à partir du km 2,7. Le couvert commence également à disparaître au niveau de la confluence dans la CH.	

Image d'un vol de drone prise le 31 mars 2022 à 10h14. L'embâcle formé durant la débâcle hivernale sur la rivière DL a formé le couvert de glace présenté sur cette image.	 (d) DL-04 Pont Chaudière Du Loup
Image d'un vol de drone prise le 31 mars 2022 à 10h35. Accumulation de morceaux de glace à partir de la rive droite de la CH en amont de la confluence DL réduisant la section d'écoulement.	 (e) CH-106 Chaudière

Image satellite prise le 2 avril 2022.

Mis à part les rives, le couvert de la CH est disparu à l'amont du barrage Sartigan. Il y a accumulation de morceaux de glace au barrage sur une longueur approximative de 500 m. La rivière DL est libre de glace à partir du km 1,9.

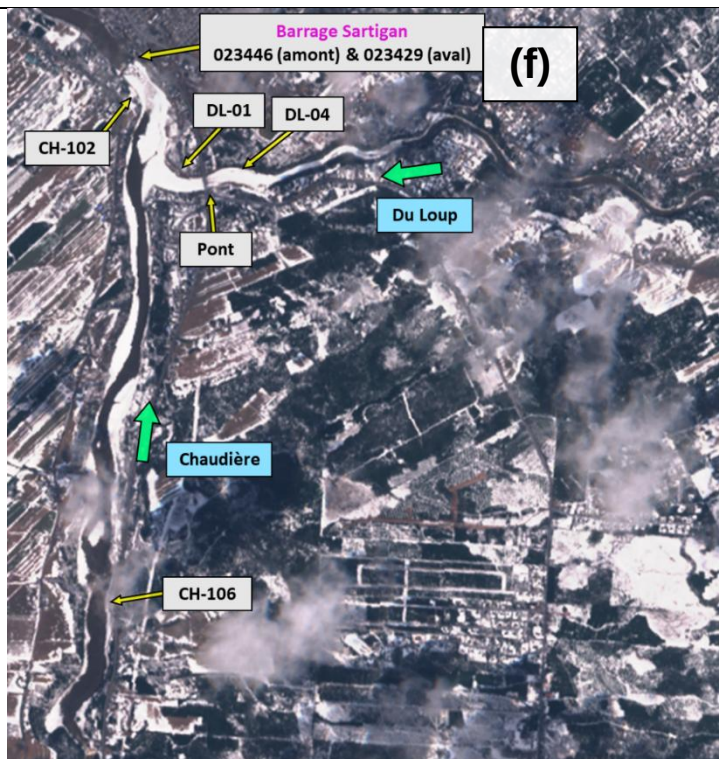


Image de caméra prise le 2 avril 2022 à 16h30.

Des morceaux du couvert de glace de la DL et de la CH commencent à s'accumuler à l'amont du barrage Sartigan.

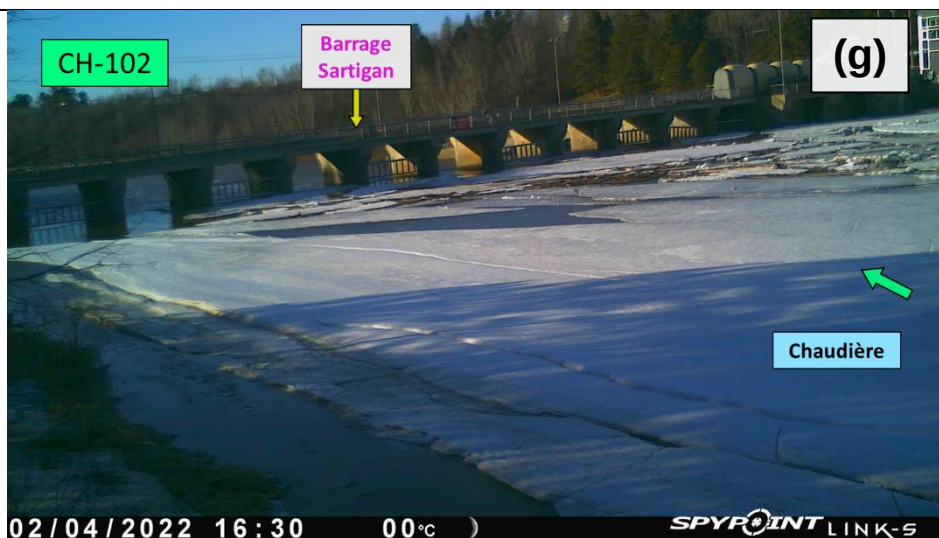


Image de caméra prise le 4 avril 2022 à 14h30. Des morceaux de glace provenant du bris de l'amont du tributaire commencent à s'accumuler à l'aval de la rivière DL.	 DL-04 (h) Du Loup TLC200 2022/04/04 14:30:05
Image de caméra prise le 5 avril 2022 à 13h30. Des morceaux de glace continuent à s'accumuler au km 0,4 de la rivière DL.	 DL-04 (i) Du Loup TLC200 2022/04/05 13:30:05
Image de caméra prise le 5 avril 2022 à 17h. Dernière image des morceaux du couvert de glace s'accumulant au site DL-04.	 DL-04 (j) Du Loup TLC200 2022/04/05 17:00:05

Image de caméra prise le 9 avril 2022 à 14h.

Dernière journée où des morceaux de glace s'accumulent à l'amont du barrage Sartigan sur la largeur entière de la CH.

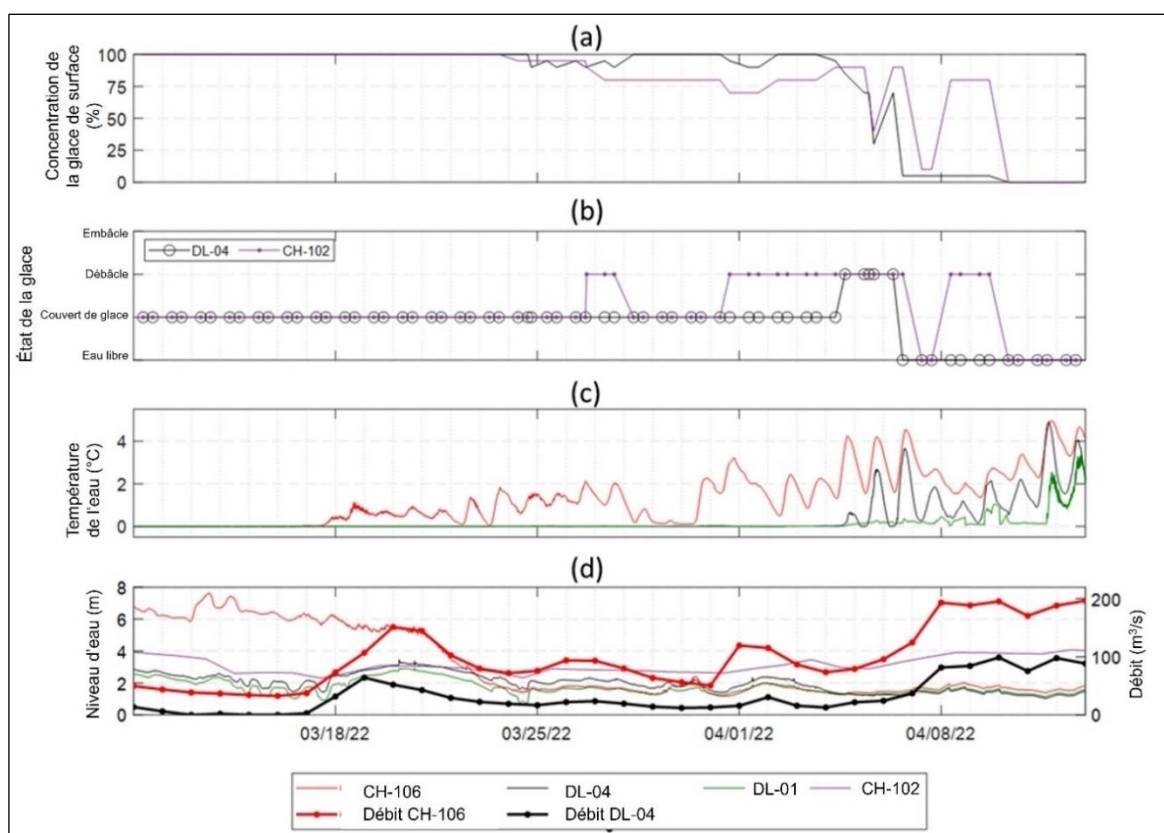


Figure 70. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2022 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 173,2 m à CH-106, 173,3 m à DL-04, 173,2 m à DL-01 et 171 m à CH-102.

La débâcle 2022 à la confluence DL a eu lieu en deux parties. La première partie a commencé dans la rivière principale à l'amont de la confluence où le couvert de glace au site CH-106 a disparu le 19 mars 2022, au même moment où une pluie de 25,4 mm a eu lieu et où la neige au sol a complètement fondu (figure 59d et tableau 18a). Le débit dans la CH s'est alors mis à augmenter tout comme la température de l'eau à ce site alors que le niveau d'eau a poursuivi sa diminution (figure 70c, d). Par la suite, dans la zone en amont de la confluence, une accumulation de morceaux de glace a été observée au site CH-106 en date du 31 mars 2022 (tableau 18e).

La seconde partie de la débâcle a eu lieu au mois d'avril 2022, à la confluence, puis dans le tributaire. Comme montré par l'image satellite au tableau 18f, la CH a perdu la moitié de son couvert de glace à la confluence le 2 avril 2022 alors que les DJDC-5 ont dépassé 100 °C.J (figure 59c et). La disparition de la glace s'est terminée dans le tributaire entre les 4 et 7 avril 2022 (DL-04), puis en amont du barrage Sartigan où le couvert a disparu le 5 avril 2022. Toutefois, des morceaux de glace provenant de l'amont se sont accumulés en amont du barrage jusqu'au 9 avril 2022, journée précédant le débit maximum de la saison de 196 m³/s (tableau 18g, k et figure 70a, b, d). La disparition finale de la glace peut être expliquée en partie par les pluies reçues entre le 7 et le 9 avril 2022 d'un total de 28,6 mm (figure 59d) ayant certainement contribué à la fonte des glaces.

Les accumulations de morceaux de glace se sont étendues jusque dans le tributaire, subsistant au site DL-04 jusqu'au 5 avril et au site DL-01 jusqu'au 8 avril 2022 (tableau 18h, i, j). Au moment où le tributaire a été complètement libre de glace, la température de l'eau s'est mise à augmenter dans celui-ci (DL-04 et DL-01), tout comme le débit (figure 70c, d).

En conclusion, le barrage Sartigan a bien contrôlé la glace à la confluence DL en amassant les morceaux du bris du couvert de glace à l'amont, provoquant une accumulation dans la CH et dans la rivière DL. Ceci a retardé l'évacuation du couvert de glace du tributaire jusqu'au moment où les morceaux accumulés ont pu se diriger vers la rivière principale pour aller fondre à l'amont du barrage.

Débâcle 2023

Le tableau 19 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023. Les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 71. Toutefois, en raison d'une forte couverture nuageuse durant la débâcle 2023, peu d'images satellite ont pu être utilisées.

Tableau 19. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023 à la confluence DL.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

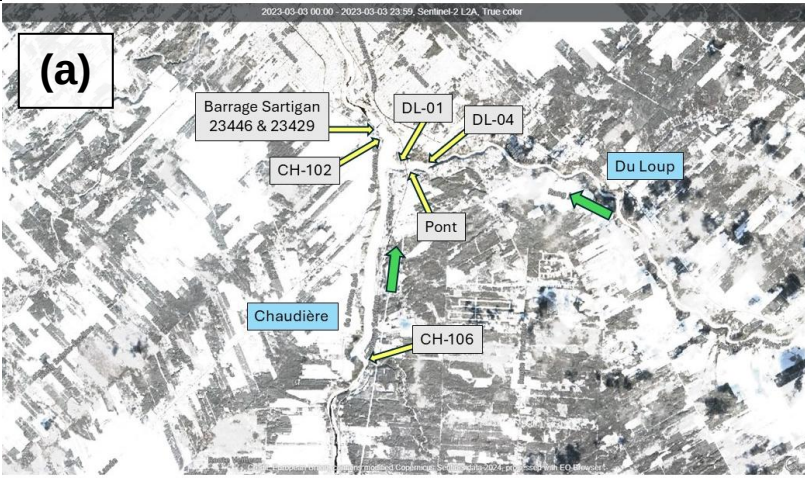
Description	Image
Image satellite prise le 3 mars 2023 à 15h50. Le couvert de glace à la confluence DL est intact.	(a) 
Image satellite prise le 7 avril 2023 à 15h50. Le couvert de glace à la confluence DL est intact, tandis qu'en aval du barrage Sartigan et dans le secteur de la caméra CH-106, l'eau est libre. Toutefois, la couverture nuageuse limite l'observation du couvert de glace de la rivière DL.	(b) 
Image de caméra prise le 2 avril 2023 à 16h30. Des morceaux de glace, détachés du couvert quelques mètres en amont, dérivent sur la CH et forment un embâcle entre 12h30 et 19h30.	(c) 

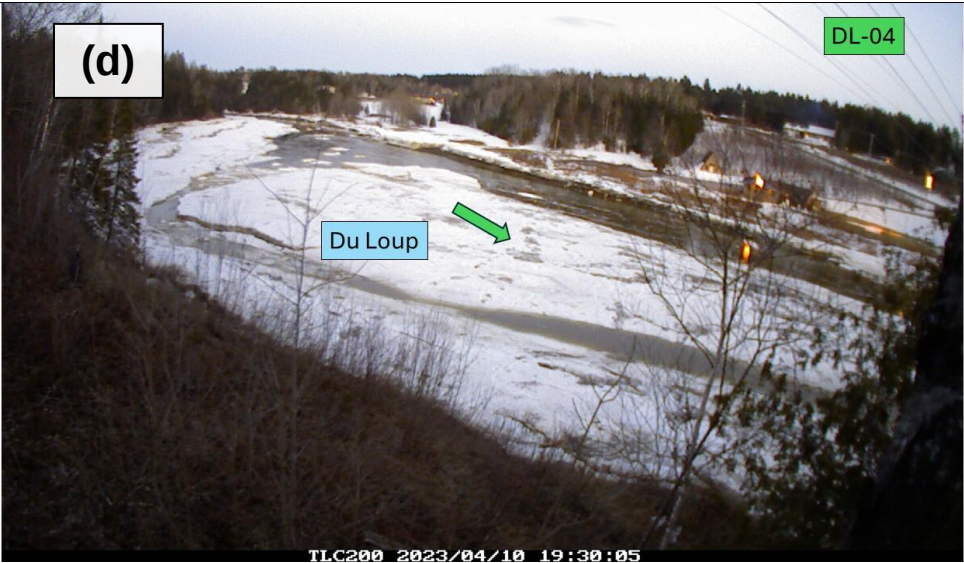
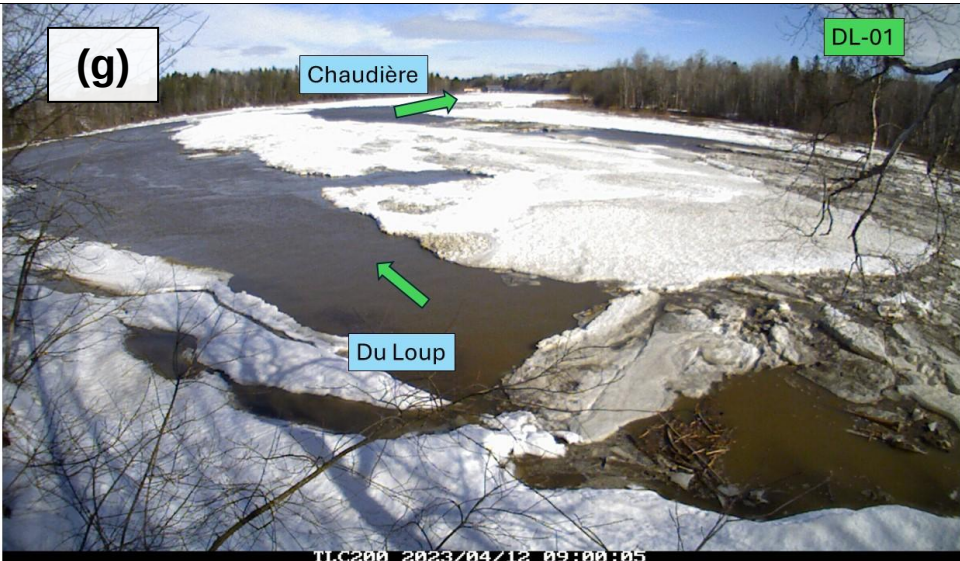
Image de caméra prise le 10 avril 2023 à 19h30. Une ouverture importante du couvert de glace est observée au site DL-04, phénomène qui se poursuit jusqu'à ce que l'eau devienne libre deux jours plus tard, le 12 avril.	(d) 
Image de caméra prise le 11 avril 2023 à 19h. La couverture de glace diminue tout au long de la journée, jusqu'à disparaître complètement sur cette section en fin de journée.	(e) 

Image de caméra prise le 12 avril 2023 à 8h. Le lendemain de la disparition du couvert de glace dans cette section, il y a présence d'un embâcle de glace. Quelques heures plus tard, un train de glace se forme et enfin l'eau redevient libre le jour suivant.	(f) 
Image de caméra prise le 12 avril 2023 à 9h. Un embâcle, formé dans la nuit du 11 au 12 avril 2023, demeure en place jusqu'à 10h. Dans les heures suivantes, la couverture de glace diminue jusqu'à ce que l'eau devienne libre vers 16h. Le lendemain, quelques morceaux de glace passent devant la caméra CH-102.	(g) 

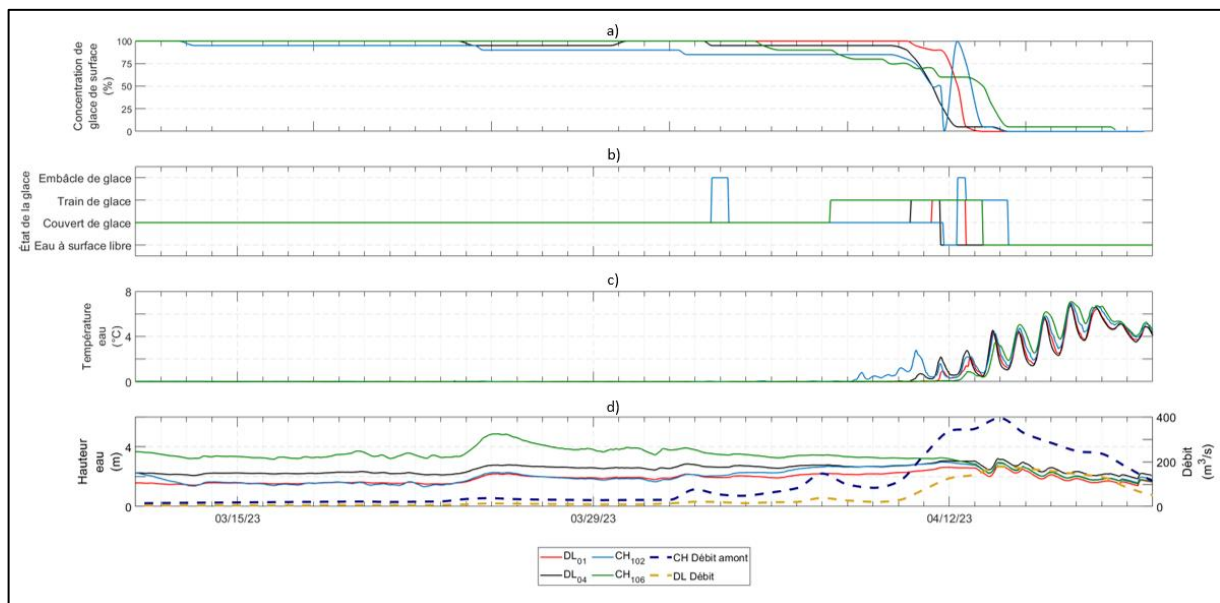


Figure 71. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2023 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 172,7 m à CH-106, 172,35 m à DL-04, 172,77 m à DL-01 et 172,55 m à CH-102.

La débâcle 2023 à la confluence DL a débuté dans la rivière principale, à l'aval de la confluence. Le site CH-102 a vu son couvert de glace se fragmenter vers le 23 mars, coïncidant avec une précipitation de 5 mm. À cette date, l'épaisseur de neige résiduelle au sol n'était plus que de 12 cm (figure 60c, d et e). Une légère augmentation du débit dans la CH est survenue peu après, soit au début du mois d'avril. Cette hausse de débit concorde avec la formation d'un embâcle de glace au site CH-102, le 3 avril (figure 71b et d). Par la suite, à partir du 8 avril, la température de l'eau s'est mise à augmenter et les niveaux d'eau à s'abaisser (figure 71c et d).

La seconde partie de la débâcle s'est déroulée au mois d'avril, d'abord dans le tributaire, puis dans la confluence. Le retrait complet de la glace dans le tributaire a été observé le 13 avril (DL-01) (tableau 19g). Ce même jour, un embâcle s'est formé dans le cours d'eau principal, en amont du barrage Sartigan (CH-102), en raison de l'accumulation des trains de glace provenant du tributaire (tableau 19débâcle 2023

le tableau 19 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023. les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 71. toutefois, en raison d'une forte couverture nuageuse durant la débâcle 2023, peu d'images satellite ont pu être utilisées.

tableau 19f). Parallèlement, des trains de glace supplémentaires, provenant du site amont de la confluence sur la CH (CH-106), se sont aussi accumulés en amont du barrage, libérant d'abord cette section de la CH de sa glace (figure 71). Cette accumulation de glace au barrage (CH-102) a fini par fondre sur place le 14 avril, date à laquelle le débit le plus élevé de la saison a été enregistré, soit 394,2 m³/s (tableau 19débâcle 2023

le tableau 19 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023. les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 71. toutefois, en raison d'une forte couverture nuageuse durant la débâcle 2023, peu d'images satellite ont pu être utilisées.

tableau 19h et figure 71d). La disparition complète de la glace peut être attribuée à la hausse de la température de l'air, qui a également entraîné la disparition de la neige au sol le même jour (figure 60c et e). À partir du moment où le tributaire s'est retrouvé libre de glace, une augmentation de la température de l'eau et du débit a été observée (figure 71c et d).

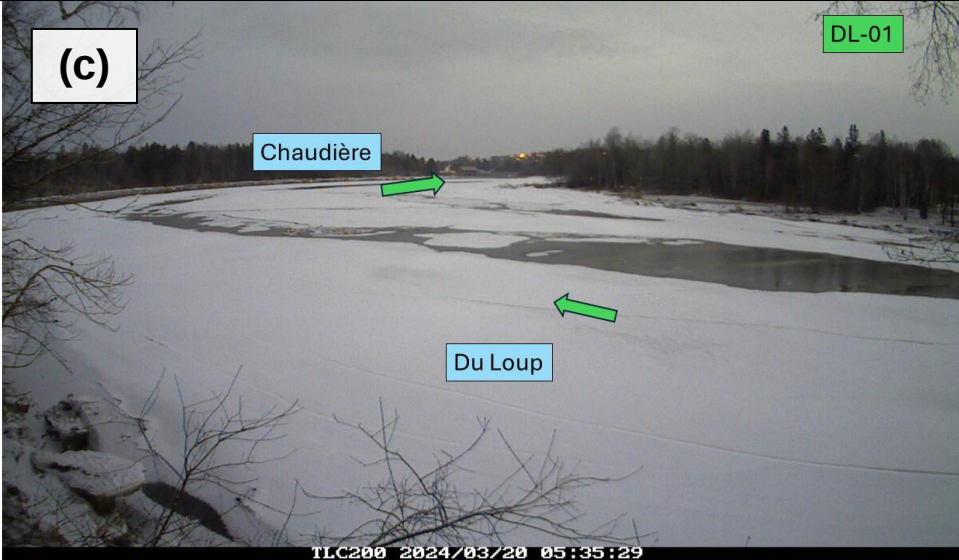
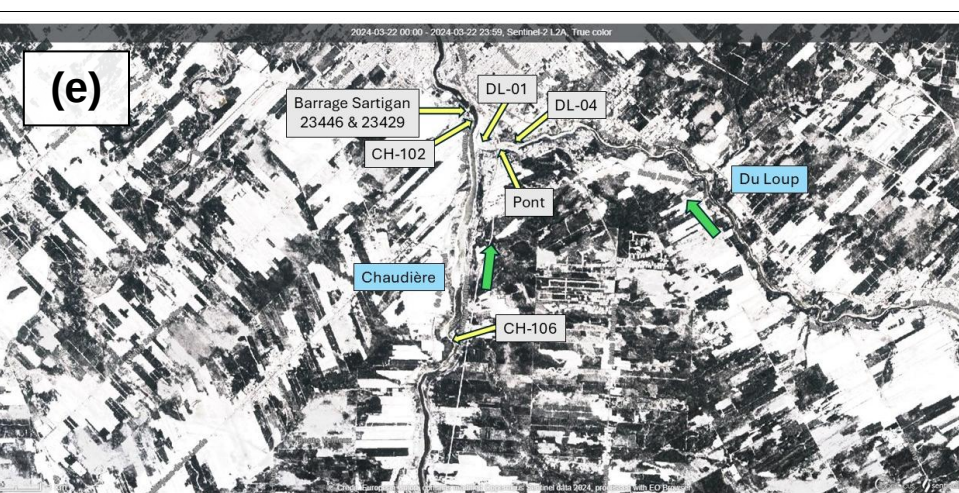
En conclusion, le barrage Sartigan a bien contrôlé la glace à la confluence DL en retenant les morceaux de glace provenant du couvert à l'amont. Ceci a entraîné une accumulation majoritairement dans la CH et retardé la libération du tributaire jusqu'à ce que la glace accumulée puisse se diriger vers la rivière principale et fondre en amont du barrage.

Débâcle 2024

Le tableau 20 présente des images satellite pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024. Ces images proviennent de caméras installées sur les sites et de vols de drones. Toutefois, comme la caméra au site CH-102 a été perdue pendant l'hiver, aucune image n'a pu être exploitée pour l'analyse de la débâcle 2024. De même, la caméra du site DL-04 est tombée en panne au cours de l'hiver, empêchant tout enregistrement de la débâcle sur ce site. Les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 72.

Tableau 20. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024 à la confluence DL.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

Description	Image
Image satellite prise le 2 mars 2024 à 15h50. Le couvert de glace à la confluence DL est intact, alors qu'en aval du barrage Sartigan l'eau est libre. En amont de la caméra CH-106, l'eau est également libre. Le couvert de glace est intact sur la rivière DL.	
Image de caméra prise le 7 mars 2024 à 17h45. Le 6 mars, le couvert de glace commence à se fracturer puis un train de glace fait son apparition. Le lendemain, le 8 mars, l'eau est en eau libre.	

Image de caméra prise le 20 mars 2024 à 5h35. Des morceaux de glace commencent à se détacher du couvert et laissent une ouverture dans la couverture de glace. Quelques jours plus tard, le 24 mars, le couvert de glace est à nouveau complet.	(c) 
Image de caméra prise le 22 mars 2024 à 12h30. Le 21 mars, l'eau est libre de glace au site CH-106. Le 22 mars, un embâcle se forme à partir de morceaux de glace provenant de l'amont. Le couvert de glace ainsi formé reste en place jusqu'au 9 avril, date à laquelle l'eau devient définitivement libre dans ce secteur.	(d) 
Image satellite prise le 22 mars 2024 à 15h50. Le couvert de glace à la confluence DL est intact sur le tributaire aux sites DL-01 et DL-04. Plus en amont sur la rivière DL, le couvert de glace commence à diminuer. Le couvert de glace sur la rivière CH est très aminci.	(e) 

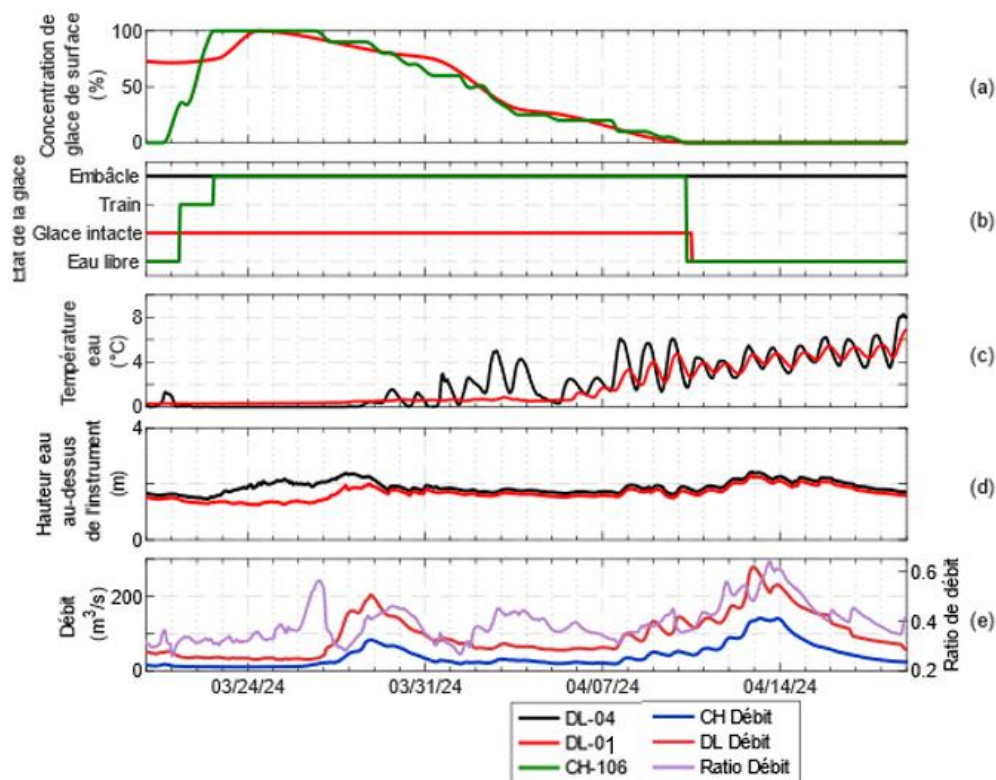
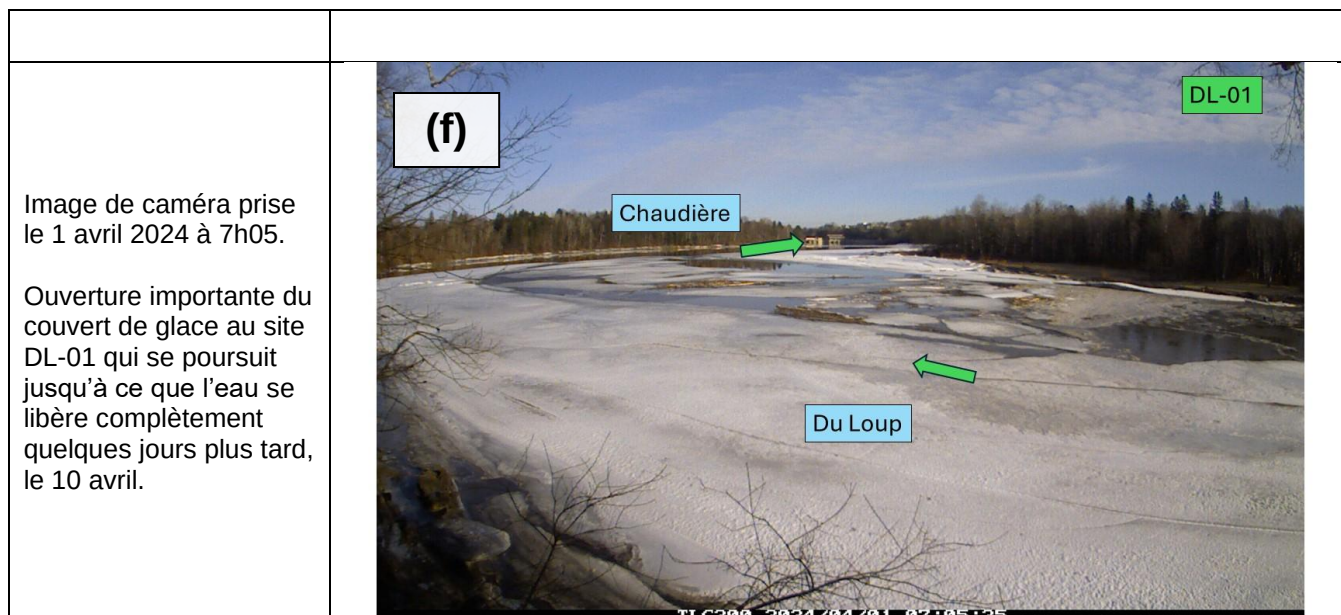


Figure 72. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence DL durant la débâcle 2024 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau; (d) niveau d'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 172,70 m à DL-04 et 172,82 m à DL-01.

La débâcle 2024 a commencé le 6 mars avec la fracture du couvert de glace au site CH-106, suivie par l'apparition d'un train de glace qui a conduit à une ouverture complète du couvert dès le 8 mars (tableau 20débâcle 2024

le tableau 20 présente des images satellite pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024. ces images proviennent de caméras installées sur les sites et de vols de drones. toutefois, comme la caméra au site ch-102 a été perdue pendant l'hiver, aucune image n'a pu être exploitée pour l'analyse de la débâcle 2024. de même, la caméra du site dl-04 est tombée en panne au cours de l'hiver, empêchant tout enregistrement de la débâcle sur ce site. les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 72.

tableau 20b). Cette période coïncide avec un premier épisode de pluie de 14 mm le 6 mars (figure 61d), contribuant à l'affaiblissement du couvert de glace. Par ailleurs, la température de l'air, déjà au-dessus de -5 °C en moyenne depuis le 2 mars, a entraîné une accumulation progressive des DJDC-5 et contribué à la déstabilisation du couvert de glace (figure 61b, c).

Après une première fonte partielle, la glace s'est reformée au site DL-01 (débâcle 2024

le tableau 20 présente des images satellite pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024. ces images proviennent de caméras installées sur les sites et de vols de drones. toutefois, comme la caméra au site ch-102 a été perdue pendant l'hiver, aucune image n'a pu être exploitée pour l'analyse de la débâcle 2024. de même, la caméra du site dl-04 est tombée en panne au cours de l'hiver, empêchant tout enregistrement de la débâcle sur ce site. les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 72.

tableau 20c et figure 72a). Cette accumulation a été encouragée par un refroidissement entre le 21 et le 25 mars, période durant laquelle les températures sont demeurées inférieures à -5 °C et interrompant temporairement l'augmentation des DJDC-5 (figure 61b, c). Le 22 mars, un embâcle de glace s'est formé au site CH-106 en raison de l'accumulation de morceaux de glace provenant de l'amont (débâcle 2024

le tableau 20 présente des images satellite pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024. ces images proviennent de caméras installées sur les sites et de vols de drones. toutefois, comme la caméra au site ch-102 a été perdue pendant l'hiver, aucune image n'a pu être exploitée pour l'analyse de la débâcle 2024. de même, la caméra du site dl-04 est tombée en panne au cours de l'hiver, empêchant tout enregistrement de la débâcle sur ce site. les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 72.

tableau 20d et figure 72b). Cet embâcle est resté en place jusqu'au 9 avril pour fondre tranquillement dans le tributaire au site DL-01 (figure 72a et b).

À partir du début avril, la hausse des températures de l'eau a entraîné une fonte accélérée du couvert de glace, notamment au site DL-01, où une large ouverture est apparue le 1^{er} avril (débâcle 2024)

le tableau 20 présente des images satellite pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024. ces images proviennent de caméras installées sur les sites et de vols de drones. toutefois, comme la caméra au site ch-102 a été perdue pendant l'hiver, aucune image n'a pu être exploitée pour l'analyse de la débâcle 2024. de même, la caméra du site dl-04 est tombée en panne au cours de l'hiver, empêchant tout enregistrement de la débâcle sur ce site. les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 72.

tableau 20f et figure 72c). Les 22,8 mm de pluie tombés entre le 10 et le 13 avril ont intensifié ce processus, menant à une libération complète des eaux sur l'ensemble des sites dès le 10 avril (figure 61d et figure 72b).

En conclusion, le barrage Sartigan a bien contrôlé la glace à la confluence DL en amassant les morceaux de glace provenant de l'amont, ce qui a provoqué une accumulation remontant majoritairement dans la CH. Ceci a retardé l'évacuation du couvert de glace du tributaire jusqu'au moment où les morceaux accumulés ont pu se diriger vers la rivière principale pour aller fondre à l'amont du barrage.

Résumé

La figure 73 présente les sites à la confluence DL où des embâcles hivernaux ont été observés, tandis que la figure 74 illustre ceux survenus au printemps, pour l'ensemble des saisons étudiées, soit 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024. Le tableau 21 et le tableau 22 précisent quant à eux les dates d'observation des embâcles ainsi que les instruments utilisés pour les détecter. Il est à noter que ces résultats reflètent uniquement l'information analysée et ne prétendent pas être exhaustifs.

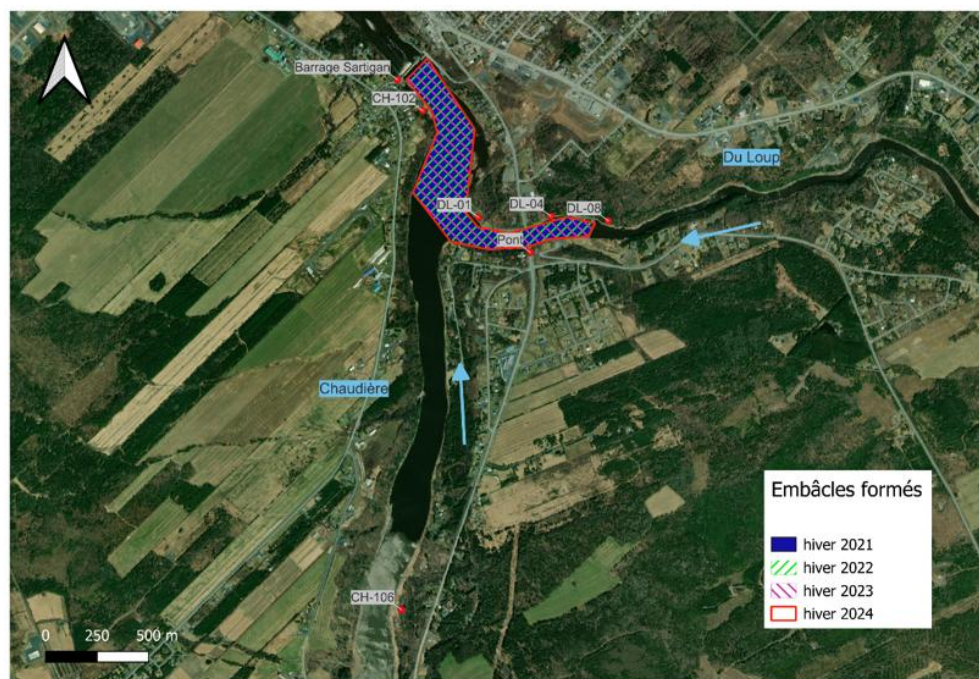


Figure 73. Embâcles hivernaux observés directement à la confluence DL pour toutes les saisons étudiées.

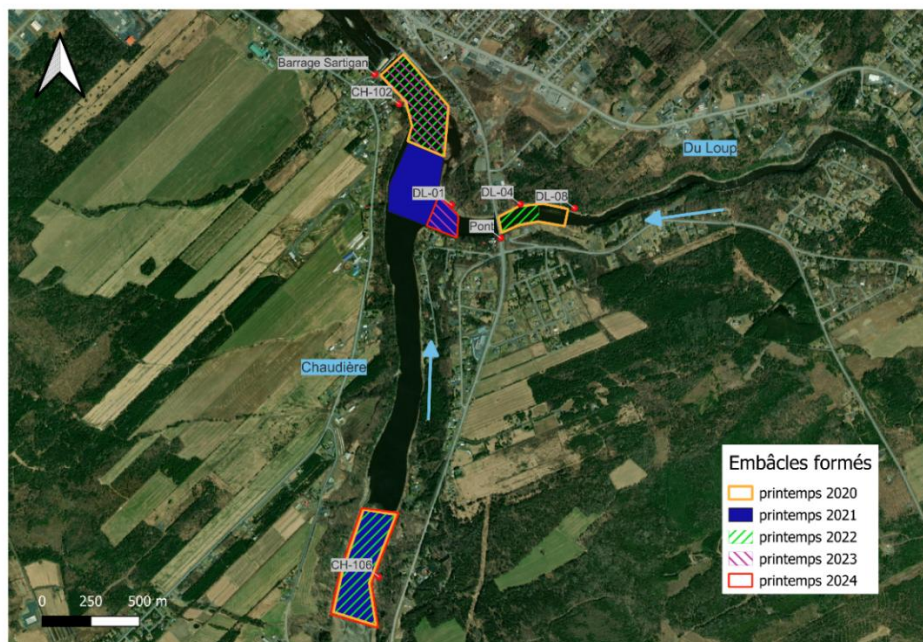


Figure 74. Embâcles printaniers observés directement à la confluence DL pour toutes les saisons étudiées.

Tableau 21. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles hivernaux observés à la confluence DL pour toutes les saisons étudiées.

Année	Instrument de capture	Rivière	Station	Date
2021	Caméra CH-102	Chaudière	km 102,7	25 décembre 2020 au 9 avril 2021
	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	20 novembre 2020 au 23 novembre 2020
	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	25 novembre 2020 au 27 novembre 2020
	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	6 décembre 2020 au 3 mars 2021
2022	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	24 novembre 2021 au 4 décembre 2021
	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	7 décembre 2021 au 2 avril 2022
2023	Caméra CH-102	Chaudière	km 102,7	5 janvier 2023 au 6 janvier 2023
	Caméra CH-102	Chaudière	km 102,7	8 janvier 2023 au 4 avril 2023
	Caméra DL-01	Du Loup	km 0,1	10 décembre 2022 au 19 décembre 2022
	Caméra DL-01	Du Loup	km 0,1	24 décembre 2022 au 10 avril 2023
	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	18 novembre 2022 au 20 novembre 2022
	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	1 ^{er} décembre 2022 au 5 décembre 2022
	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	10 décembre 2022 au 20 décembre 2022
	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	24 décembre 2022 au 9 avril 2023
2024	Caméra DL-04	Du Loup	km 0,4	21 décembre 2023 au 10 janvier 2024

Tableau 22. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles printaniers observés à la confluence DL pour toutes les saisons étudiées.

Année	Instrument de capture	Rivière	Station	Date
2020	Caméra DL-08	du Loup	km 0,8	5 avril 2020
	Caméra CH-120	Chaudière	km 120,1	11 mars 2020
	Vol de drone	Chaudière	km 107,8	12 mars 2020
	Caméra CH-102	Chaudière	km 102,6	7 avril 2020 au 9 avril 2020
2021	Caméra DL-13	du Loup	km 13,5	23 mars 2021
	Caméra DL-01	Chaudière	km 103,4	25 mars 2021 au 31 mars 2021
	Caméra CH-106	Chaudière	km 106,0	26 mars 2021
2022	Vol de drone	Chaudière	km 106,0	31 mars 2022
	Caméra CH-102	Chaudière	km 102,7	6 avril 2022
	Caméra CH-102	Chaudière	km 102,7	8 avril au 11 avril 2022
2023	Caméra CH-102	Chaudière	km 102,7	5 avril 2023 au 8 avril 2023
	Caméra CH-102	Chaudière	km 102,7	12 avril 2023
	Caméra DL-01	Du Loup	km 0,1	24 décembre 2022 au 10 avril 2023
2024	Caméra CH-106	Chaudière	km 106,0	22 mars 2024 au 9 avril 2024

Le barrage Sartigan situé en aval de la confluence DL remplit bien ses fonctions et contrôle la glace sur la rivière CH dans cette section. Durant toutes les saisons observées, les glaces provenant de la rivière principale et du tributaire se sont accumulées en amont de la structure de contrôle jusqu'à ce qu'elles fondent sur place ou soient libérées par l'ouverture des vannes (figure 74 et tableau 22). De plus, la débâcle hivernale ayant eu lieu au mois de décembre tend à former un embâcle au barrage Sartigan qui s'étend jusque dans le tributaire et constitue par la suite le couvert de glace pour le reste de l'hiver (figure 73 et tableau 21).

La formation d'embâcles dans cette section de la CH s'explique par deux facteurs principaux facteurs hydrologiques. D'une part, la rivière DL draine une surface représentant 29 % du bassin versant en amont de cette confluence, ce qui représente un apport hydrique considérable lors de la débâcle (tableau 1). Cette contribution importante peut accroître le volume et la vitesse d'écoulement à la confluence, favorisant ainsi l'accumulation de glaces transportées depuis l'amont. D'autre part, la pente du tributaire est deux fois plus élevée que celle de la rivière principale, ce qui accélère l'évacuation printanière et augmente la capacité de transport de la glace dans le tributaire (tableau 2). Lorsque ces glaces arrivent dans la section plus à faible pente de la rivière CH, elles tendent à ralentir et s'accumuler, créant ainsi des conditions propices à la formation d'embâcle. De plus, le pont de la route 204 situé près de l'embouchure du tributaire contribue à restreindre davantage le passage de la glace à cet endroit (figure 73 et figure 74). Ce sont ces facteurs qui ont mené à la construction du barrage Sartigan qui, en empêchant les inondations d'atteindre la ville de Saint-Georges, contribue à la création d'embâcles en amont de sa structure.

5.2.1.2 Confluence Famine

Cette section fait l'analyse des données de la confluence de la rivière FA dont la confluence se situe au km 97,5 dans la CH.

Débâcle 2020

Le

tableau 23 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drone, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2020. Les données recueillies par les traceurs GPS sont illustrées à la figure 75 et les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 76.

Tableau 23. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2020 à la confluence FA.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

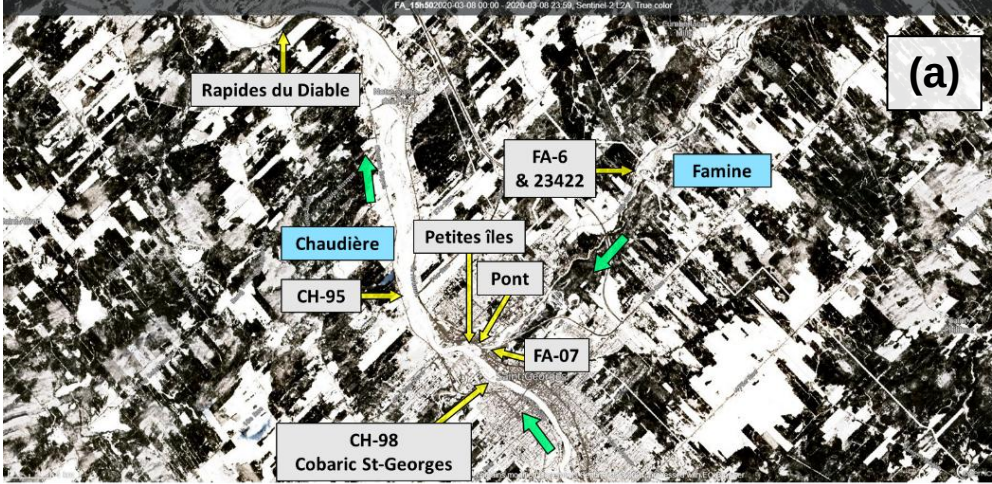
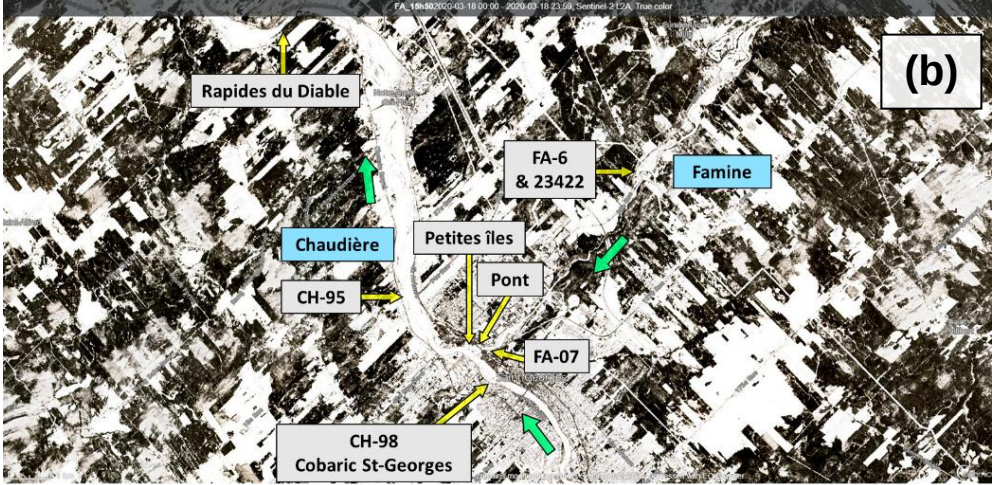
Description	Image
Image satellite prise le 8 mars 2020 à 11h50. Le couvert de glace est intact dans toutes les zones de la confluence FA. Un petit embâcle semble occuper le km 4 du tributaire.	 (a)
Image satellite prise le 18 mars 2020 à 11h50. Plusieurs ouvertures sont présentes dans le couvert de la FA entre les km 3,5 et 6,5. Le couvert dans la CH est intact.	 (b)

Image d'un vol de drone prise le 26 mars 2020 à 11h01. Petit embâcle au km 2,8 de la rivière FA et ouverture partielle dans le couvert.	(c) km 2,8 
Image d'un vol de drone prise le 26 mars 2020 à 11h02. Ouverture partielle du couvert de glace au km 2,5 de la rivière FA.	(d) km 2,5 

Image satellite prise le 28 mars 2020 à 11h50.

La FA est en eau libre à partir du km 3 (vers l'amont) et plusieurs ouvertures sont visibles dans le couvert entre les km 1 et 3. Le couvert dans la CH est majoritairement intact.

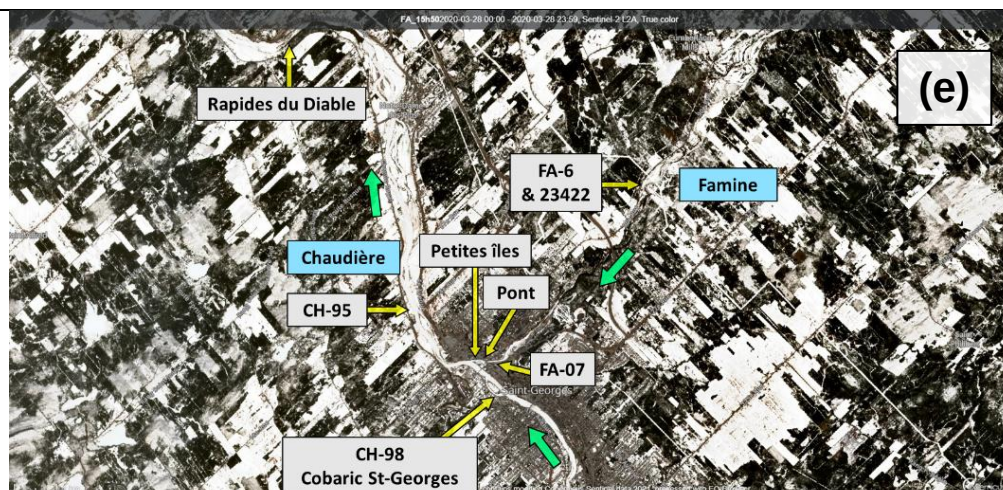


Image de caméra prise le 3 avril 2020 à 1h43.

Première image d'un embâcle occupant complètement la section CH-98.

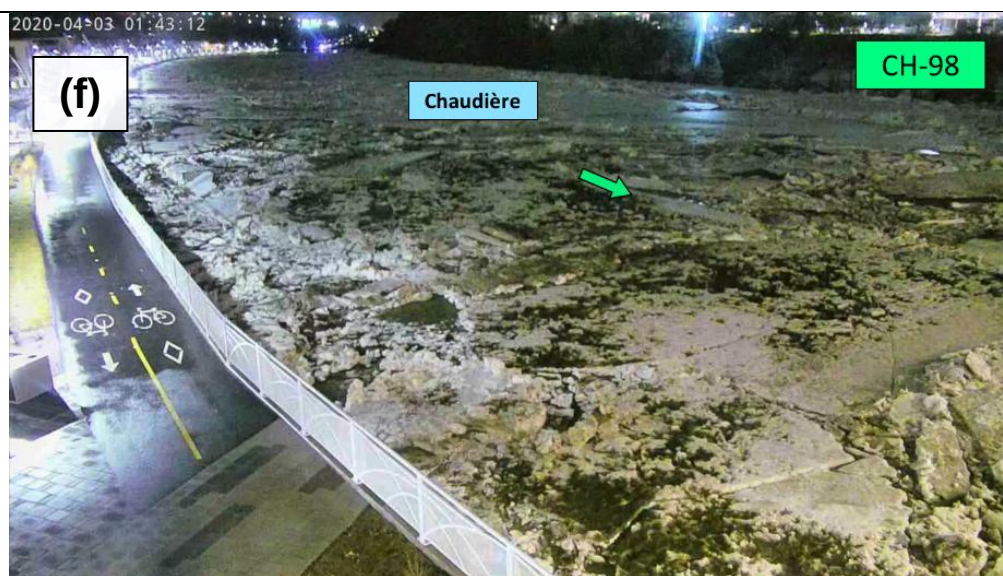


Image de caméra prise le 3 avril 2020 à 6h27. Résidus de l'embâcle formé quelques heures auparavant au site CH-98.	2020-04-03 06:27:12 (g) Chaudière CH-98 
Image de caméra prise le 3 avril 2020 à 7h34. Restes du couvert de glace coincé dans un coude de la rivière FA au km 6,6 (à gauche).	(h) FA-6 Famine  2020/04/03 07:34:25

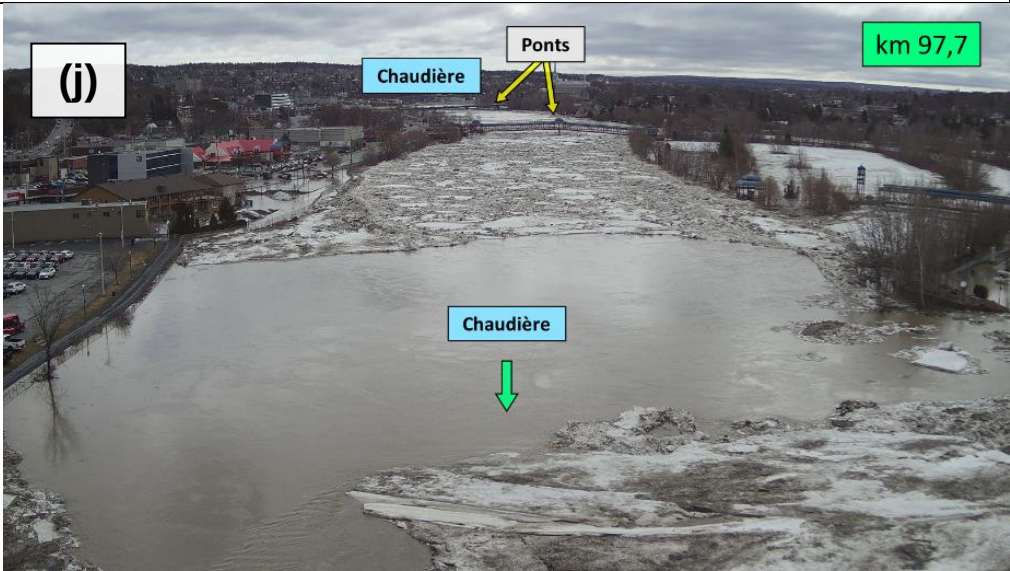
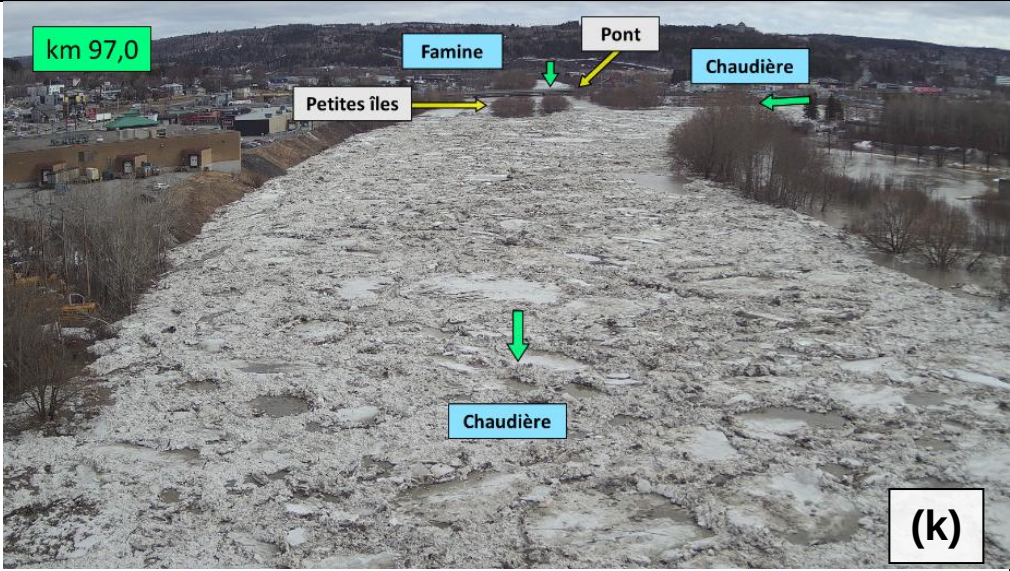
Image de caméra prise le 3 avril 2020 à 8h02. Morceaux du couvert de glace provenant de l'amont de la rivière FA coincés au site FA-07 devenu en eau libre quelques heures plus tôt.	 FA-07 Pont Famine (i) TLC200 2020/04/03 08:02:55
Image d'un vol de drone prise le 3 avril 2020 à 11h14. Embâcle hivernal dans la CH en amont de la confluence FA dans la section où un pont (passerelle piétonne de Saint-Georges permettant d'accéder à l'île Pozer) est présent. La section à l'aval de l'embâcle est en eau libre.	 (j) Ponts Chaudière Chaudière km 97,7

Image d'un vol de drone prise le 3 avril 2020 à 11h17. Embâcle hivernal dans la CH en aval de la FA qui s'étend à l'intérieur du tributaire où le pont-route 173 est présent et à l'amont de la confluence.	
Image d'un vol de drone prise le 3 avril 2020 à 11h17. Embâcle hivernal dans la CH en aval de la FA avec son pied à l'île aux chèvres.	

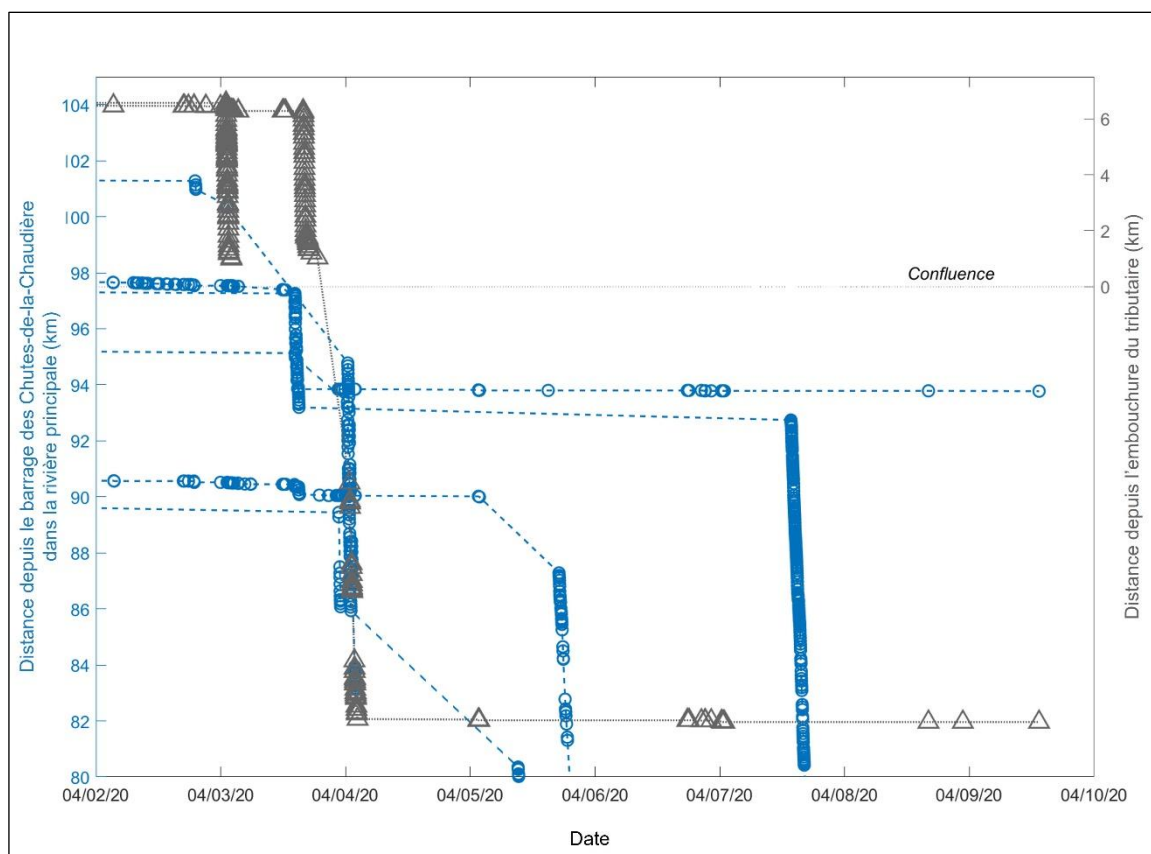


Figure 75. Données de traceurs GPS pour la confluence FA durant la débâcle 2020.

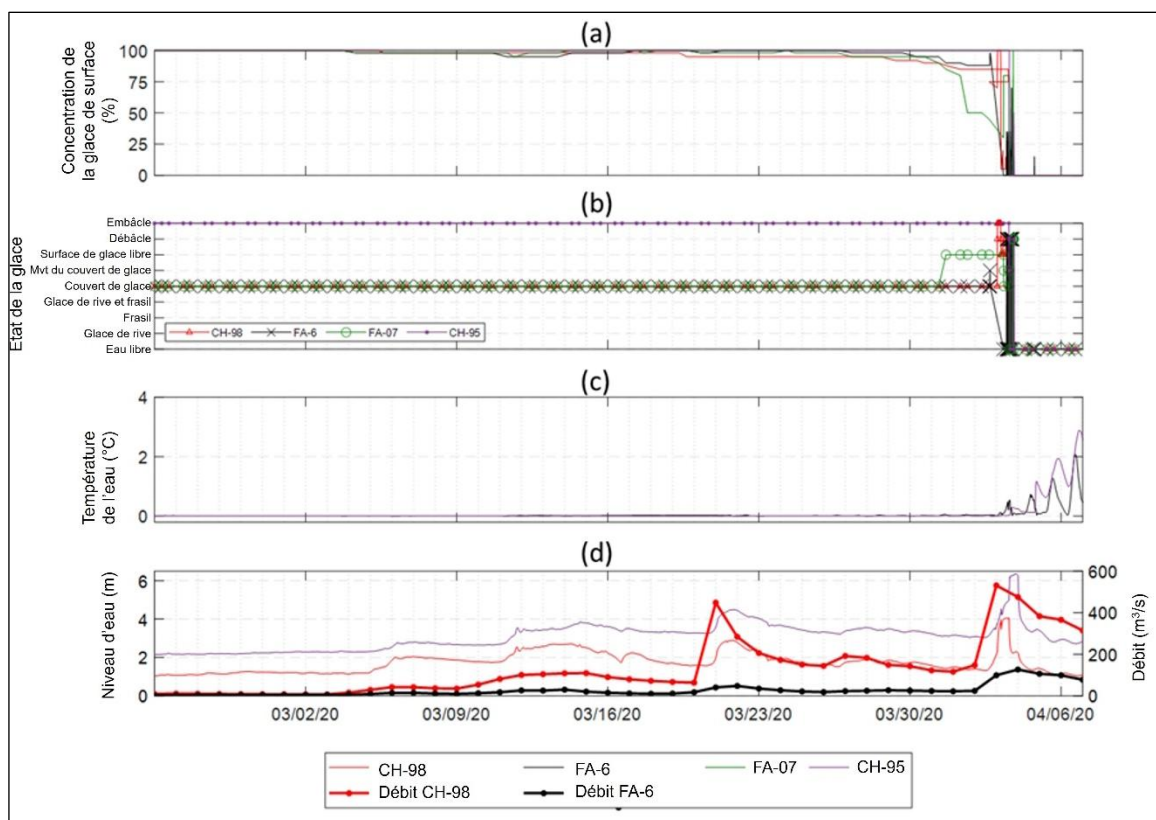


Figure 76. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2020 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 161,0 m à CH-98 et 156,2 m à CH-95.

À la confluence FA, le couvert de glace est complètement disparue au même moment dans toutes les sections, soit le 3 avril 2020, en raison d'un événement pluvieux de 15,4 mm le 2 avril 2020 combiné à un DJDC-5 de 104,0 °C.J (figure 76a, b et figure 57c, d). La disparition du couvert de glace s'est amorcée dans le tributaire, de l'aval vers l'amont, puis s'est poursuivie dans la CH elle-même. Le couvert de glace est d'abord devenu partiel dans l'aval du tributaire, soit à partir du 26 mars 2020 au km 2,8 (

tableau 23c, d) à la suite d'une pluie de 3,6 mm (figure 57d) et du 31 mars au site FA-07 (figure 76a, b) à la suite d'un DJDC-5 de 89,1 °C.J (figure 57c). Le 3 avril 2020, le débit au site FA-6 a atteint une valeur de 99 m³/s, ce qui représente une augmentation de trois fois le débit moyen de la saison (figure 76d). Cela a entraîné l'élévation du niveau d'eau et par conséquent, la libération de la glace qui était restée piégée dans le méandre de la rivière à cet emplacement (figure 76d et

tableau 23h), ainsi que de la glace provenant du tributaire entre ce point et le km 1 (figure 75). La présence du pont-route 173 et d'un banc d'accumulation à l'aval de celui-ci à l'embouchure de la FA a rendu cette augmentation de débit nécessaire au déplacement du couvert de glace dans le tributaire étant donné que ces structures naturelles et anthropiques agissent comme des obstacles et entravent la circulation des glaces dans la rivière. À la suite de cela, la température de l'eau du tributaire en eau libre a connu une augmentation (figure 76c).

Le débit maximal de la saison pour cette confluence a été atteint dans la CH le 3 avril 2020 avec une valeur de 531 m³/s (figure 76d) et le bris du couvert résultant a engendré une extension d'accumulation de l'embâcle présent à la confluence (CH-98). En effet, un vol de drone effectué le 3 avril 2020 a permis de constater qu'un embâcle d'une longueur approximative de 1,5 km s'était formé durant la débâcle hivernale, s'étendant sur la confluence entière dans la CH ainsi que dans l'embouchure du tributaire (

tableau 23f, g, j, k, l). La CH est la dernière section où la couverture de glace s'est mise à disparaître cette journée, à la fois à l'amont et à l'aval de la confluence (CH-95 et CH-98) (figure 75). La température (CH-95) ainsi que le niveau d'eau (CH-95 et CH-98) se sont alors mis à augmenter dans la rivière principale (figure 76c, d).

En conclusion, la débâcle de la confluence FA a été simultanée pour toutes les sections observées et, en conséquence, il n'y a pas eu de congestion entre les glaces du tributaire et de la rivière CH. Un débit de 99 m³/s dans le tributaire a finalement assuré le bris du couvert de glace et leur passage au-delà du banc d'accumulation et du pont-route 173 situés à l'embouchure de la rivière FA.

Débâcle 2021

Le tableau 24 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drone pertinentes, pour l'analyse de la débâcle 2021. Les données recueillies par les traceurs GPS sont illustrées à la figure 77 et les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 78.

Tableau 24. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021 à la confluence FA.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

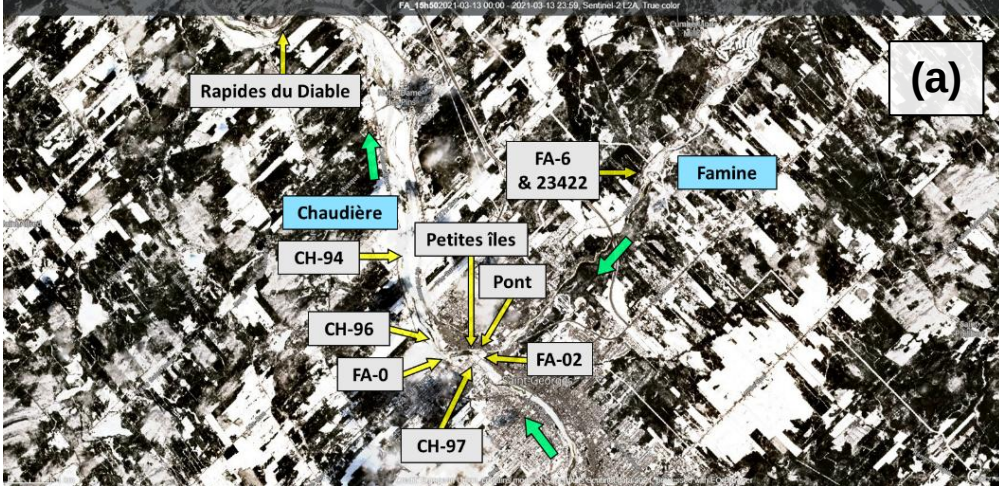
Description	Image
Image satellite prise le 13 mars 2021 à 10h50. Le couvert de glace comporte un trou important à la confluence dans la CH et une ouverture longitudinale est présente à l'aval de la confluence (jusqu'au km 95,5). Le couvert est intact dans la FA et ailleurs dans la CH.	
Image de caméra prise le 22 mars 2021 à 12h01. Embâcle au site CH-96 formé de la descente du couvert de glace de la section en amont dans la rivière. Le site CH-96 était en eau libre plusieurs jours auparavant et l'est redevenu cinq heures plus tard.	

Image satellite prise le 23 mars 2021 à 11h50.

La rivière est en eau libre entre le pont-route 173 dans la rivière FA jusqu'à 1 km en aval de la confluence dans la CH. Le couvert est majoritairement intact ailleurs dans la CH et dans la FA.

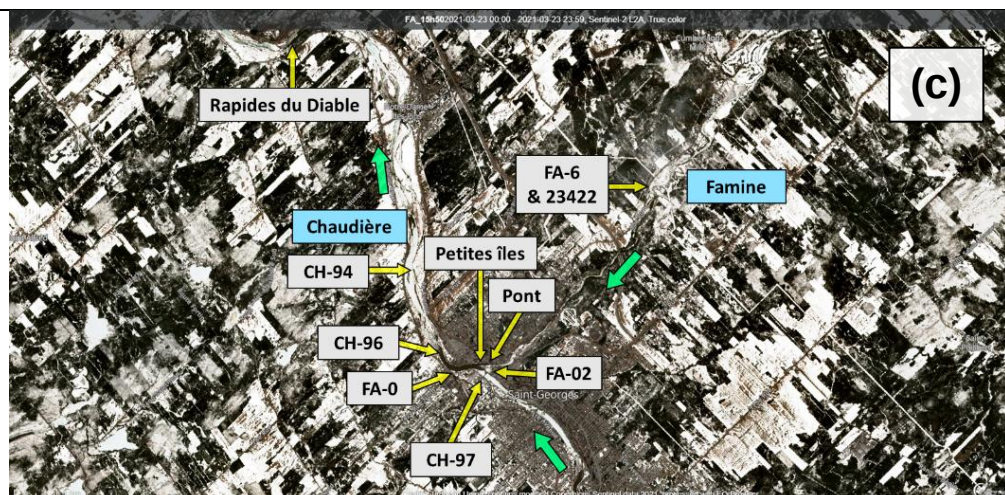


Image de caméra prise le 23 mars 2021 à 12h01.

Passage d'un embâcle au site CH-96 formé de la glace des sections plus en amont dans la CH.



Image d'un vol de drone prise le 23 mars 2021 à 16h27. Embâcle hivernal dans la CH autour de l'île aux chèvres située au km 96. La partie de la rivière en amont de l'embâcle est libre de glace.	(e) km 96,4 île Chaudière
Image de caméra prise le 25 mars 2021 à 10h06. Partie du couvert de glace coincé dans un coude de la rivière FA au km 6,6.	(f) FA-6 Famine TLC200 2021/03/25 10:06:18

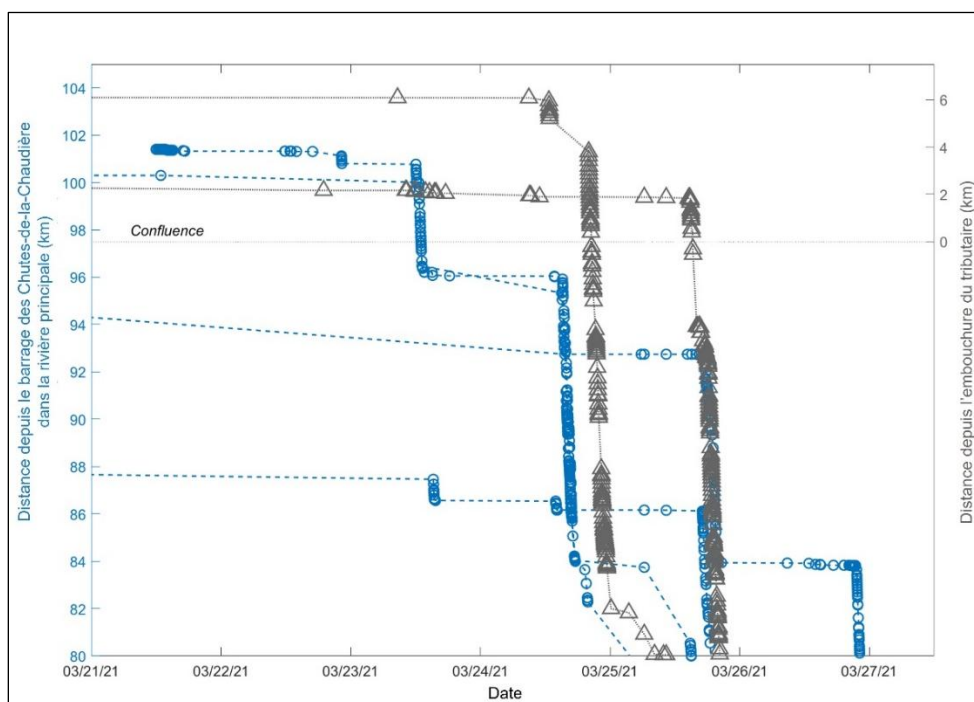
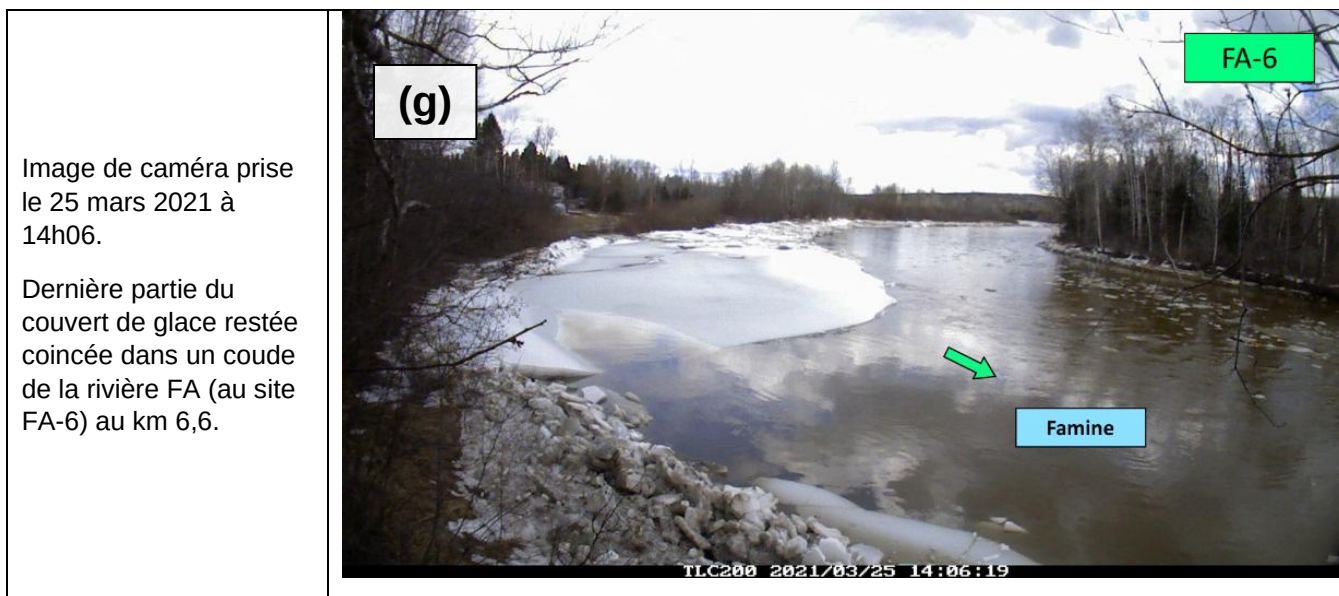


Figure 77. Données de traceurs GPS pour la confluence FA durant la débâcle 2021.

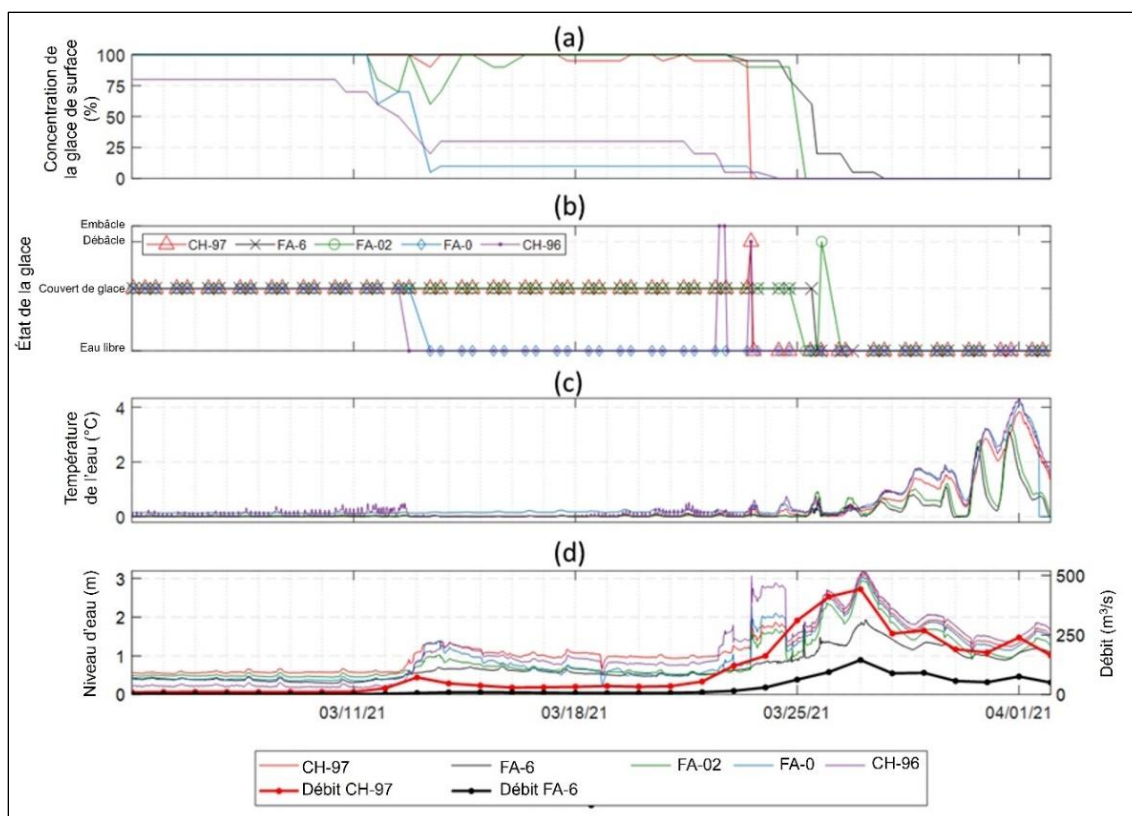


Figure 78. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2021 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 158,7 m à CH-97, 158,7 m à FA-02, 207,5 m à FA-6, 158,2 m à FA-0 et 157,4 m à CH-96.

Tout d'abord, les sections à la confluence (FA-0) et immédiatement en aval de la confluence (CH-96) ont perdu leur couverture de glace entre le 11 et le 13 mars 2021 (figure 78a, b et tableau 24a). Ceci s'est produit en réponse aux températures de l'air plus chaudes qui ont entraîné une augmentation des DJDC-5 qui sont passés de 6,2 °C.J à 30,7 °C.J entre le 10 et le 13 mars 2021 (figure 58a, b). Il est à noter que la couverture de glace du site CH-96 a été affectée par les rejets d'eau chaude de la station d'épuration de Saint-Georges située à 0,8 km en amont du site (Figure 17). Par conséquent, un chenal ouvert occupant environ 20 % de la largeur de la rivière a persisté pendant tout l'hiver à cet endroit (figure 78a). L'effet de la station de traitement de l'eau est également visible dans les pointes plus chaudes des températures de l'eau au site CH-96 (figure 78c). Dix jours après la perte du couvert de glace des sections en aval, le site en amont de la confluence (CH-97) a également perdu sa couverture de glace (figure 78a, b) ce qui a formé une accumulation de glace au km 96 dans la CH (tableau 24b, d, e). Dès la disparition complète du couvert de glace, soit le 23 mars 2021, la température de l'eau a commencé son augmentation sur les trois sites dans la CH (figure 78c). Enfin, dans la

CH, le couvert est disparu entre le km 100,8 et le site CH-97 en date du 24 mars 2021 (figure 77).

La rivière FA a perdu son couvert de glace entre les km 6,1 et 0,4 dans la nuit du 24 au 25 mars 2021 à la suite d'une précipitation de 4 mm et d'une température ambiante de 20,6 °C (figure 77 et figure 58.b, c). Le bris du couvert de glace a été causé par l'augmentation du débit ayant atteint une valeur de 63 m³/s le 25 mars 2021 (figure 78d). Bien que la section dans la CH en aval de la confluence ait perdu sa couverture 10 jours plus tôt, le débit dans la FA n'était pas assez élevé pour pouvoir soulever et déloger la couverture de glace au-delà du pont-route 173 et du banc d'accumulation situés à l'embouchure du tributaire. FA-02 a été entièrement libéré de sa glace en une nuit, tandis qu'une partie de la couverture de glace est restée à FA-6 une demi-journée supplémentaire en raison de la présence d'un méandre prononcé dans la rivière à cet endroit (tableau 24f, g). Après la disparition complète de la couverture de glace dans le tributaire, la température de l'eau a commencé à augmenter dans les deux sections observées pour celui-ci (figure 78c). Le débit maximal a été atteint deux jours plus tard, soit le 27 mars, 2021 dans la rivière FA comme dans la rivière CH avec des valeurs de 145 m³/s et 442 m³/s, respectivement (figure 78d).

En conclusion, le processus de débâcle à la confluence FA s'est produit de l'aval vers l'amont dans la rivière CH et finalement dans le tributaire lui-même. Ceci implique que la glace dans la rivière principale n'a pas contrôlé l'évacuation de la glace dans le tributaire, mais il semble plutôt y avoir eu un contrôle morphologique dû à la présence de banc d'accumulation et du pont-route 173 à l'embouchure du tributaire. Un débit minimal de 63 m³/s dans la rivière FA a été nécessaire pour évacuer la glace du tributaire.

Débâcle 2022

Le tableau 25 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drone, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2022. Les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 79.

Tableau 25. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2022 à la confluence FA.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

Description	Image
Image satellite prise le 23 mars 2022. Le couvert de glace est intact dans toutes les zones de la confluence FA, mis à part un trou au centre du couvert dans la CH en amont de la confluence. La FA est complètement libre de glace à partir du km 1,6 vers l'amont.	
Image de caméra prise le 24 mars 2022 à 17h30. L'embâcle formé durant la débâcle hivernale sur la CH en aval de la confluence FA a formé le couvert de glace illustré sur cette image.	

Image de caméra prise le 26 mars 2022 à 8h30. Un embâcle est apparu dans la CH en amont de la confluence FA durant la nuit du 25 au 26 mars 2022. Cet embâcle est vu clairement pour la première fois sur cette image.	 Image (c) shows a river with a large ice jam (embâcle) in the foreground. A dam labeled 'Chaudière' is visible in the background. The image is labeled 'CH-97' in the top left and '(c)' in the top right. The timestamp at the bottom is 'TLC200 2022/03/26 08:30:05'.
Image de caméra prise le 26 mars 2022 à 9h. L'embâcle apparu la nuit précédente dans la CH en amont de la FA se déplace vers la confluence et croit en longueur.	 Image (d) shows the ice jam moving downstream. The dam 'Chaudière' is still visible. The image is labeled 'CH-97' in the top left and '(d)' in the top right. The timestamp at the bottom is 'TLC200 2022/03/26 09:00:05'.
Image de caméra prise le 26 mars 2022 à 11h30. Le couvert de glace dans la CH en aval de la confluence commence à se briser.	 Image (e) shows the ice jam breaking apart. The dam 'Chaudière' is visible in the background. The image is labeled 'CH-96' in the top left and '(e)' in the top right. The timestamp at the bottom is 'TLC200 2022/03/26 11:30:05'.

Image de caméra prise le 26 mars 2022 à 13h. L'embâcle formé la nuit précédente dans la CH en amont de la FA se déplace vers la confluence.	
Image de caméra prise le 26 mars 2022 à 16h. L'embâcle situé dans la CH en amont de la confluence FA connaît une ouverture en son centre, laissant ainsi l'eau s'écouler librement au centre de la rivière.	
Image de caméra prise le 26 mars 2022 à 18h. Dernière image captée de l'embâcle apparu dans la CH en amont de la FA la nuit précédant sa disparition.	

Image de caméra prise le 27 mars 2022 à 10h. Consolidation de l'embâcle situé dans la CH en aval de la confluence FA.	 CH-96 (i) Chaudière TLC200 2022/03/27 10:00:05
Image de caméra prise le 27 mars 2022 à 13h. Dernière image de l'embâcle formé dans la CH en aval de la confluence FA.	 CH-96 (j) Chaudière TLC200 2022/03/27 13:00:05

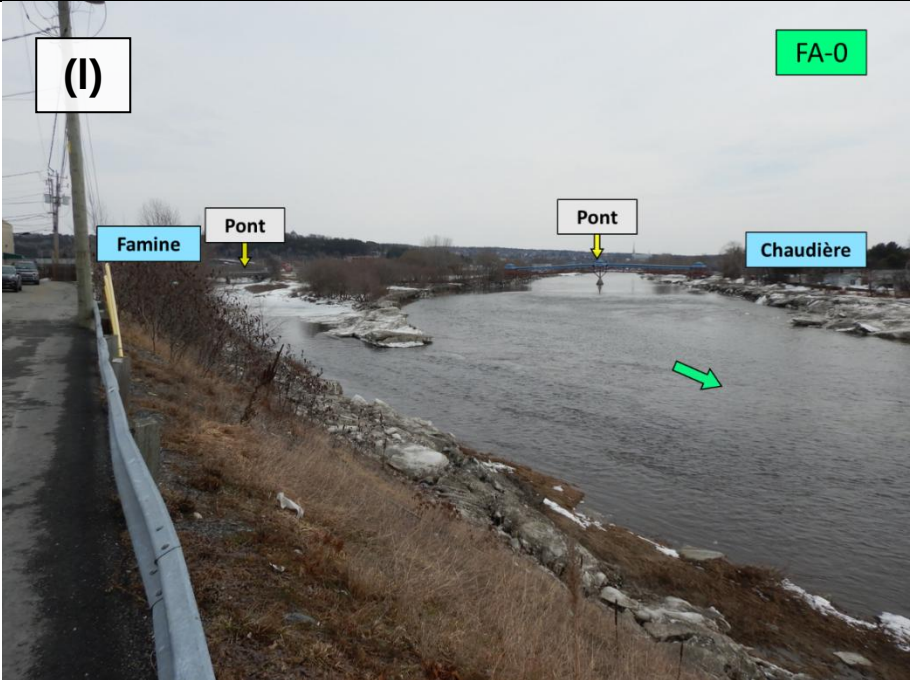
Image d'un vol de drone prise le 31 mars 2022 à 11h56. Le couvert de glace est majoritairement intact dans la FA alors que la CH est en eau libre à la confluence.	(k) FA-0 
Image d'un vol de drone prise le 31 mars 2022 à 11h58. Le couvert de glace est majoritairement intact dans la FA alors que la CH est en eau libre dans cette section, en amont comme en aval de la confluence.	(l) FA-0 

Image satellite prise le 2 avril 2022.

À la confluence FA, la CH et le tributaire sont complètement libres de glace.

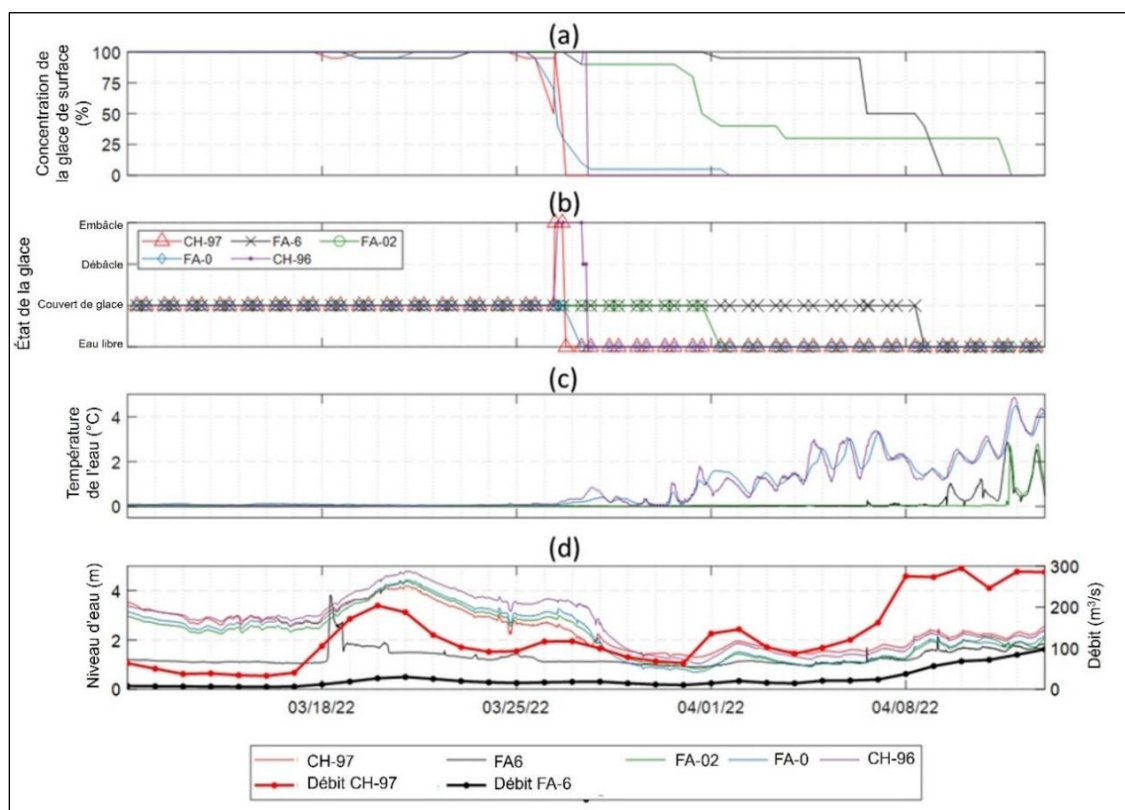


Figure 79. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2022 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 158,5 m à CH-97, 207,7 m à FA-6, 159,2 m à FA-02, 158,5 m à FA-0 et 157,6 m à CH-96.

La débâcle 2022 à la confluence FA a débuté dans la CH, de l'amont vers l'aval. Les sites en amont de la confluence (CH-97) et à la confluence (FA-0) ont été les premiers à perdre leur couvert de glace le 26 et le 27 mars 2022, à la suite d'une petite augmentation de débit et de température de l'eau (FA-0 et CH-97) dans la CH (figure 79). Un maximum local des DJDC-5 le 27 mars 2022 avec une valeur de 89 °C.J semble avoir contribué à ce phénomène (figure 59c). Le 26 mars 2022, des embâcles se sont formés à la fois à l'amont (CH-97) et à l'aval (CH-96) de la confluence, mais ne se sont pas étendus à la confluence elle-même (tableau 25b, c, d, e, f, g, h, i, j et figure 79b). Ces sites ont alors été libres de glace à la suite de la disparition de l'accumulation, soit le 27 mars 2022 pour CH-97 et le 28 mars 2022 pour CH-96. Ce n'est qu'une semaine plus tard que le débit dans la CH a entamé une croissance continue jusqu'à la fin de la saison, soit à partir du 4 avril 2022, pour atteindre son maximum avec une valeur de 294 m³/s le 10 avril 2022 (figure 79d).

La perte du couvert de glace s'est terminée dans le tributaire, de l'aval vers l'amont. Tout d'abord, la majorité du couvert de glace à l'aval du tributaire (FA-02) est disparue entre le 31 mars et le 4 avril 2022, à la suite d'une diminution approximative de 3,5 m du niveau d'eau durant les 10 jours précédents (figure 79a, d). Cette perte du couvert a été encouragée par une pluie de 3 mm le 31 mars 2022 (figure 59d). Par la suite, la glace située à l'amont dans le tributaire (FA-6) s'est retirée alors que le débit du tributaire est passé de 21 m³/s à 56 m³/s pour poursuivre son augmentation jusqu'à la fin de la débâcle entre le 6 et le 9 avril 2022 (figure 79a, d). Une pluie, totalisant 28,6 mm entre le 7 et le 9 avril 2022, a d'autant plus contribué à l'augmentation du débit (figure 59d). La température de l'eau s'est mise à croître dès la disparition complète du couvert de glace au site FA-6 (figure 79c). Pour terminer, le 30 % du couvert restant à l'aval (FA-02) est disparu durant la nuit du 11 au 12 avril 2022 en raison d'un débit de 72 m³/s dans la FA, après quoi la température de l'eau a commencé à augmenter à cet endroit (figure 79a, c).

En conclusion, la perte simultanée du couvert de glace de la CH dans toutes les zones étudiées autour de la rivière FA a créé quelques embâcles dans la rivière principale. Le tributaire est quant à lui resté libre d'accumulations puisqu'il s'est libéré alors que la CH était en eau libre. De plus, un débit de 72 m³/s a été nécessaire dans le tributaire pour permettre le passage des morceaux du couvert de glace restants au-delà du banc d'accumulation situé à l'embouchure de la FA à la fin de la saison.

Débâcle 2023

Le tableau 26 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drone, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023. Les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 80.

Tableau 26. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023 à la confluence FA.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

Description	Image
Image satellite prise le 3 mars 2023 à 15h50. Le couvert de glace est intact dans toutes les zones de la confluence FA, mis à part un trou le long de la berge de la CH légèrement en aval de la confluence. Le couvert est intact dans la FA et ailleurs dans la CH.	 (a)
Image caméra prise le 25 mars 2023 à 11h. Des morceaux de glace s'accumulent pendant la nuit formant un embâcle au site CH-96. Le lendemain, la rivière est en eau libre.	 (b)

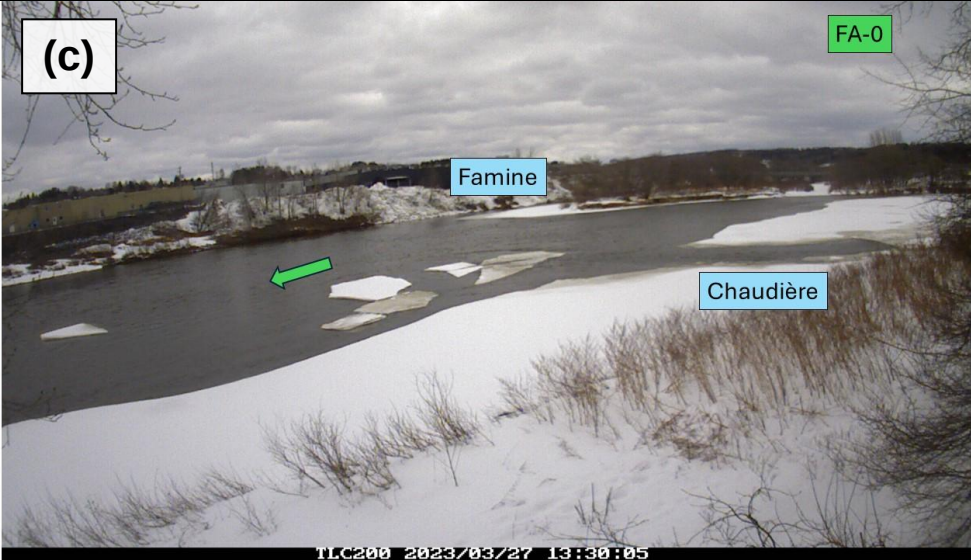
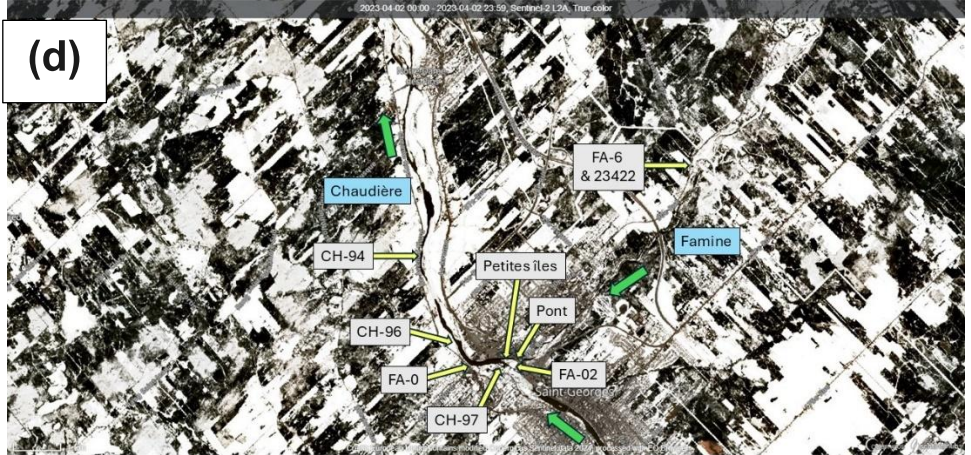
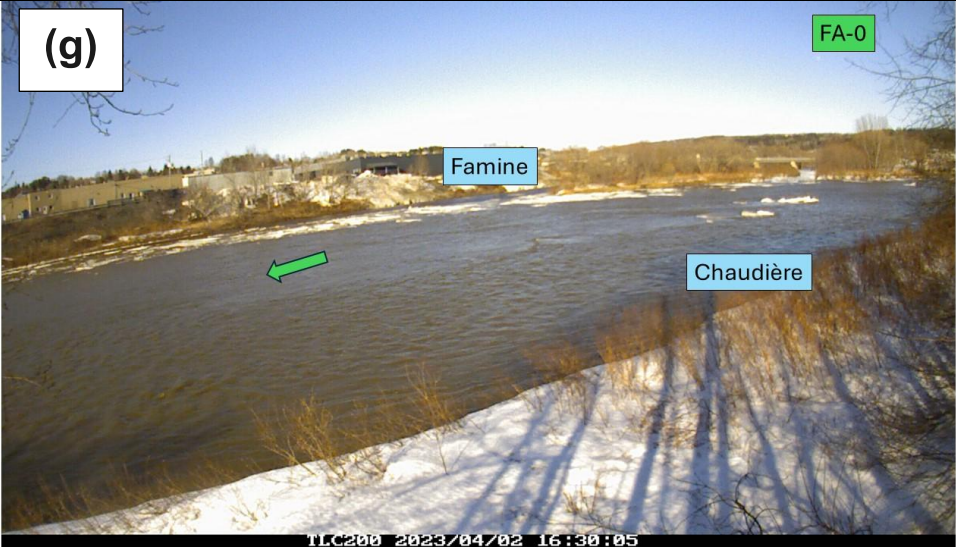
Image caméra prise le 27 mars 2023 à 13h30. Le couvert de glace sur la CH a déjà fortement diminué. Certains morceaux de glace restant se détachent des berges formant des trains de glace.	(c) 
Image satellite prise le 2 avril 2023 à 15h50. La FA est en eau libre et le couvert de glace à la confluence a presque disparu. Un embâcle de glace sur la CH au niveau de la confluence semble présent. En aval de la confluence, plusieurs ouvertures sont visibles dans le couvert de la CH. En amont, la CH est en eau libre.	(d) 

Image caméra prise le 2 avril 2023 à 16h. L'accumulation de bris de glace au site CH-97 crée un embâcle de glace. Quelques heures plus tard, la rivière est en eau libre.	(e) CH-97 Chaudière  TLC200 2023/04/02 16:00:05
Image caméra prise le 2 avril 2023 à 16h. Le couvert de glace s'aminci de plus en plus au site FA-02. Des morceaux de glace se détachent du couvert et se déplacent vers l'aval.	(f) FA-02 Famine  TLC200 2023/04/02 16:00:04

Image caméra prise le 2 avril 2023 à 16h30. La CH est en eau libre mais un embâcle est présent à la confluence sur la FA, dû à l'accumulation de morceaux de glace en provenance du site FA-02. Une heure plus tard l'embâcle disparaît laissant à nouveau la rivière en eau libre.	(g) 
Image caméra prise le 7 avril 2023 à 12h30. Les derniers morceaux de glace se détachent des berges formant un train de glace au site FA-02. Quelques heures plus tard, la rivière est en eau libre.	(h) 

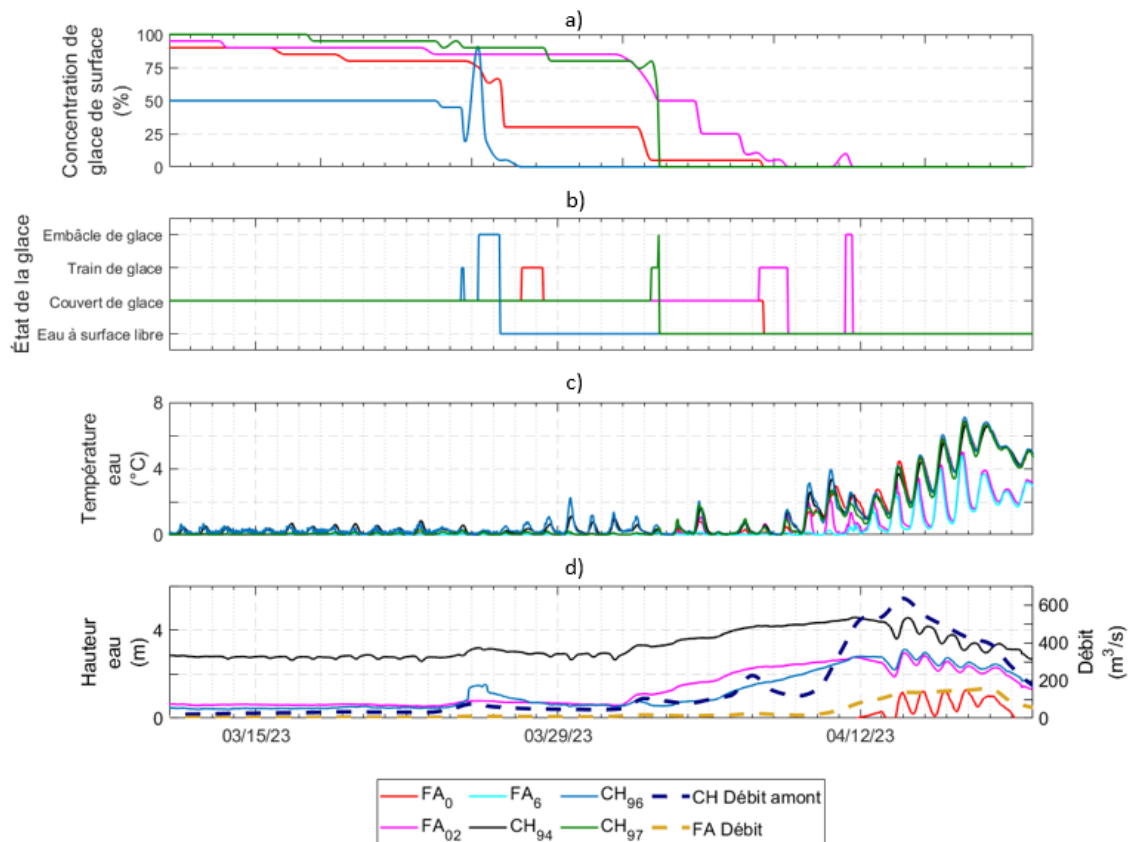
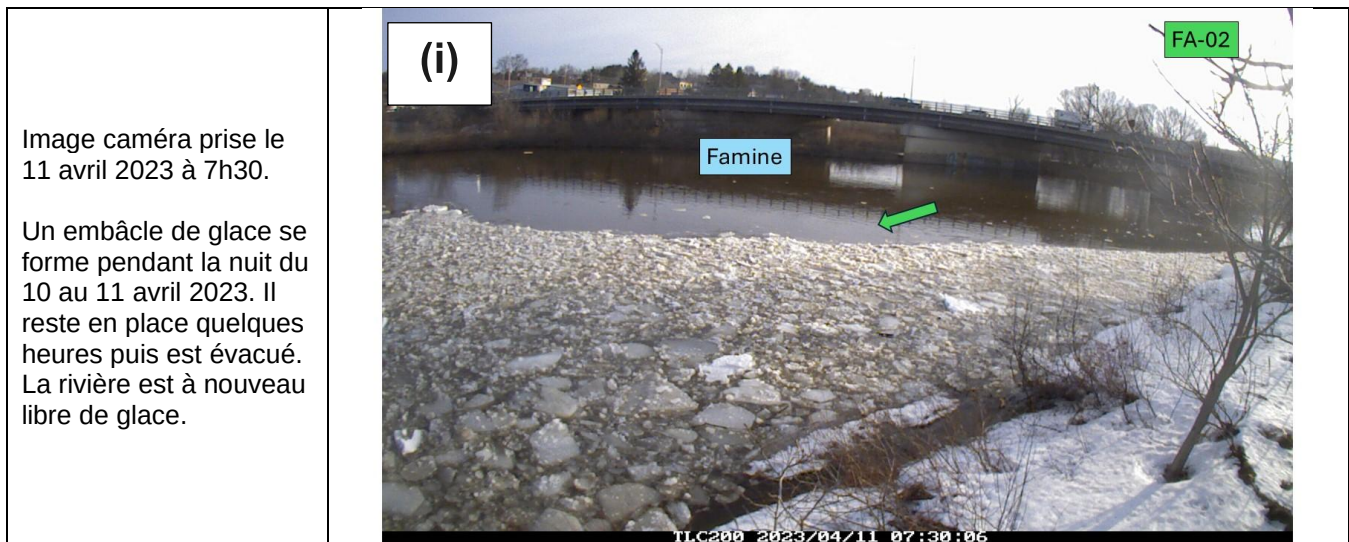


Figure 80. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2023 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 207,87 m à FA-6, 158,92 m à FA-02, 158,49 m à FA-0, 157,74 m à CH-96, 158,94 m à CH-97 et 156,75 m à CH-94.

La débâcle 2023 à la confluence FA a débuté dans la CH, de l'aval vers l'amont. Les sites CH-96 et CH-97 sont les premiers à avoir perdu leur couvert de glace le 26 mars et le 2 avril 2023 respectivement. Ceci s'est produit à la suite d'une légère augmentation du débit à partir du 24 mars, ayant été causé par une pluie de 5 mm cette même journée (figure 66b, d et figure 50d). La température de l'eau dans la CH a ainsi commencé à augmenter (figure 66c). Ces sites ont été dégagés de la glace après avoir été bloqués par un embâcle qui s'était formé plus tôt dans la journée. Il n'y a donc pas eu d'embâcle directement à la confluence, mais un embâcle s'est d'abord formé en aval, suivi d'un autre en amont de la confluence.

La perte du couvert de glace s'est ensuite terminée dans le tributaire, de l'aval vers l'amont. Tout d'abord, la majorité du couvert à l'aval du tributaire (FA-02) est disparue entre le 1er avril et le 7 avril (figure 66a). La température de l'eau s'est mise à augmenter dès la disparition totale de la glace dans le tributaire (figure 66c). Un embâcle de glace s'est également formé en aval du tributaire le 11 avril, alors que le débit de la CH atteignait son maximum saisonnier le 14 avril à 633,4 m³/s, et que le débit de la FA était de 135,9 m³/s à cette même date.

En conclusion, la perte simultanée du couvert de glace de la CH dans toutes les zones étudiées autour de la rivière FA a entraîné la formation de plusieurs embâcles dans la rivière principale. Le tributaire a pu se libérer de sa glace progressivement, de l'aval vers l'amont, alors que les sites de la CH étaient déjà en eau libre. Cependant, avec l'augmentation du débit, une accumulation de glace provenant de l'amont a fini par se former dans la section aval du tributaire, au niveau de la pointe du banc d'accumulation, provoquant un embâcle. Ainsi, un débit de 46 m³/s a été nécessaire dans le tributaire pour permettre le passage des morceaux du couvert de glace restants au-delà du banc d'accumulation situé à l'embouchure de la FA à la fin de la saison.

Débâcle 2024

Le tableau 27 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024. Les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 81.

Tableau 27. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024 à la confluence FA.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

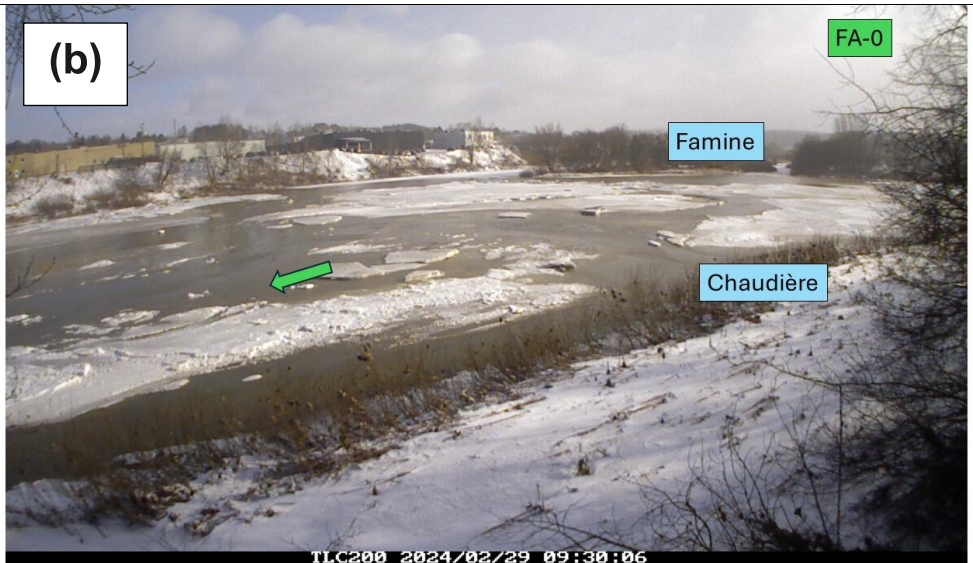
Description	Image
Image caméra prise le 25 février 2024 à 15h30. Ouverture importante du couvert de glace sur la rivière CH au site CH-96, en aval de la confluence.	
Image caméra prise le 29 février 2024 à 9h30. Ouverture importante du couvert de glace sur la rivière CH à la confluence FA. Les bris de glace restants forment un embâcle pendant plusieurs jours avant de laisser la CH complètement en eau libre le 6 mars 2024. Le couvert de glace sur la rivière FA semble intact.	

Image satellite prise le 2 mars 2024 à 15h50. Le couvert de glace est intact sur la rivière FA et sur la rivière CH en amont de la confluence. Un trou est présent dans le couvert de glace juste à l'aval de la confluence, sur la rivière CH.	(c) 
Image caméra prise le 5 mars 2024 à 14h45. Un embâcle de glace se forme dans un coude de la rivière CH au site CH-96. Il reste en place quelques jours avant de laisser place à l'eau libre.	(d)  TLC200 2024/03/05 14:45:05
Image caméra prise le 5 mars 2024 à 15h30. Ouverture importante dans le couvert de glace au site FA-02 alors que la veille le couvert est intact. D'importants morceaux de glace s'accumulent le long des berges formant un embâcle qui disparaît le lendemain.	(e)  TLC200 2024/03/05 15:30:05

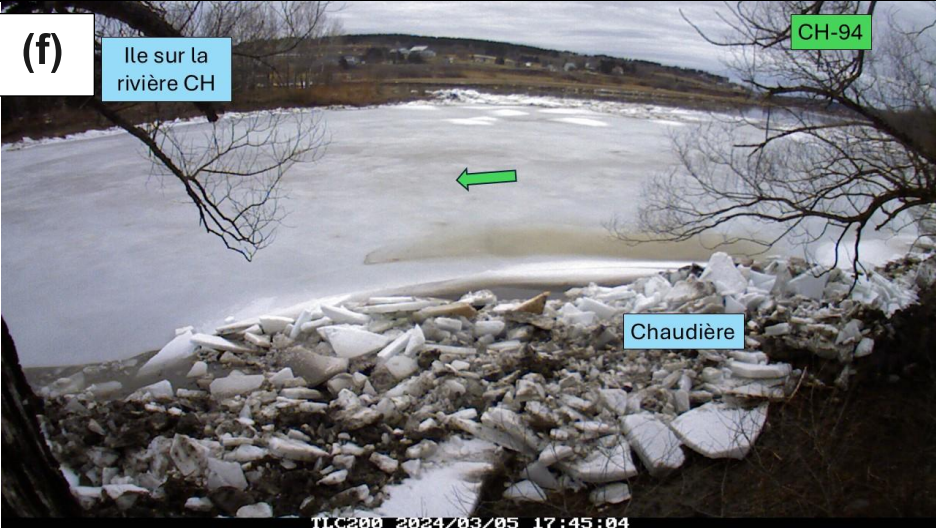
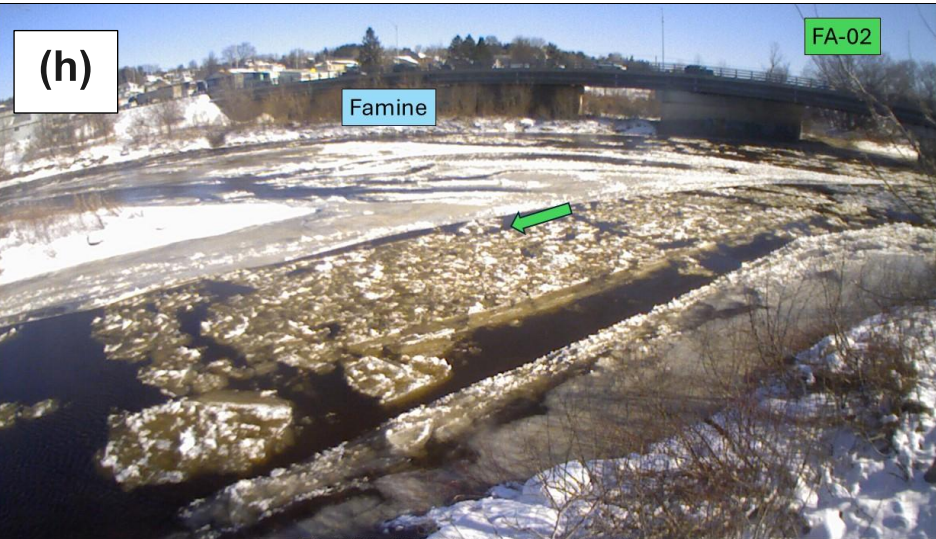
Image caméra prise le 5 mars 2024 à 17h45. Un embâcle de glace se forme le 4 mars au site CH-94 et reste en place quelques jours avant de laisser place à la rivière en eau libre à partir du 8 mars. La deuxième branche de la rivière CH, de l'autre côté du banc d'accumulation, est déjà en eau libre.	(f) Ile sur la rivière CH CH-94 Chaudière  TLC200 2024/03/05 17:45:04
Image caméra prise le 6 mars 2024 à 8h. Ouverture importante dans le couvert de glace alors que la veille le couvert est intact. Des restes du couvert de glace sont coincés dans un coude de la FA au site FA-6.	(g) Famine FA-6  TLC200 2024/03/06 08:00:05
Image caméra prise le 22 mars 2024 à 9h30. Un embâcle de glace se forme au site FA-02 et demeure en place plusieurs jours avant de laisser place à quelques trains de glace puis à l'eau libre.	(h) Famine FA-02  TLC200 2024/03/22 09:30:05

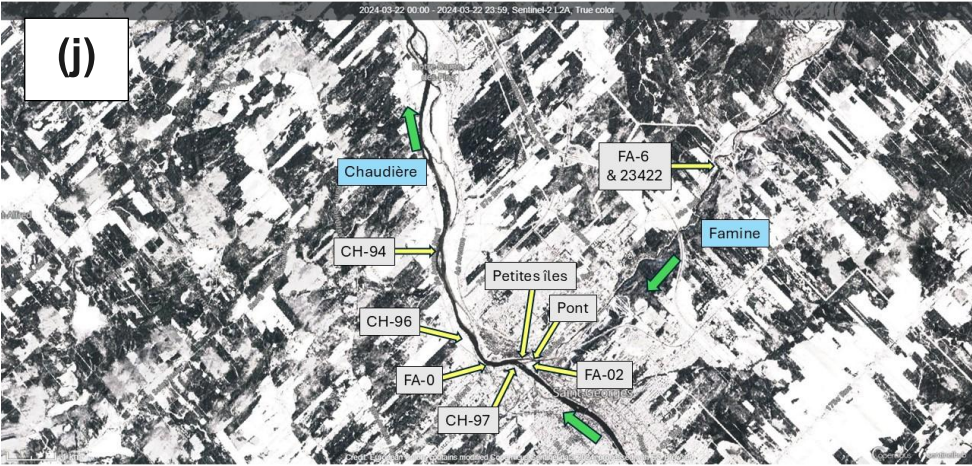
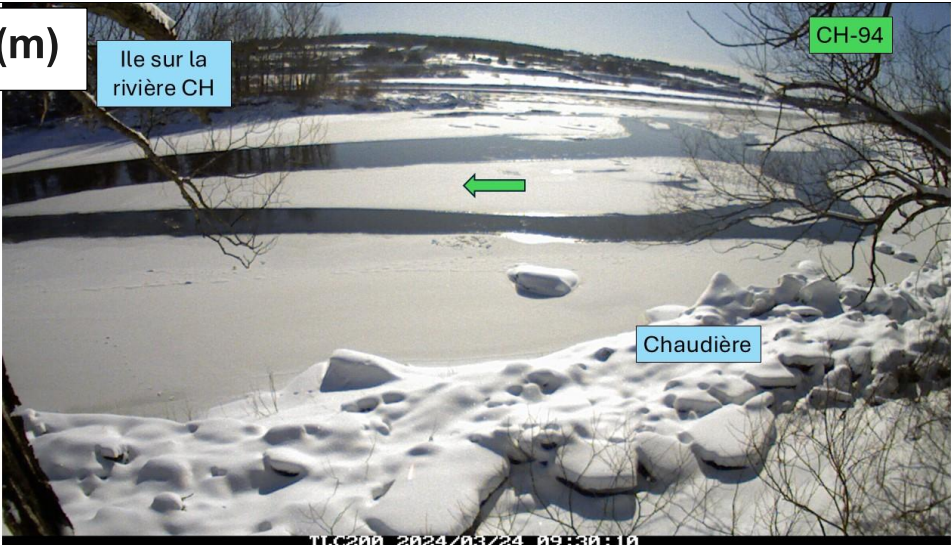
Image caméra prise le 22 mars 2024 à 11h. Le 21 mars, un train de glace apparaît dans un coude de la FA au site FA-6. Le 22 mars, il se transforme en embâcle et reste en place plusieurs jours.	(i) 
Image satellite prise le 22 mars 2024 à 15h50. La rivière CH est en eau libre à l'amont et à l'aval de la confluence, le couvert de glace est encore présent sur les berges. Le couvert de glace sur la rivière FA semble lui aussi avoir disparu.	(j) 
Image caméra prise le 23 mars 2024 à 11h45. Le couvert de glace se reforme partiellement avant de disparaître définitivement et de laisser place à une rivière en eau libre à partir du 26 mars 2024.	(k) 

Image caméra prise le 23 mars 2024 à 14h. Un train de glace est observé le 21 mars, puis la couverture de glace se reforme partiellement à partir du 22 mars, jusqu'à ce que la rivière CH soit définitivement libre de glace sur ce site quelques jours plus tard.	(l)  FA-0 Famine Chaudière TLC200 2024/03/23 14:00:04
Image caméra prise le 24 mars 2024 à 9h30. Des trains de glace sont observés les deux jours précédents, puis le couvert de glace se reforme partiellement le 24 mars. Le soir, il a complètement disparu. Quelques trains de glace sont aperçus les jours suivants. L'eau devient définitivement libre à partir du 28 mars sur ce site.	(m)  Ile sur la rivière CH CH-94 Chaudière TLC200 2024/03/24 09:30:10

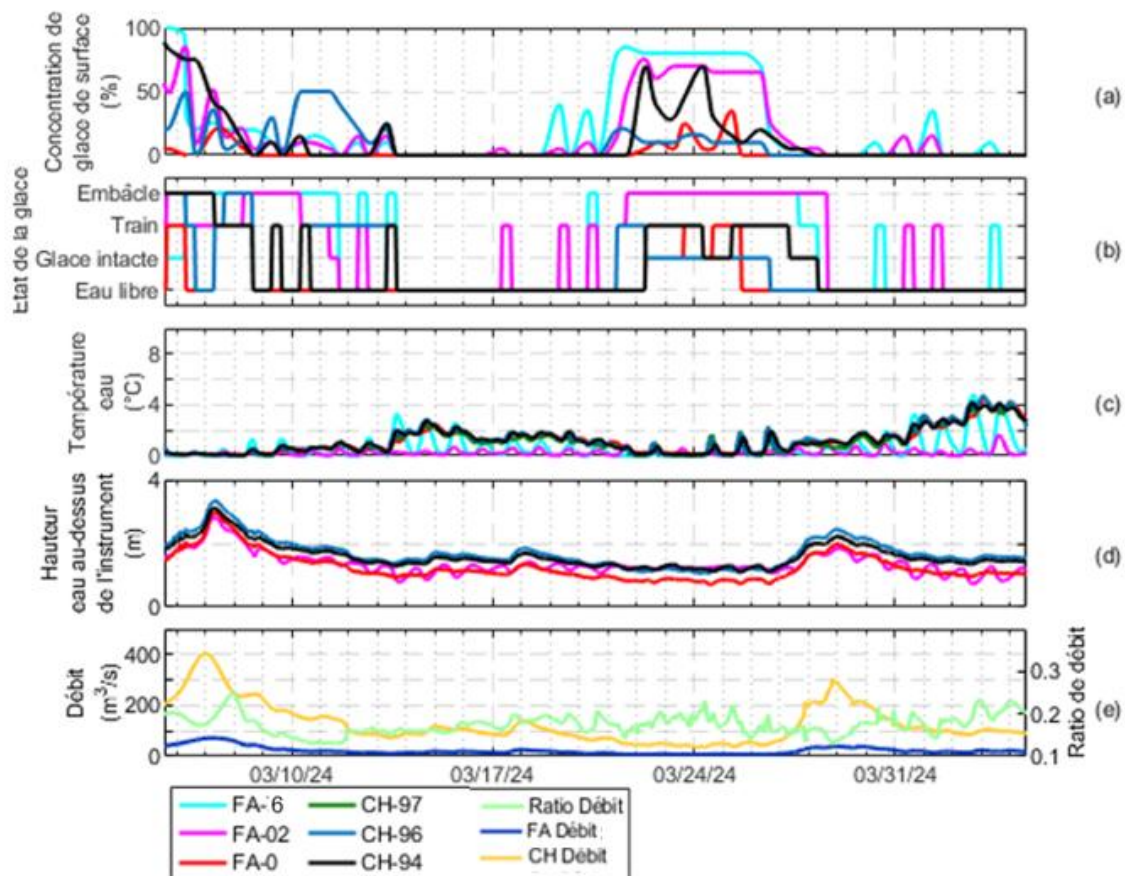
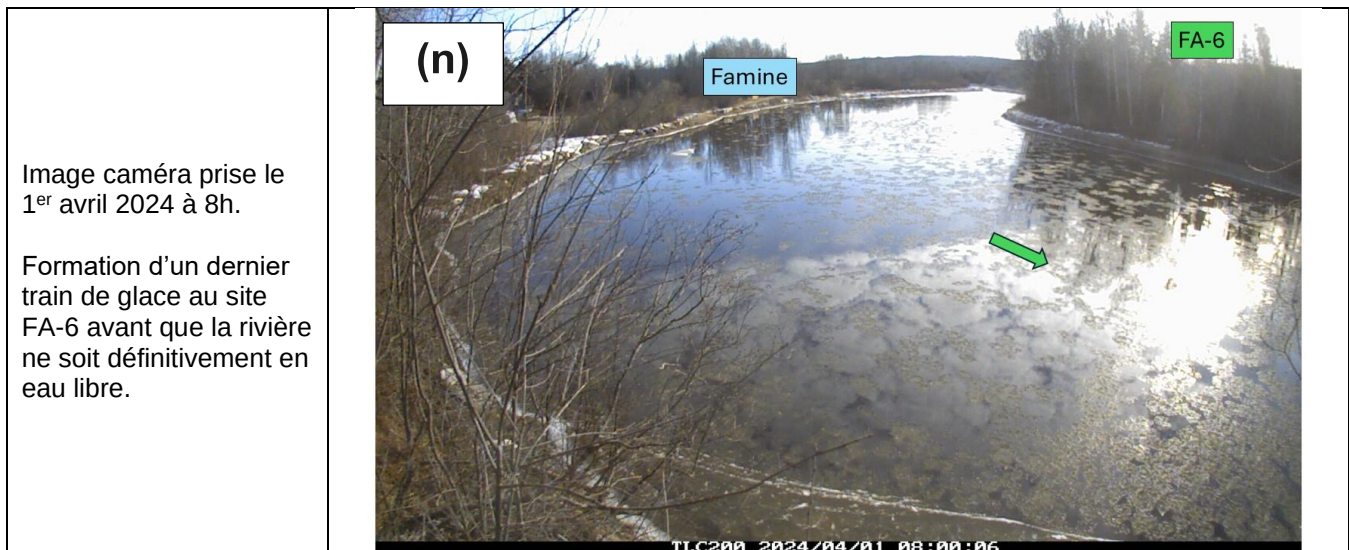


Figure 81. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence FA durant la débâcle 2024 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau; (d) niveau d'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 207,79 m à FA-6, 159,24 m à FA-02, 158,56 m à FA-0, 157,41 m à CH-96, 159,02 m à CH-97 et 156,48 m à CH-94.

La débâcle 2024 à la confluence FA a été complexe et fragmentée (figure 81a et 81b). Le processus a été caractérisé par une succession d'embâcles et de trains de glace alternant avec des périodes d'eau libre. Cela traduit l'influence importante des conditions météorologiques variables observées durant cette période.

Les premiers signes de la débâcle sont apparus au début du mois de mars avec la fonte du couvert de glace (figure 61c et figure 81a). La pluie du 6 mars 2024, totalisant 14 mm, a probablement accéléré ce processus initial en apportant un surplus d'eau et de chaleur (figure 61d). Cette combinaison a entraîné un premier pic de débit dans la rivière CH de 474 m³/s accompagné d'embâcles simultanés à plusieurs sites (figure 81b et e et tableau 27). Entre le 10 et le 17 mars, il semble y avoir eu une phase de transition caractérisée par une alternance entre différents états de glace. Il y a effectivement des périodes d'embâcles, de trains de glace et d'eau libre se succédant particulièrement aux sites FA-6, FA-02 et CH-94 (figure 81b). Cette instabilité a coïncidé avec des fluctuations de la température de l'air qui ont oscillé entre des valeurs positives favorisant la fonte et des valeurs négatives permettant la reformation partielle du couvert de glace (figure 61b). Les températures de l'eau sont cependant demeurées proches mais supérieures à 0°C, indiquant que le système était encore dominé par des processus de fonte (figure 81d).

Entre le 21 et le 25 mars, la température de l'air plus froide, descendant même sous les -5°C, a provoqué une stagnation des DJDC-5 à 114,6°C·J (figure 61b et c). La chute de neige importante du 23 mars de 16 cm témoigne de ce refroidissement (figure 61d). En bref, la fonte s'est arrêtée (figure 81a).

La reprise de la débâcle s'est amorcée à partir du 26 mars, avec la remontée des températures et la fonte rapide du couvert neigeux, qui est passé de 16 cm le 23 mars à 0 cm le 30 mars (figure 61e). Cette fonte a engendré la remontée des niveaux d'eau vers la fin mars et un second pic de débit dans la rivière CH à 289 m³/s le 28 mars 2024 (figure 81d et e). À cette date, le site amont de la CH (CH-96), suivi du site amont de la FA (FA-6) et du site à l'aval de la FA (FA-02) ont tous perdu leurs glaces l'un à la suite de l'autre.

En conclusion, la débâcle 2024 à la confluence FA a été complexe et a fortement été influencée par les variations météorologiques. La débâcle s'est effectuée de l'amont vers l'aval dans la rivière principale ainsi que dans le tributaire qui a d'ailleurs été libéré de ses glaces en dernier. Les glaces des sites en amont du tributaire se sont accumulées à l'amont de la confluence dû aux restrictions géomorphologiques. Ainsi, un faible débit de 39 m³/s dans la FA a suffi pour évacuer l'embâcle le 29 mars 2024, en raison de la fonte préalable de la couverture de glace. L'embâcle a fondu thermiquement presque en totalité sur place à l'embouchure du tributaire. Puis, tous les sites se sont retrouvés en eau libre le 4 avril 2024.

Résumé

La figure 82 présente les sites à la confluence FA où des embâcles printaniers ont été observés durant toutes les saisons étudiées, soit 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023 et 2023-2024. Le tableau 28 précise quant à lui les dates auxquelles les

embâcles printaniers ont été aperçus et les instruments utilisés pour les détecter. Il est à noter que ces résultats reflètent uniquement l'information analysée et ne prétendent pas être exhaustifs.



Figure 82. Embâcles printaniers observés directement à la confluence FA pour toutes les saisons étudiées.

Tableau 28. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles printaniers observés à la confluence FA pour toutes les saisons étudiées.

Année	Instrument de capture	Rivière	Station	Date
2020	Caméra CH-98	Chaudière	km 98,7	3 avril 2020
	Caméra FA-07	Famine	km 0,7	3 avril 2020
2021	Caméra CH-96	Chaudière	km 96,7	22 mars 2021
2022	Caméra CH-97	Chaudière	km 97,9	26 mars 2022
	Caméra CH-96	Chaudière	km 96,7	27 mars 2022
2023	Caméra CH-96	Chaudière	km 96,7	24 mars 2023
	Caméra CH-97	Chaudière	km 97,9	25 janvier 2023 au 3 avril 2023
2024	Caméra CH-94	Chaudière	km 94,6	4 mars 2024 au 6 mars 2024
	Caméra CH-96	Chaudière	km 96,7	1er mars 2024 au 8 mars 2024
	Caméra FA-02	Famine	km 0,2	5 mars 2024
	Caméra FA-02	Famine	km 0,2	8 mars 2024 au 9 mars 2024
	Caméra FA-02	Famine	km 0,2	21 mars 2024 au 28 mars 2024

Le pont-route 173 et la présence de bancs d'accumulation à l'embouchure du tributaire exercent un contrôle géomorphologique durant la débâcle en retenant les glaces dans le tributaire. La débâcle se termine donc dans le tributaire après celle du cours d'eau principal alors qu'un débit seuil ou minimal (63 m³/s en 2021 ; 72 m³/s en 2022 ; 46 m³/s en 2023 et 39 m³/s en 2024) est requis pour déloger les glaces restantes dans la FA. L'analyse des embâcles printaniers observés dans la confluence FA pour toutes les saisons étudiées (figure 82) met en évidence des schémas récurrents d'accumulation à certains emplacements précis. En particulier, plusieurs embâcles se forment dans des zones clés où la morphologie du lit, les obstacles physiques et les conditions hydrauliques favorisent la congestion des glaces.

Les embâcles dans cette section de la CH se forment puisque la rivière FA draine une surface représentant 19 % du bassin versant en amont de cette confluence (tableau 1), ce qui lui confère une capacité d'apport en eau et en glace non négligeable par rapport à la rivière principale. Cet apport favorise une accumulation de glaces à la confluence. De plus, la pente du tributaire est 18 fois plus élevée que celle de la rivière principale à cet endroit (tableau 2). Ceci entraîne donc une vitesse d'écoulement plus forte dans la FA et favorise le transport et l'accumulation des glaces à la jonction avec la rivière principale, où la pente plus faible réduit la capacité d'évacuation. De plus, la présence de bancs d'accumulation et du pont-route 173 obstrue partiellement des sections de la FA et de la CH près de l'embouchure du tributaire et en aval de la confluence. Un débit minimal est nécessaire pour déloger le couvert de glace sans quoi ces obstacles le retiennent en place jusqu'à sa fonte. Ces valeurs de débits ont été de 99 m³/s, 63 m³/s, 72 m³/s, 82 m³/s et exceptionnellement 39 m³/s pour respectivement 2020, 2021, 2022, 2023 et 2024.

5.2.1.3 Confluence Bras Saint-Victor

Cette section fait l'analyse des données de la confluence de la rivière BSV dont la confluence se situe au km 75,3 de la CH.

Débâcle 2020

Le tableau 29 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2020. Les données recueillies par les traceurs GPS sont illustrées à la figure 83 et les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 84.

Tableau 29. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2020 à la confluence BSV.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

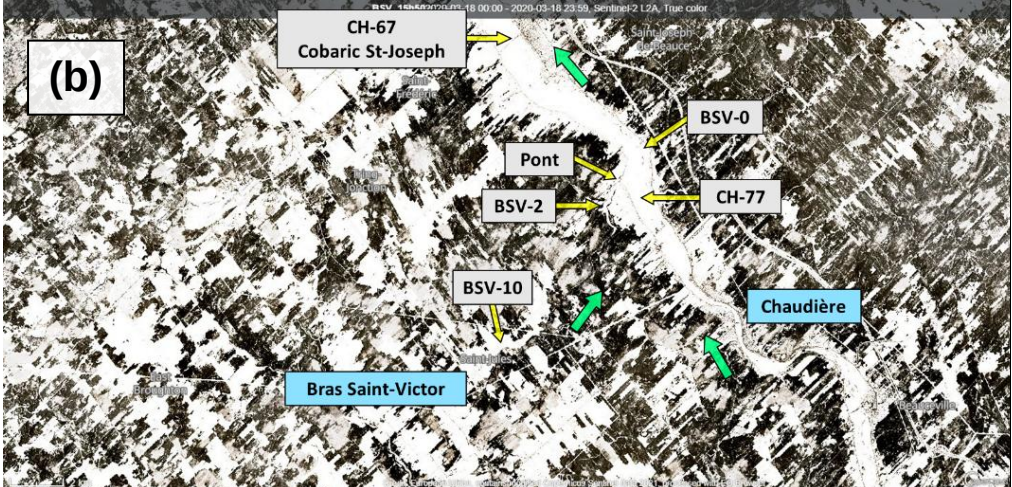
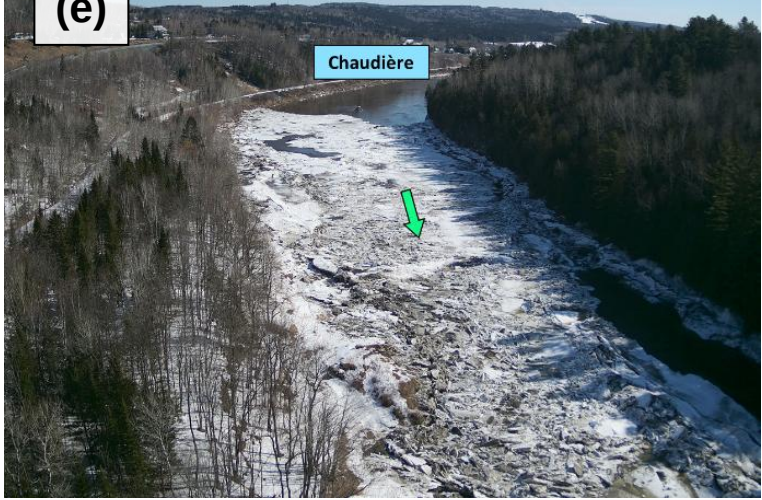
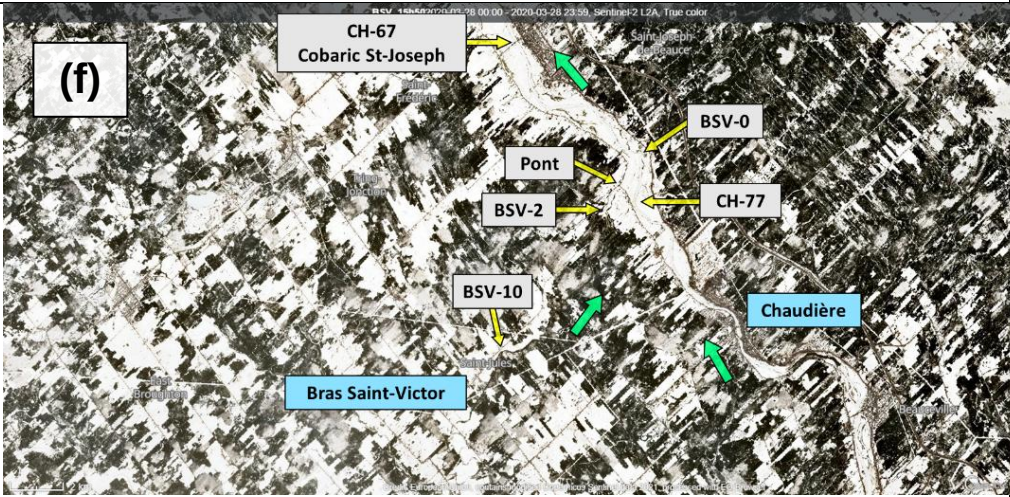
Description	Image
(a) Image satellite prise le 8 mars 2020 à 11h50. Le couvert de glace est intact dans toutes les zones de la confluence BSV.	
(b) Image satellite prise le 18 mars 2020 à 11h50. La rivière BSV est en eau libre à partir du km 3,5 vers l'amont. Le couvert est intact dans la CH.	

Image d'un vol de drone prise le 26 mars 2020 à 8h49. Couvert partiel et petit embâcle dans la rivière BSV au km 3,1.	(c)  km 3,1 Bras Saint-Victor
Image d'un vol de drone prise le 26 mars 2020 à 8h50. Embâcle et couvert de glace dans la rivière BSV au km 2,9.	(d)  km 2,9 Bras Saint-Victor

Image d'un vol de drone prise le 26 mars 2020 à 10h11. Embâcle dans la rivière CH à mi-chemin entre les rivières FA et BSV.	(e) km 86,5 Chaudière 
Image satellite prise le 28 mars 2020 à 11h50. La rivière BSV est en eau libre à partir du km 2 vers l'amont. Le couvert est majoritairement intact dans la CH.	(f) CH-67 Cobaric St-Joseph BSV-0 Pont BSV-2 CH-77 BSV-10 Chaudière Bras Saint-Victor 

(g) Image de caméra prise le 28 mars 2020 à 16h. Passage d'un embâcle au site BSV-2 (partie supérieure gauche de la rivière).	
(h) Image d'un vol de drone prise le 29 mars 2020 à 10h11. Fragmentation du couvert de glace dans la CH en amont de la confluence BSV à la suite du passage d'une excavatrice spécialisée au centre de la rivière.	

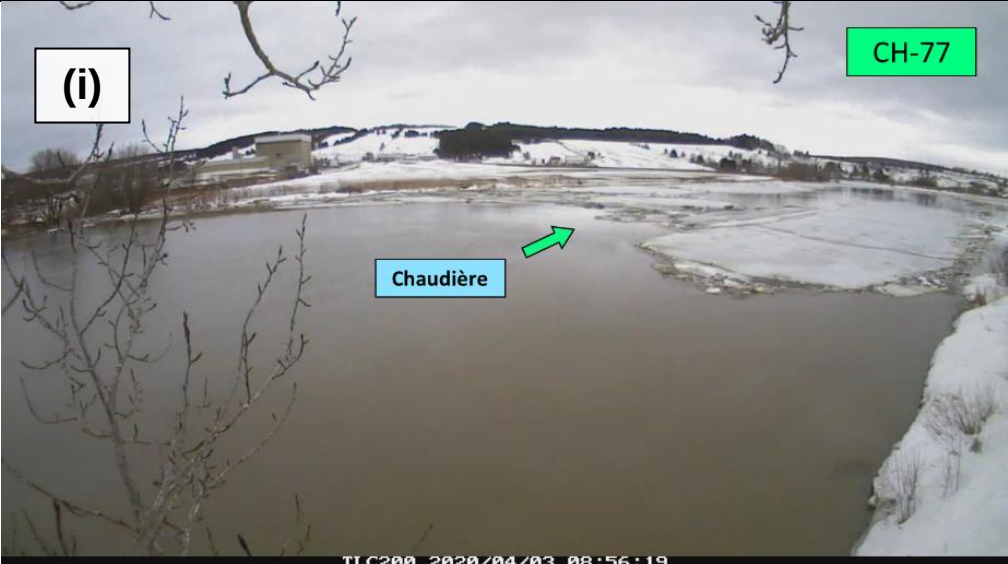
Image de caméra prise le 3 avril 2020 à 8h56. Morceaux de glace provenant de l'amont coincés au site CH-77 sur la largeur entière de la rivière.	(i) CH-77 Chaudière → TLC200 2020/04/03 08:56:19 
Image d'un vol de drone prise le 3 avril 2020 à 10h32. Embâcle formé dans la CH à mi-chemin entre les rivières FA et BSV autour de l'île Ronde et du pont de la route 108 à Beauceville.	(j) km 84,4 Pont ↓ Île ↑ Chaudière 

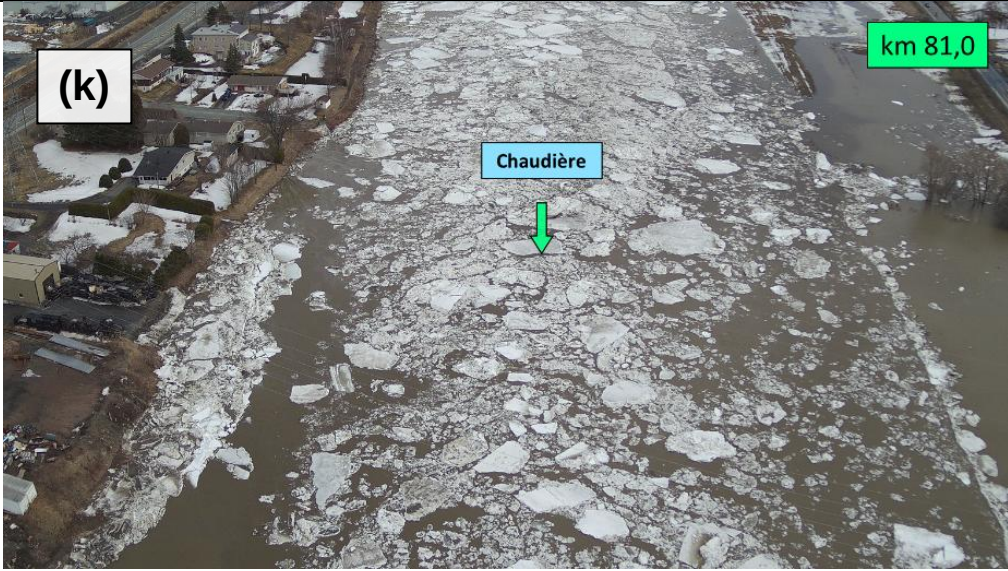
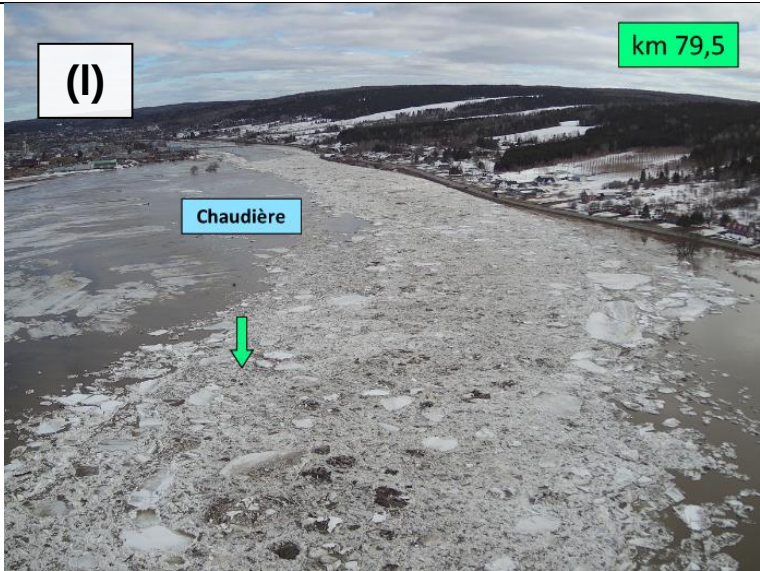
Image d'un vol de drone prise le 3 avril 2020 à 15h25. Radeaux de glace dans la CH en amont de la rivière BSV au km 81.	
Image d'un vol de drone prise le 3 avril 2020 à 16h12. Embâcle dans la CH dans la section située 4 km à l'amont de la confluence BSV.	

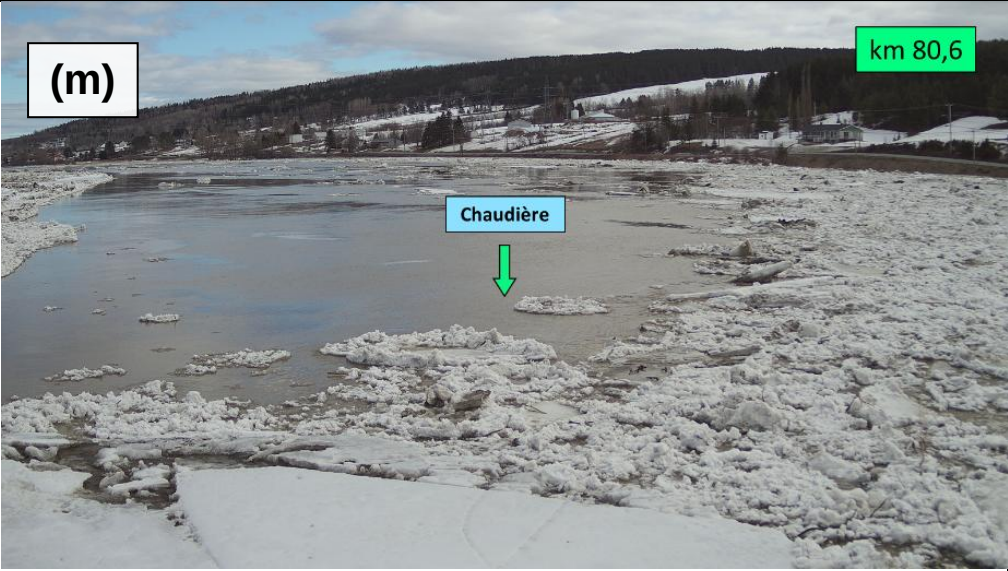
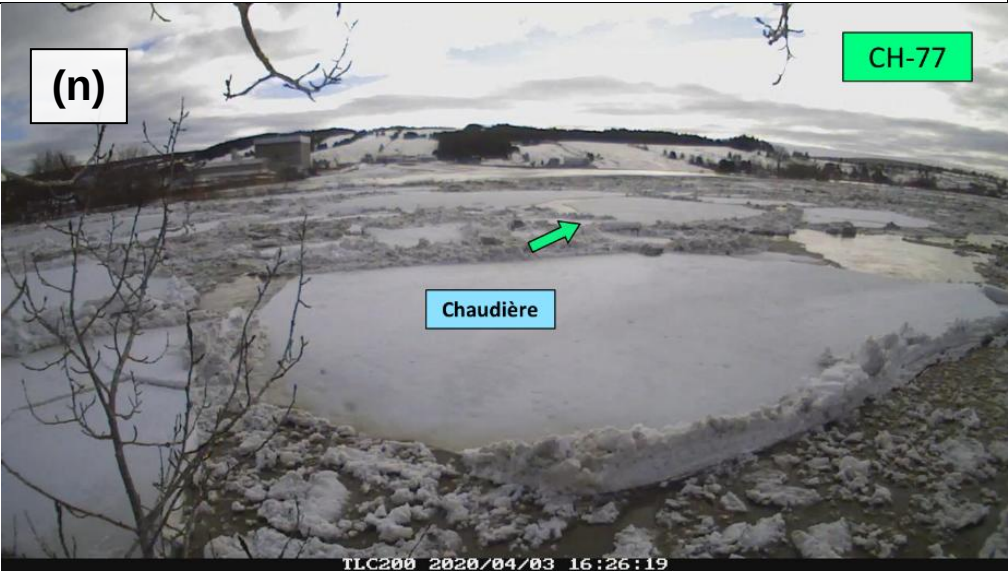
Image d'un vol de drone prise le 3 avril 2020 à 16h20. Vue rapprochée d'un embâcle dans la CH situé à 5 km en amont de la confluence BSV.	(m) km 80,6 Chaudière 
Image de caméra prise le 3 avril 2020 à 16h26. Passage d'un embâcle au site CH-77.	(n) CH-77 Chaudière  TLC200 2020/04/03 16:26:19

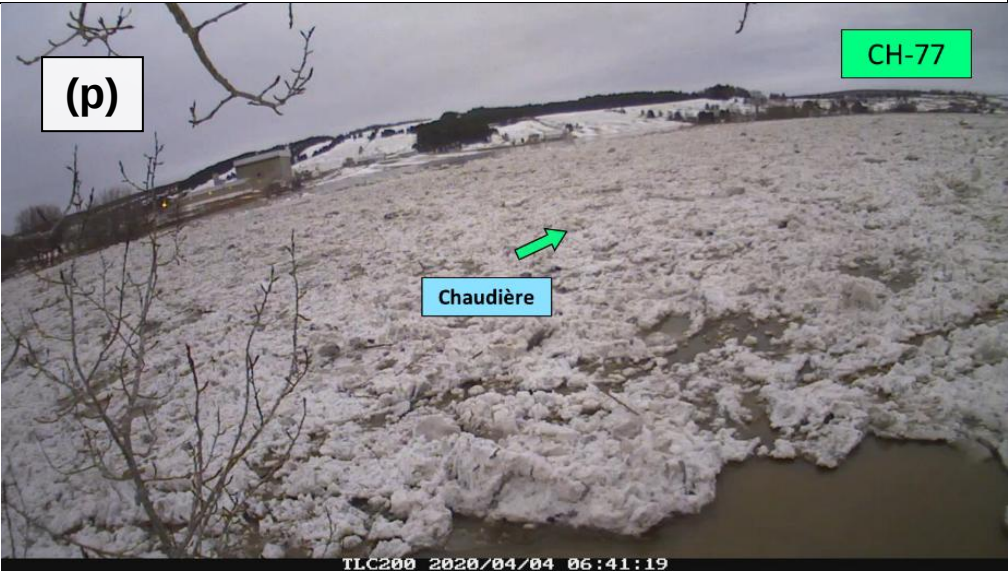
Image de caméra prise le 3 avril 2020 à 19h37. Dernière image d'un embâcle situé au site BSV-0.	(o) BSV-0 Chaudière → TLC200 2020/04/03 19:37:52 
Image de caméra prise le 4 avril 2020 à 6h41. Première image d'un embâcle bloquant complètement la rivière au site CH-77.	(p) CH-77 Chaudière → TLC200 2020/04/04 06:41:19 

Image de caméra prise le 5 avril 2020 à 8h22. Embâcle au site CH-67 – vue de la rive.	
Image de caméra prise le 5 avril 2020 à 19h26. Dernière image de l'embâcle situé au site CH-77.	

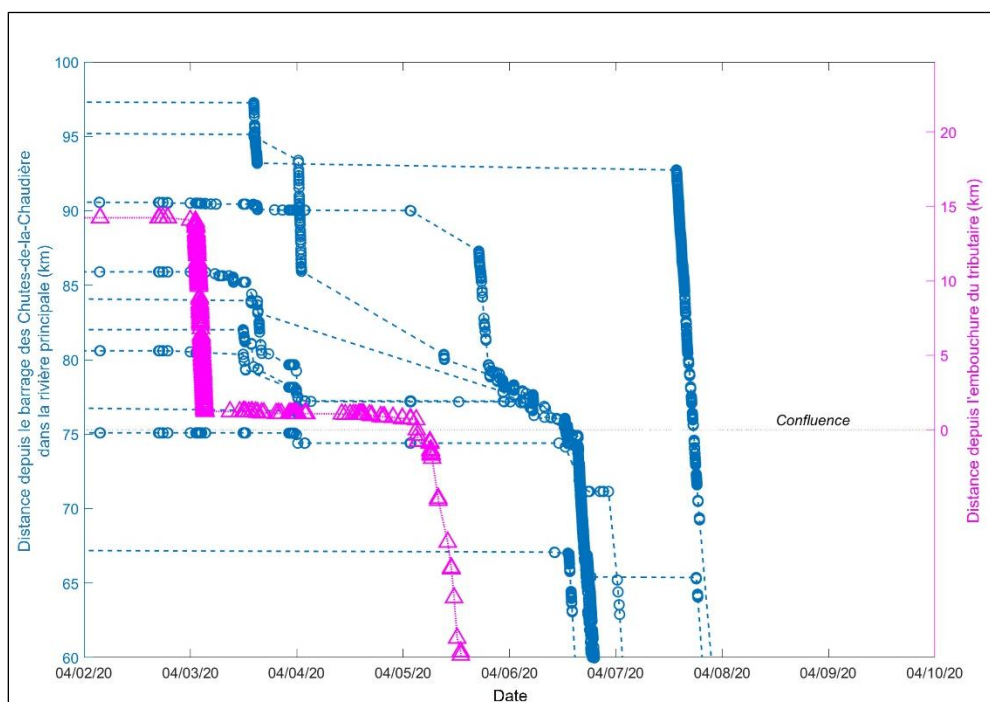
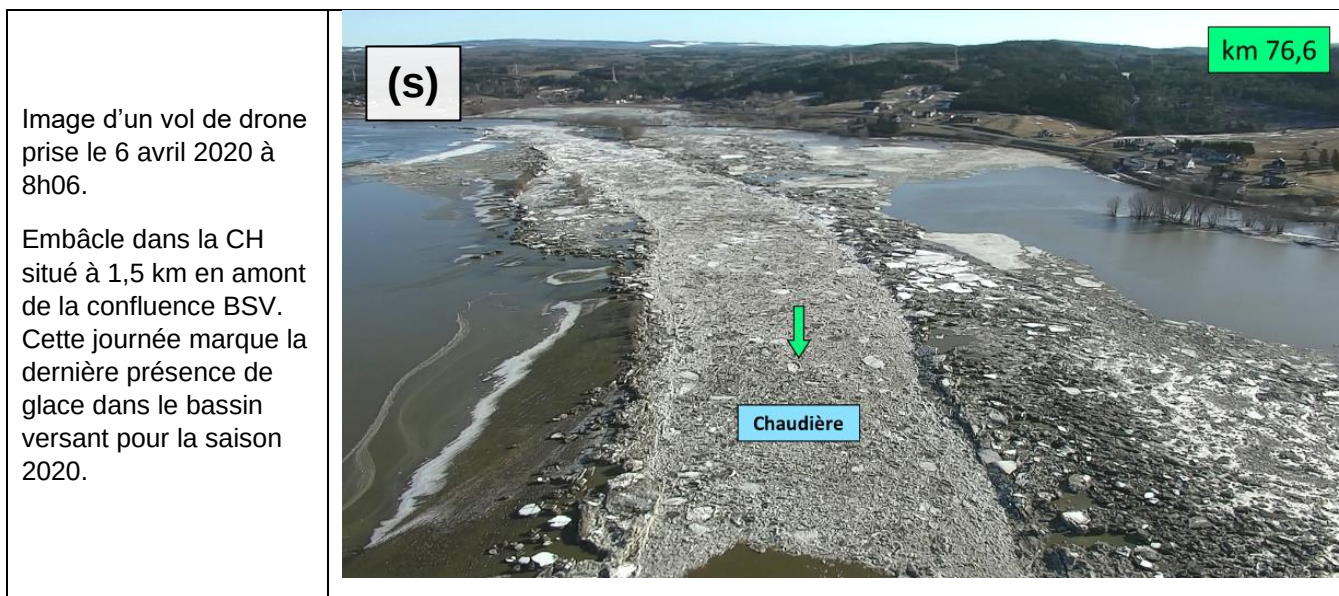


Figure 83. Données de traceurs GPS pour la confluence BSV durant la débâcle 2020.

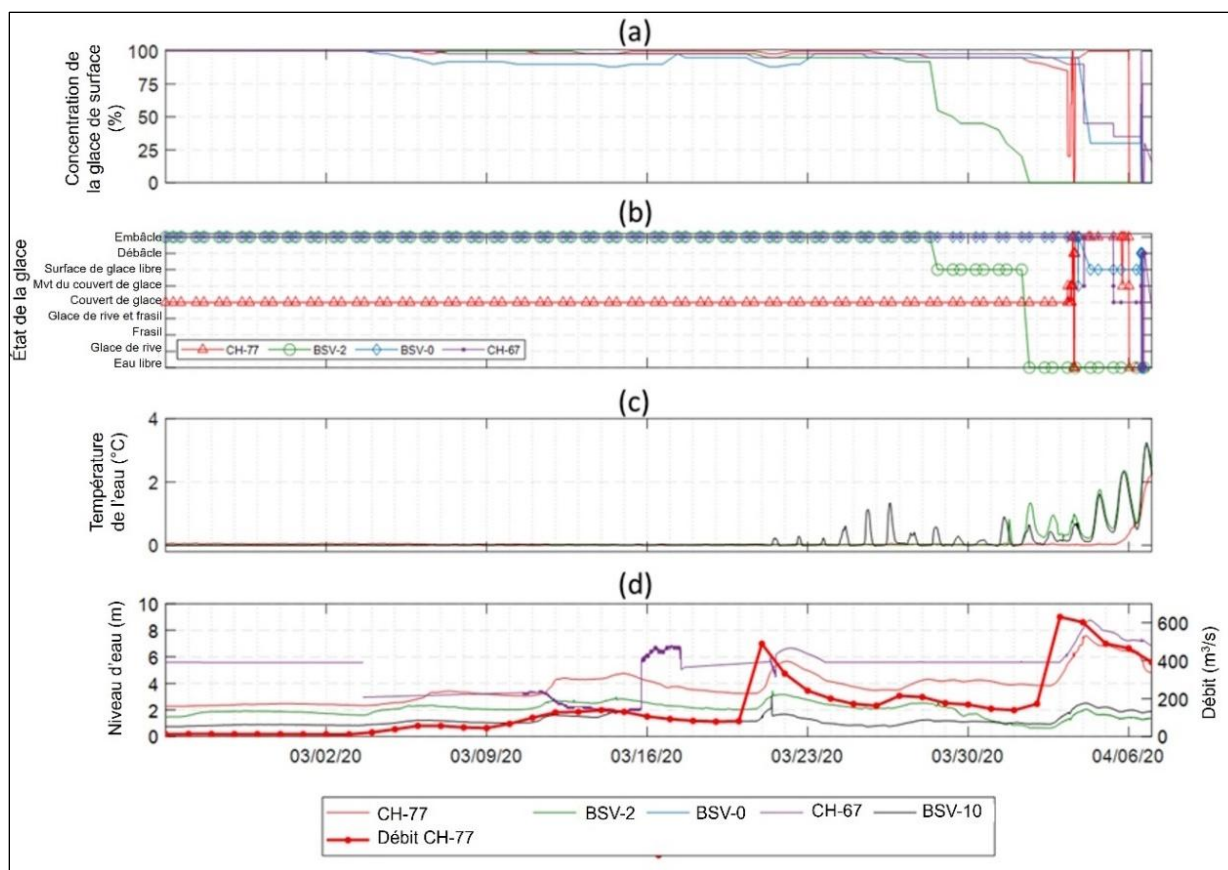


Figure 84. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2020 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143 m à CH-77, 148,7 m à BSV-2, 201,8 m à BSV-10 et 140 m à CH-67.

La débâcle à la confluence BSV a débuté dans le tributaire, à l'aval puis à l'amont. Les sections à l'aval dans le tributaire (BSV-2 et km 3,0), situées à l'amont des bancs d'accumulation, se sont débarrassées de leurs glaces entre le 26 mars et le 1^{er} avril 2020 (figure 84a, b et tableau 29c, 28d, 28g) dû à une augmentation constante des DJDC-5 passant de 62,4 °C.J à 95,7 °C.J entre le 27 mars et le 1^{er} avril 2020 (figure 57c). À partir du moment où le couvert a occupé moins de la moitié de la largeur du tributaire, soit le 1^{er} avril 2020, la température de l'eau dans cette section s'est mise à augmenter dans l'aval de la rivière BSV (figure 84c). À la suite d'une précipitation de 8 mm et de la température ambiante maximale de la saison le 20 mars 2020, une élévation soudaine du niveau d'eau a eu lieu en amont dans le tributaire (BSV-10) en date du 21 mars 2020 (figure 57b, d et figure 84d), suivi d'une augmentation de la température de l'eau à ce site (figure 84c). Toutefois, ce n'est qu'en date du 3 avril 2020 que la glace a complètement disparue entre les km 14,1 et 1,3 du tributaire (figure 83).

À la suite de la perte du couvert de glace dans la rivière BSV, la glace de la CH s'est mise à disparaître, de l'amont de la confluence vers l'aval. Une pluie de 15,4 mm le 2 avril 2020 a provoqué une augmentation rapide du niveau d'eau et du débit dans la CH, atteignant

un pic de débit de 630 m³/s le 3 avril 2020. Ceci a causé le bris puis la disparition du couvert de glace en amont de la confluence (CH-77) (figure 57d). Un embâcle est alors venu s'installer dans cette section de la CH et l'a occupée entre le 3 et le 5 avril 2020 (tableau 29i, 28n, 28p, 28r et figure 84b) et la température de l'eau s'est mise à augmenter lorsqu'il a disparu (figure 84c). Finalement, la confluence (BSV-0) et l'aval de la confluence (CH-67) ont commencé à se libérer de leurs glaces le 3 avril 2020 (figure 84a, 84b, 84d et tableau 29o), lorsque le niveau d'eau s'est mis à augmenter dans la CH (CH-67). À ce moment, l'embâcle à la confluence (BSV-0) s'est rompu, entraînant la disparition du reste du couvert de glace, engendré par un DJDC-5 de 145,0 °C.J le 6 avril 2020. (tableau 29s, figure 83, figure 84a, b et figure 57c).

En bref, la débâcle a débuté dans la rivière BSV et s'est poursuivie en amont de la confluence vers l'aval. La nature dynamique de la débâcle 2020 ainsi que la chronologie des événements menant à la perte du couvert ont provoqué des embâcles dans la rivière principale à la confluence ainsi qu'en amont de celle-ci sur plusieurs kilomètres.

Débâcle 2021

Le tableau 30 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021. Les données recueillies par les traceurs GPS sont illustrées à la figure 85 et les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 86.

Tableau 30. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021 à la confluence BSV. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

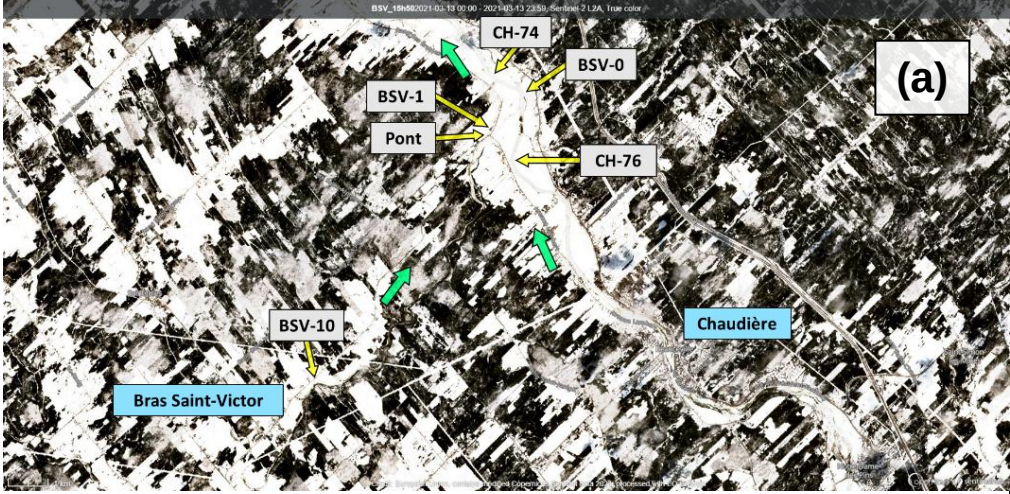
Description	Image
Image satellite prise le 13 mars 2021 à 10h50. Le couvert de glace est intact dans la CH mis à part un trou tout juste à l'amont de la confluence. La rivière BSV est majoritairement en eau libre entre les km 3,5 et 10 et un embâcle semble présent au km 3.	 (a)

Image satellite prise le 23 mars 2021 à 11h50.

La rivière BSV est libre de glace entre les km 3 et 10 avec un embâcle présent au km 2. Le couvert est intact dans la CH mis à part une section à l'amont de la confluence.

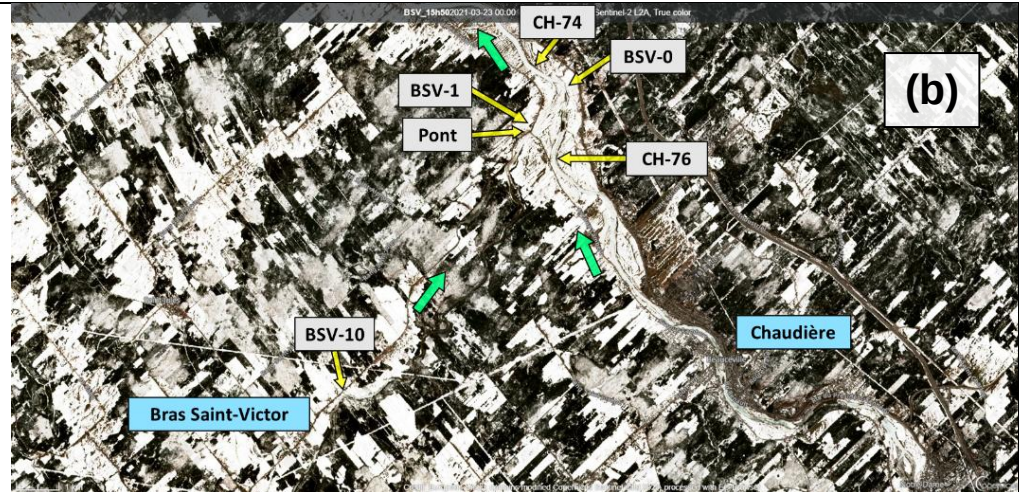


Image de caméra prise le 23 mars 2021 à 14h55.

Arrivée d'un embâcle au site en amont dans le tributaire.



Image d'un vol de drone prise le 24 mars 2021 à 8h31. Tête d'un embâcle d'une longueur d'environ 1 km situé dans la rivière BSV.	
Image d'un vol de drone prise le 24 mars 2021 à 8h29. Pied d'un embâcle d'une longueur d'environ 1 km situé dans la rivière BSV.	

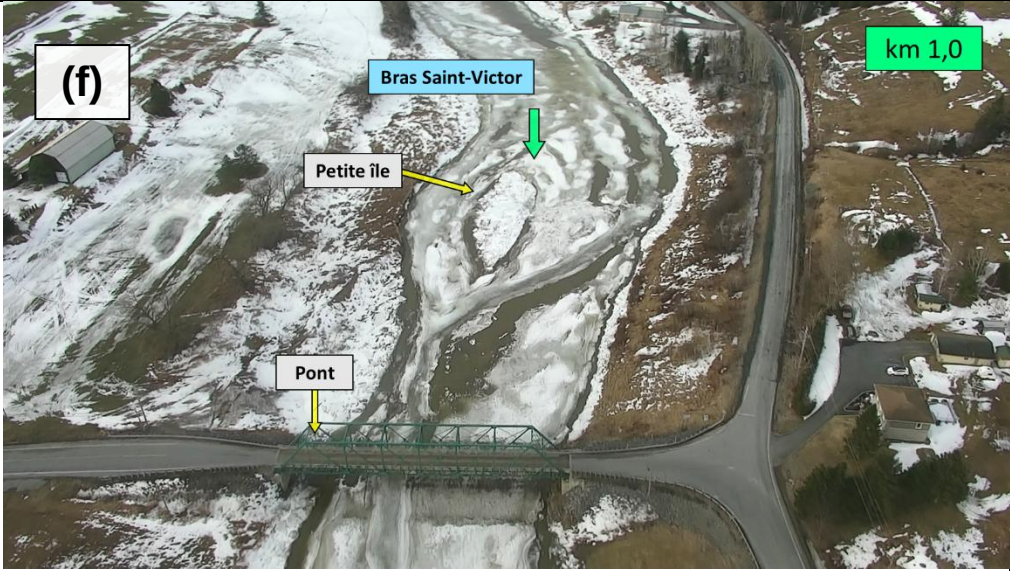
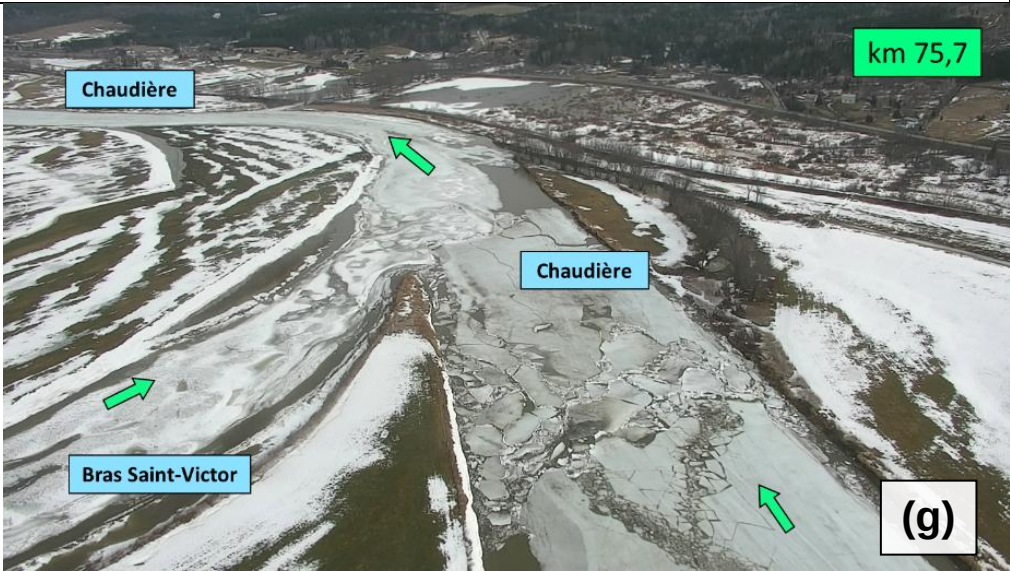
Image d'un vol de drone prise le 24 mars 2021 à 8h28. Couvert partiel dans la rivière BSV à l'amont du pont de la rivière Le Bras situé au km 1.	 (f) Bras Saint-Victor Petite île Pont km 1,0
Image d'un vol de drone prise le 24 mars 2021 à 8h27. Couvert intact dans la rivière BSV et à l'aval de la confluence dans la CH. Le couvert de glace de la CH dans la section à l'amont de la confluence se brise contre le couvert à l'aval.	 Chaudière Chaudière Bras Saint-Victor km 75,7 (g)

Image de caméra prise le 24 mars 2021 à 9h55. Dernière image de l'embâcle situé en amont dans le tributaire. Cette image marque le dernier moment avec glace dans la section BSV-10.	(h) BSV-10 Bras Saint-Victor  TLC200 2021/03/24 09:55:49
Image de caméra prise le 24 mars 2021 à 11h46. Première image de l'embâcle qui a immédiatement suivi la perte du couvert de glace au site en aval dans le tributaire.	BSV-1 Bras Saint-Victor  TLC200 2021/03/24 11:46:48 (i)

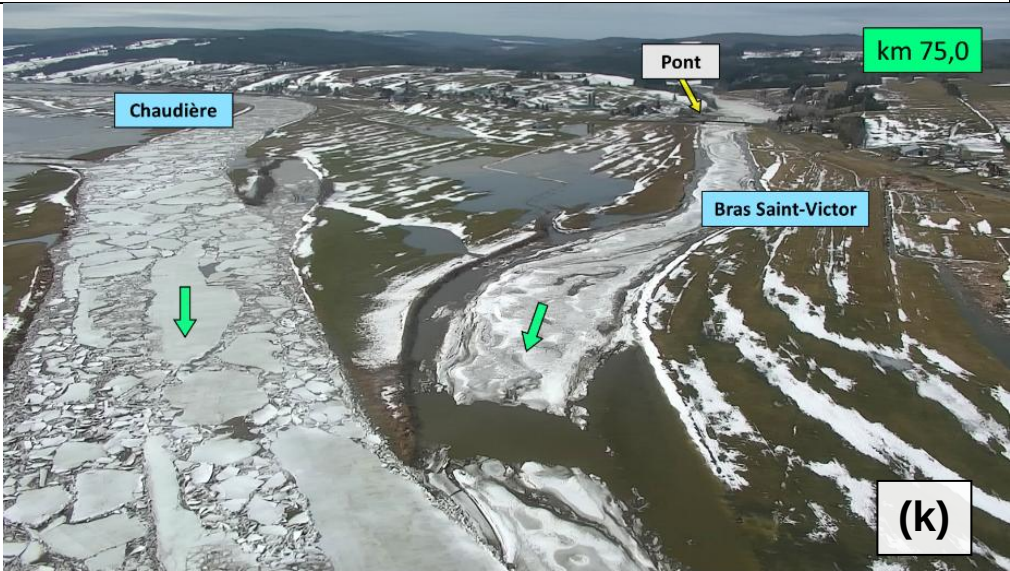
Image de caméra prise le 24 mars 2021 à 14h36. Première image de l'embâcle formé à la confluence de la rivière BSV dans la CH.	 (j) Chaudière BSV-0 TLC200 2021/03/24 14:36:03
Image d'un vol de drone prise le 25 mars 2021 à 10h03. Fonte du couvert de glace à l'embouchure de la rivière BSV et bris du couvert dans la CH en amont de la confluence.	 Chaudière Pont Bras Saint-Victor km 75,0 (k)

Image d'un vol de drone prise le 25 mars 2021 à 10h04. Embâcle dans la CH à 1,5 km en amont de la confluence BSV.	
Image d'un vol de drone prise le 25 mars 2021 à 10h06. Tête de l'embâcle débutant à la confluence BSV dans la CH.	

Image de caméra prise le 25 mars 2021 à 10h16. Élargissement de l'embâcle formé en aval dans le tributaire la journée précédente.	
Image de caméra prise le 25 mars 2021 à 12h36. Déplacement de l'embâcle situé à la confluence de la rivière BSV dans la CH.	

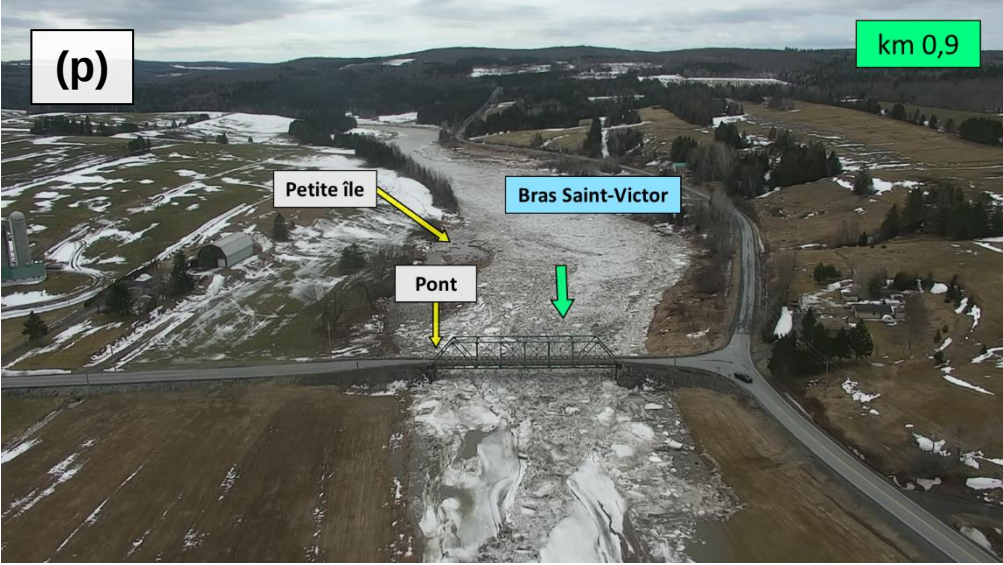
Image d'un vol de drone prise le 25 mars 2021 à 12h56. Embâcle d'une longueur d'environ 500 m dont le pied est situé à l'aval du pont de la rivière Le Bras dans la rivière BSV.	(p) km 0,9 Petite île Pont Bras Saint-Victor 
Image d'un vol de drone prise le 25 mars 2021 à 12h56. Fonte du couvert de glace à l'embouchure de la rivière BSV et bris du couvert dans la CH et à l'aval de la confluence.	(q) km 75,6 Chaudière Chaudière Bras Saint-Victor 

Image de caméra prise le 25 mars 2021 à 14h14. Première image d'un embâcle dans la CH en aval de la confluence BSV.	(r) CH-74 Chaudière  TLC200 2021/03/25 14:14:07
Image de caméra prise le 25 mars 2021 à 17h36. Dernière image de l'embâcle situé à la confluence de la rivière BSV dans la CH.	(s) BSV-0 Chaudière  TLC200 2021/03/25 17:36:03

(t) Image de caméra prise le 25 mars 2021 à 18h14. Dernière image d'un embâcle dans la CH en aval de la confluence BSV.	
(u) Image prise lors de la visite de terrain le 26 mars 2021 à 12h40. Embâcle en amont du pont de la rivière Le Bras dans la rivière BSV.	

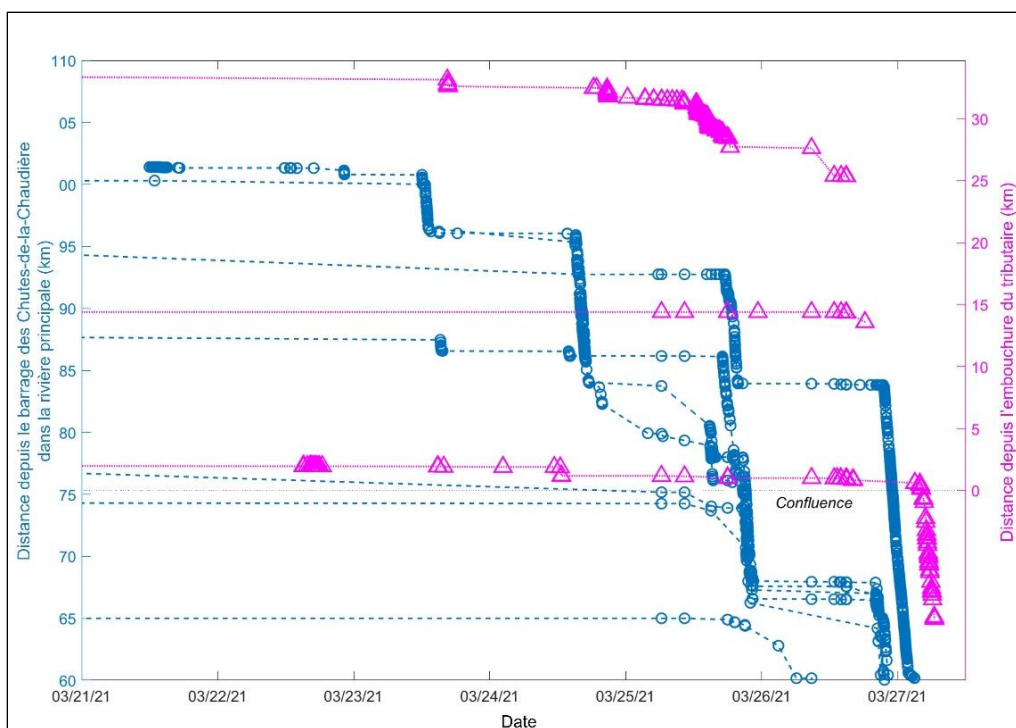


Figure 85. Données de traceurs GPS pour la confluence BSV durant la débâcle 2021.

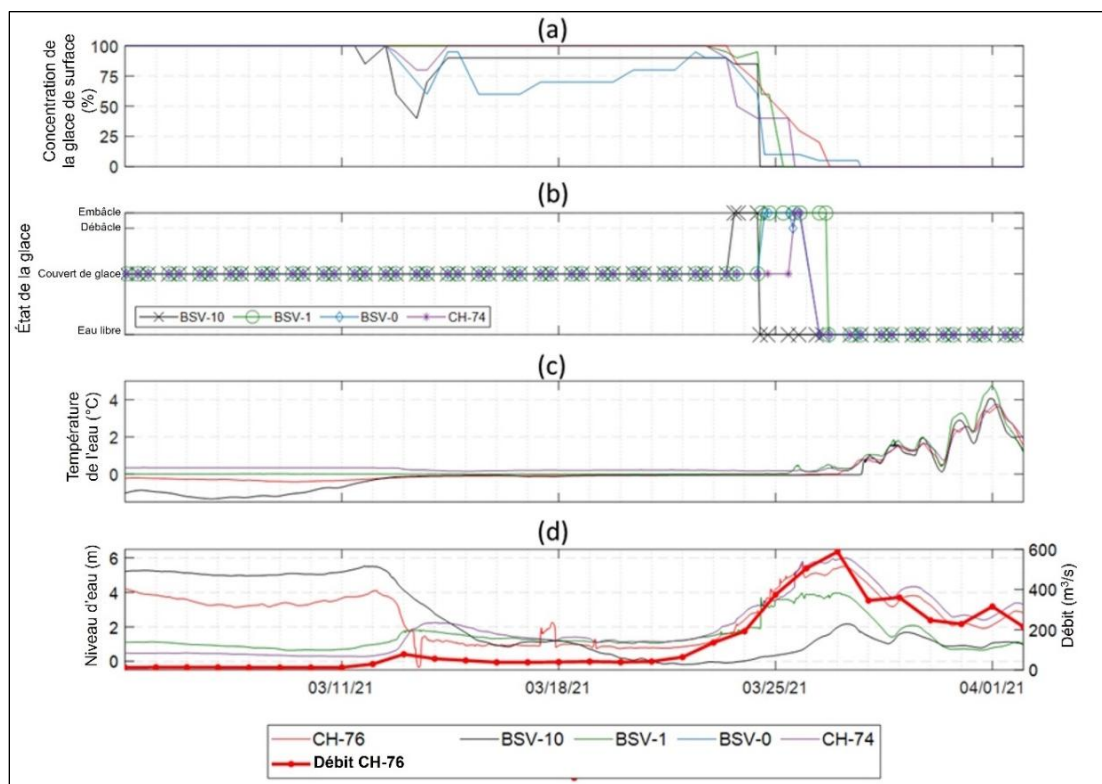


Figure 86. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2021 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c)

température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143,5 m à CH-76, 201,6 m à BSV-10, 145 m à BSV-1 et 141,2 m à CH-74.

La glace a persisté à tous les sites d'observation de la confluence BSV jusqu'à ce que la débâcle débute simultanément à tous les sites le 24 mars 2021 lorsque le débit a augmenté à 192 m³/s sur la CH (figure 86a, 86b, 86d). Cette même journée, une pluie de 4 mm a eu lieu, accompagnée d'un DJDC-5 de 63,1 °C.J (figure 58c, 58d).

Un embâcle s'est formé au site amont dans le tributaire (BSV-10) le 23 mars 2021 (tableau 30c) et s'est déplacé vers l'aval à 9h55 le 24 mars 2021 pour reformer un embâcle près de l'embouchure du tributaire (BSV-1) à 11h46 (tableau 30d, e, h, i). La glace a donc parcouru un peu plus de 9 km en l'espace de deux heures et le site BSV-10 a été libre de glace à partir de ce moment (figure 86a, b). L'embâcle a ensuite été transporté vers l'aval pour arriver à BSV-0 à 14h36 le 24 mars 2021, parcourant 1,2 km en moins de trois heures (tableau 30j).

Alors que le débit dans la CH était de 374 m³/s, des embâcles se sont formés sur la CH à la fois en aval (CH-74) et en amont (km 75,3 à 79,0) de la confluence le 25 mars 2021 (figure 86d et tableau 30k, l, m, q, r). Des embâcles étaient présents aux sites BSV-1, BSV-0 et CH-74 jusqu'au 25 mars 2021, puis les sites BSV-0 et CH-74 se sont libérés de leurs glaces durant la nuit suivante (tableau 30n, o, p, q, r, s, t). La dernière obstruction a finalement cédé à BSV-1 en date du 26 mars 2021 (tableau 30u) à la suite d'une précipitation de 21,4 mm accompagnée de la température ambiante maximale de la saison (figure 58b, d). L'embâcle est resté plus longtemps à l'aval du tributaire (BSV-1) en raison de restrictions supplémentaires occasionnées par le pont de la rivière BSV situé à 1,1 km de la confluence et par la présence d'un banc d'accumulation immédiatement en amont du pont (tableau 30u). Aucun passage de glace n'a été observé par la suite aux deux sites en aval dans la CH, ce qui indique que l'embâcle a fondu sur place en raison de la pluie et des températures élevées (figure 58b, d). Les températures de l'eau ont commencé à augmenter le 27 mars 2021 pour toutes les sections de la confluence BSV, date à laquelle les restes du couvert de glace aux sites en amont de la confluence (CH-76) et à la confluence (BSV-0) ont disparu (figure 85 et figure 86a, b, c). Cette journée a été marquée par le débit le plus élevé de la saison dans la CH atteignant 588 m³/s (figure 86d).

En résumé, la débâcle 2021 a été simultanée à tous les sites de la confluence BSV. Ainsi, les morceaux de glace provenant du tributaire ont contrôlé l'évacuation de la glace sur la CH, provoquant de multiples embâcles dans le tributaire au pont de la rivière Le Bras ainsi qu'en aval et en amont de la confluence sur plusieurs kilomètres.

Débâcle 2022

Le tableau 31 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la

débâcle 2022. Les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 87.

Tableau 31. Images pertinentes de la débâcle 2022 à la confluence BSV. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

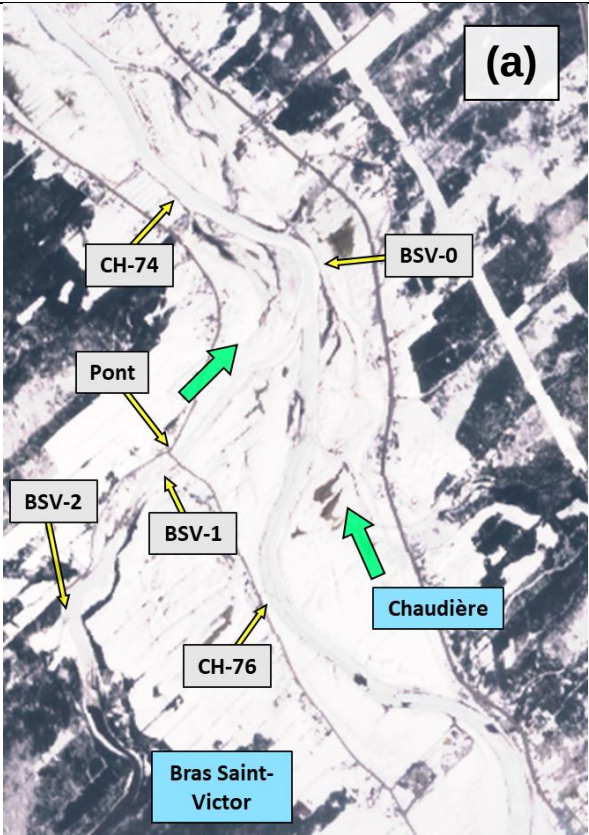
Description	Image
Image satellite prise le 23 mars 2022. Le couvert de glace est intact dans toutes les zones de la confluence BSV. Le tributaire est libre de glace à partir du km 3.	
Image de caméra prise le 26 mars 2022 à 16h. Formation d'un embâcle dans la rivière BSV au km 2,1.	

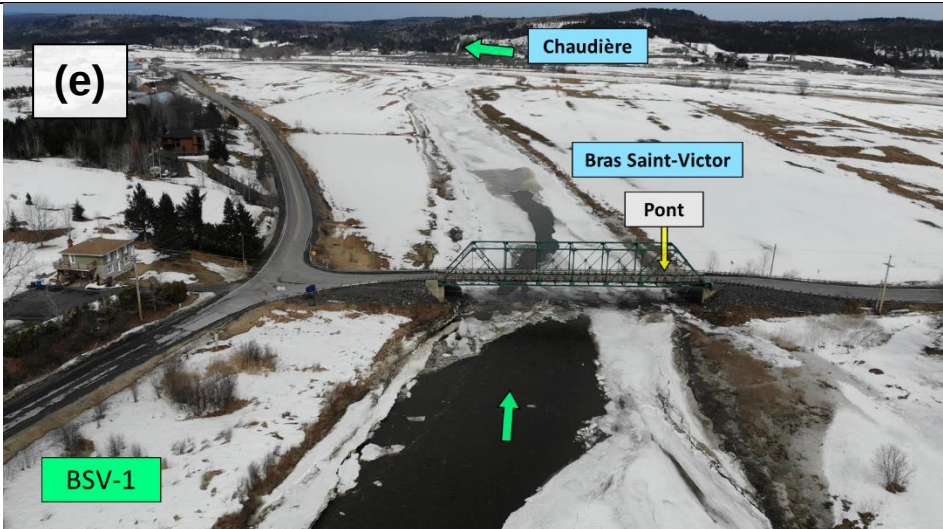
Image de caméra prise le 26 mars 2022 à 18h. Déplacement de l'embâcle au km 2,1 de la rivière BSV vers l'aval.	(c) BSV-2 Bras Saint-Victor 
Image de caméra prise le 27 mars 2022 à 8h. Dernière image capturée de l'embâcle apparu dans la rivière BSV la journée précédente.	(d) BSV-2 Bras Saint-Victor 
Image d'un vol de drone prise le 31 mars 2022 à 17h45. Le couvert de glace dans la BSV est intact entre la confluence et le km 1,1.	(e) Chaudière Bras Saint-Victor Pont BSV-1 

Image d'un vol de drone prise le 31 mars 2022 à 17h45.

La BSV est majoritairement libre de glace en amont du pont de la rivière Le Bras situé au km 1,2.

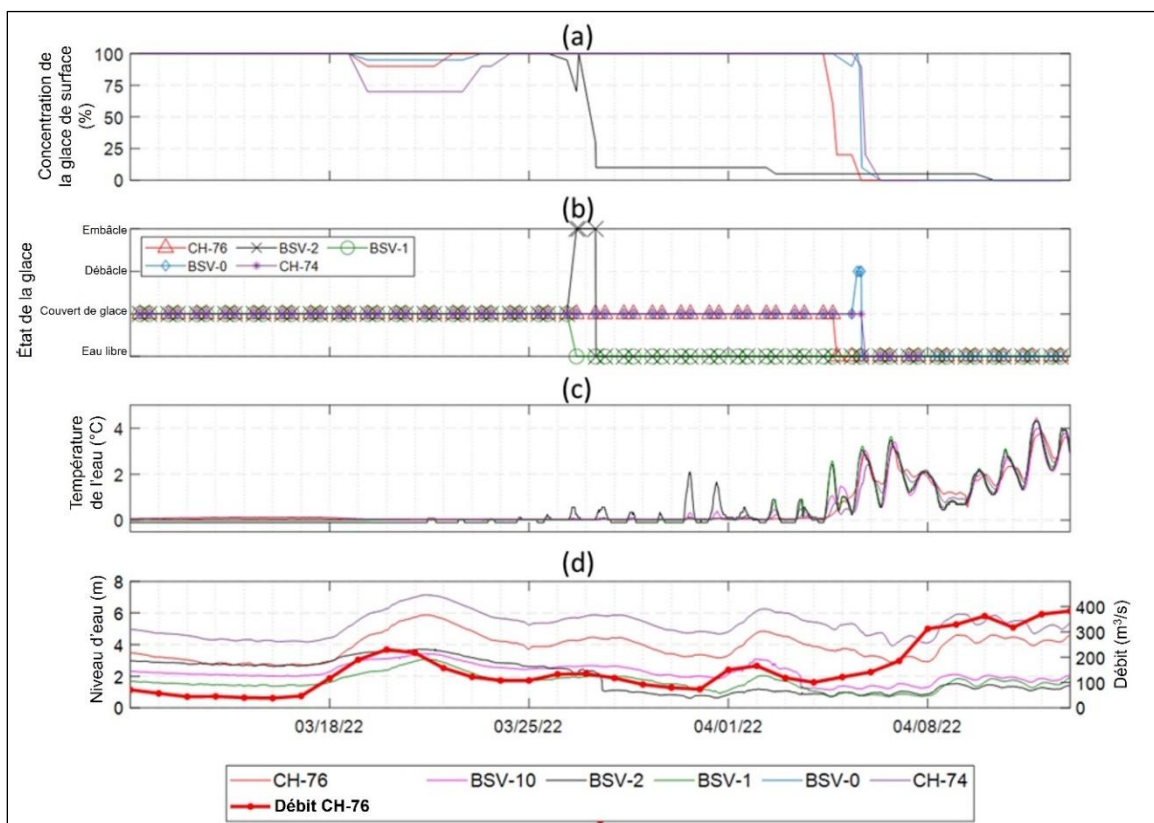
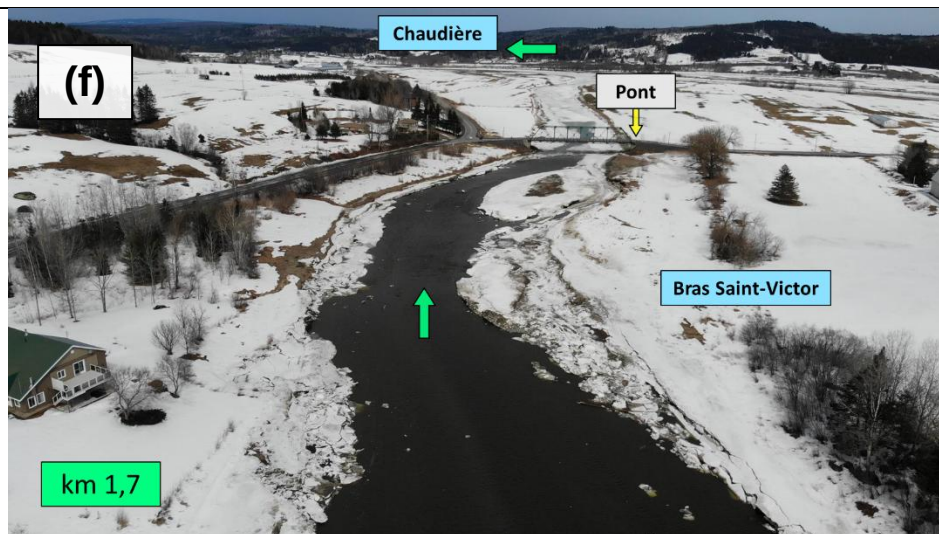


Figure 87. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2022 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143,1 m à CH-76, 201,7 m à BSV-10, 148,6 m à BSV-2, 145,4 m à BSV-1 et 142,0 m à CH-74.

Le couvert de glace a commencé sa disparition dans le tributaire en aval puis en amont. En raison d'une pluie de 25,4 mm de hauteur le 18 et le 19 mars 2022, une perte d'environ 30 % du couvert de glace dans la CH (CH-74) a eu lieu entre le 19 et le 23 mars 2022. Cependant, cette perte du couvert de glace n'est pas considérée comme le début de la débâcle puisque le couvert s'est reformé entièrement par la suite en raison des faibles températures ambiantes (figure 59d et figure 87a). À l'aval du tributaire, le couvert s'est d'abord retiré dans le secteur du km 3 où la rivière était en eau libre en date du 23 mars 2022, puis des km 1,2 (BSV-1) et 2,1 (BSV-2) entre le 26 et le 27 mars 2022 alors que les DJDC-5 connaissaient un maximum de 89 °C.J (tableau 31a, figure 87b et figure 59c). Avant la perte finale du couvert de glace de l'aval du tributaire, un embâcle s'est formé au site BSV-2 (tableau 31b, c, d). À la suite de son évacuation, le niveau d'eau a connu une diminution soudaine de plus d'un mètre durant la nuit du 27 au 28 mars 2022 (BSV-2) et la température de l'eau a commencé à augmenter (figure 87c, d). La température de l'eau, au site le plus en aval dans le tributaire (BSV-1), a commencé sa croissance une semaine plus tard, soit à partir du 2 avril 2022 alors que les DJDC-5 dépassaient tout juste 100 °C.J (figure 87c et figure 59c). Pour terminer, le couvert de glace a disparu en amont dans le tributaire (BSV-10) le 3 avril 2022, à la suite de l'augmentation des températures de l'eau et de la diminution soudaine du niveau d'eau à ce moment (figure 87c, d).

Le couvert de glace s'est retiré de la rivière principale, de l'amont vers l'aval. En effet, durant le 4 et le 5 avril 2022, le couvert a disparu au site CH-76, en amont de la confluence (figure 87a, b). Par la suite, la température de l'eau à ce site s'est mise à augmenter, tout comme le débit à partir du 4 avril 2022 pour atteindre son maximum à 363 m³/s à la fin de la saison le 10 avril 2022, après avoir reçu 28,6 mm de pluie (figure 87c, d et figure 59d). Finalement, le couvert de glace s'est retiré simultanément du reste de la CH, soit à la confluence (BSV-0) et à son aval (CH-74), en date du 6 avril 2022 marquant la dernière journée de la saison avec des températures de l'air négatives (figure 87a, b et figure 59b). Encore une fois, c'est à ce moment que la température de l'eau s'est mise à augmenter de manière significative et que le niveau d'eau a diminué très rapidement (figure 87c, d).

Pour conclure, la fonte du couvert de glace a débuté dans la rivière BSV, entraînant la formation d'un embâcle dans le tributaire au km 2,1, juste en amont des bancs d'accumulation. Toutefois, aucune accumulation n'a pu être observée dans la rivière principale en raison de la nature thermique et donc progressive de la débâcle 2022.

Débâcle 2023

Le tableau 32 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023. Les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 88.

Tableau 32. Images pertinentes de la débâcle 2023 à la confluence BSV. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

Description	Image
Image caméra prise le 10 avril 2023 à 16h53. Accumulation de glace au site CH-76. La rivière se retrouve en eaux libres à 17h53.	(a)  CH-76 Chaudière
Image caméra prise le 6 avril 2023 à 19h. Dernière présence du couvert de glace au site BSV-10. Le lendemain la rivière se retrouve en eaux libre.	(b)  BSV-10 Bras Saint-Victor

Image caméra prise le 31 décembre 2022 à 8h30. La rivière est sortie de son lit et il y a accumulation de glace au site BSV-10. Retour à la normale le 2 janvier 2023.	(c) BSV-10  Bras Saint-Victor
Image caméra prise le 31 décembre 2022 à 12h. La rivière sort de son lit et entraîne plusieurs morceaux de glace au site BSV-2.	(d) BSV-2  Bras Saint-Victor
Image caméra prise le 1^{er} janvier 2023 à 17h30. Le niveau d'eau a encore monté.	(e) BSV-2  Bras Saint-Victor

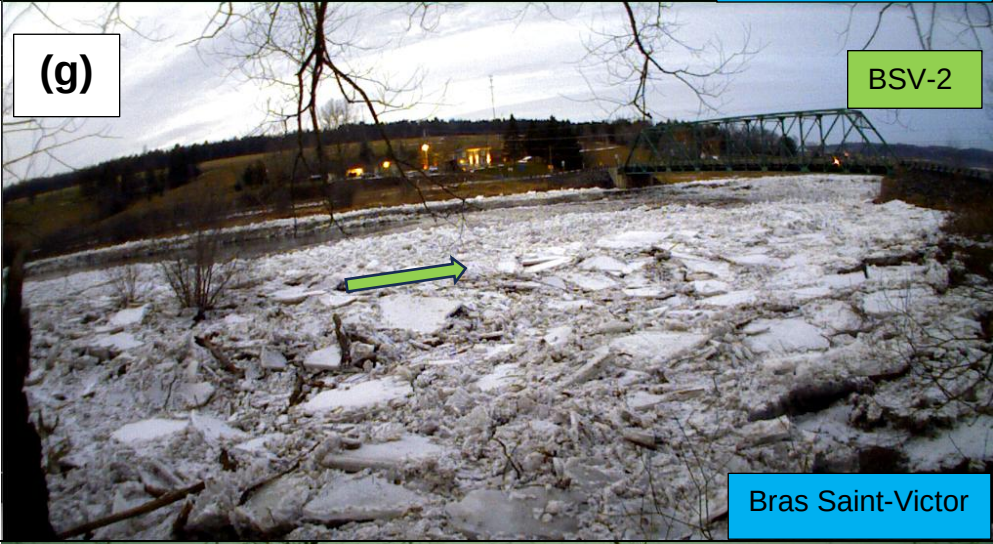
Image caméra prise le 2 janvier 2023 à 17h. L'eau se retire de sous la glace.	(f) BSV-2  Bras Saint-Victor
Image caméra prise le 3 janvier 2023 à 17h30. Moment avant la disparition totale du couvert de glace sur la rivière et du retour du niveau d'eau normal.	(g) BSV-2  Bras Saint-Victor
Image caméra prise le 5 avril 2023 à 15h30. Accumulation de glace au site BSV-2. Vers 19h le lendemain, la rivière est libre de glace.	(h) BSV-2  Bras Saint-Victor

Image caméra prise le 7 avril 2023 à 10h30. La rivière est entièrement recouverte de glace. Le lendemain vers 13h, la rivière n'a plus aucune glace.	(i) 
Image caméra prise le 1^{er} janvier 2023. Après l'augmentation du niveau d'eau, la rivière perd tout son couvert de glace au site BSV-0.	(j) 
Image caméra prise le 9 avril 2023 à 20h. La glace s'est liée pour former un couvert presque uniforme au site BSV-0. Le lendemain la rivière est libre de glace.	(k) 

Image caméra prise le 1^{er} janvier 2023 à 11h30. Débordement de la rivière et accumulation de glace sur les rives au site CH-74.	(l) CH-74  Chaudière
Image caméra prise le 1^{er} avril 2023 à 16h. Le niveau d'eau redevient normal au site CH-74.	(m) CH-74  Chaudière
Image caméra prise le 10 avril 2023 à 16h. Accumulation de glace au site CH-74. Quelques heures plus tard, la rivière perd complètement son couvert de glace.	(n) CH-74  Chaudière

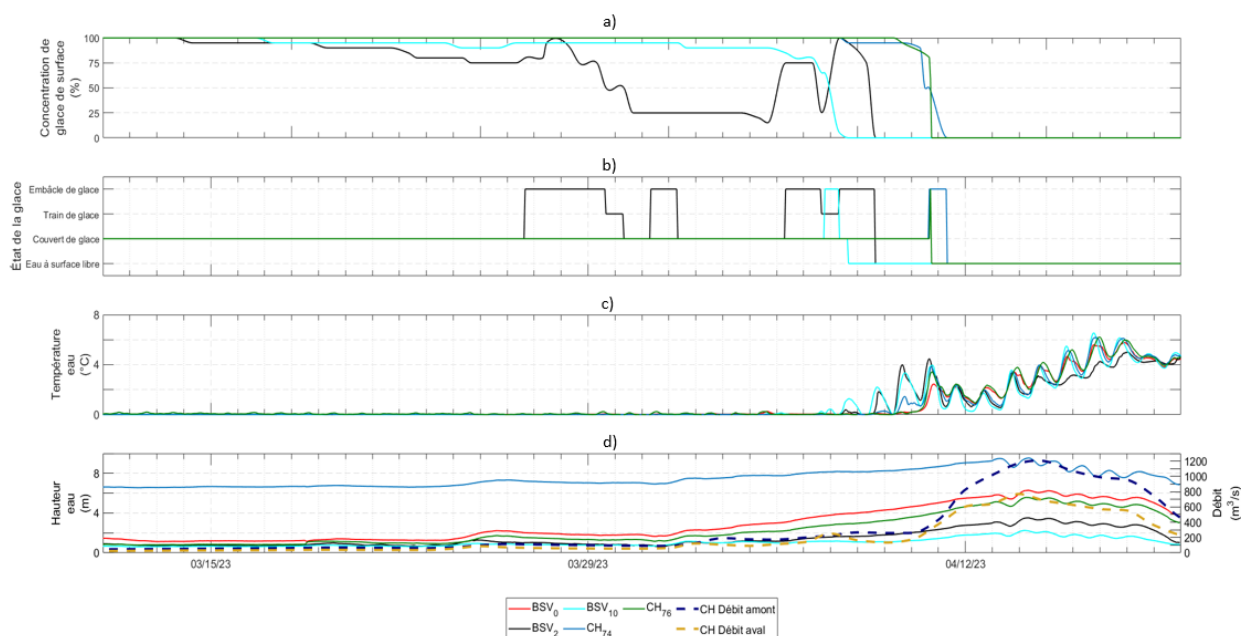


Figure 88. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2023 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143,33 m à CH-76, 201,87 m à BSV-10, 145,18 m à BSV-2, 142,52 m à BSV-0 et 142,25 m à CH-74.

Lors de la débâcle de 2023 à la confluence BSV, le couvert de glace a commencé à disparaître dans le tributaire, se libérant de l'aval vers l'amont. La glace s'est ensuite dégagée à la confluence, puis de l'aval vers l'amont dans la rivière CH. Avant la disparition complète du couvert en aval du tributaire, un embâcle s'est formé au site BSV-2 le 27 mars et a persisté jusqu'au 30 mars (figure 91b). Un deuxième embâcle s'est produit au même site le lendemain, soit du 31 mars au 1^{er} avril. Le couvert de glace en amont dans le tributaire (BSV-10) a disparu quant à lui le 7 avril 2023, tout juste après avoir, lui aussi, subi un embâcle la veille le 6 avril. À pareille date, un embâcle au site plus en aval dans le tributaire (BSV-2) s'est formé, empêchant la libération de la glace des sites plus en amont.

Le couvert de glace s'est finalement retiré de la rivière principale, de l'amont vers l'aval. Durant la journée du 10 avril, il a disparu du site en amont de la confluence (CH-76) (figure 91). Par la suite, la température de l'eau à ce site s'est mise à augmenter, tout comme le débit estimé dans la CH en amont de la confluence à partir du 11 avril pour atteindre son maximum à 769,3 m³/s le 14 avril. Finalement, le couvert de glace s'est retiré du reste de la CH, soit à la confluence, le 21 mars (BSV-0) et à son aval le 11 avril (CH-74). Le 9 avril marque la dernière journée de la saison avec des températures de l'air négatives (figure 60b).

En conclusion, la disparition du couvert de glace a débuté dans la rivière BSV, entraînant la formation d'un embâcle au kilomètre 2,1 du tributaire, en amont des bancs d'accumulation. Par la suite, la rivière principale s'est libérée de sa glace de l'amont vers l'aval, provoquant des embâcles avant et après la confluence.

Débâcle 2024

Le tableau 33 présente des images satellite, des prises de vue issues de caméras installées sur les sites et des captations par drones, pertinentes pour l’analyse de la débâcle 2024. Les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 89.

Tableau 33. Images pertinentes de la débâcle 2024 à la confluence BSV. Les flèches vertes indiquent le sens de l’écoulement.

Description	Image
Image satellite prise le 2 mars 2024 à 15h50. Le couvert de glace est intact sur la rivière CH et BSV autour de la confluence, à l’exception d’un trou présent dans le couvert de glace juste à l’amont de la confluence, sur la rivière CH.	
Image caméra prise le 5 mars 2024 à 8h45. Un embâcle de glace se forme au site BSV-0 alors que la veille, le couvert de glace est intact. Il reste en place quelques jours avant de laisser la rivière en eau libre à partir du 9 mars.	

Image caméra prise le 5 mars 2024 à 11h. Un embâcle de glace se forme au site CH-77 alors que la veille, le couvert de glace est intact. Il reste en place quelques jours avant de laisser passer un train de glace, puis la rivière devient libre de glace à partir du 9 mars.	(c) CH-77  Chaudière TLC200 2024/03/05 11:00:05
Image caméra prise le 10 mars 2024 à 18h30. Embâcle de glace au site BSV-1 qui disparaît le lendemain en laissant la rivière en eau libre à partir du 11 mars.	(d) BSV-1  Bras-Saint-Victor TLC200 2024/03/10 18:30:06

Image caméra prise le 22 mars 2024 à 12h30. Apparition d'un train de glace au site CH-77 créant ensuite un couvert de glace partiel. À partir du 26 mars, la rivière est définitivement en eau libre sur ce site.	(e) CH-77 
Image caméra prise le 22 mars 2024 à 12h30. Un embâcle de glace se crée au site BSV-0 alors que la veille, la rivière est en eau libre avec l'apparition de trains de glace. Il reste en place quelques jours avant que la rivière ne soit définitivement libre de glace sur ce site à partir du 27 mars 2024.	(f) BSV-0 

Image satellite prise le 22 mars 2024 à 15h50.

Le couvert de glace est ouvert sur la rivière CH en amont et en aval de la confluence. Le couvert est partiellement ouvert sur la rivière BSV.

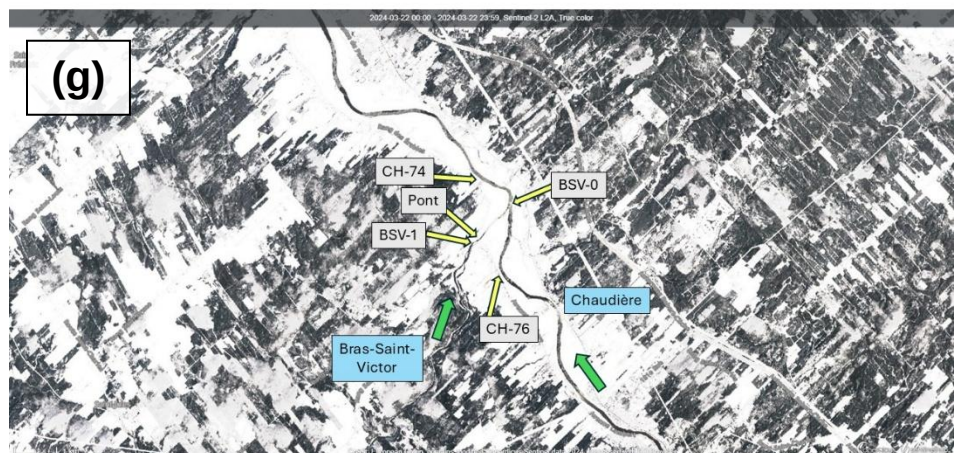


Image caméra prise le 24 mars 2024 à 8h.

Un embâcle de glace apparaît au site BSV-1 à la suite d'un train de glace observé la veille. Il reste en place quelques jours avant que la rivière ne redevienne libre de glace à partir du 27 mars.



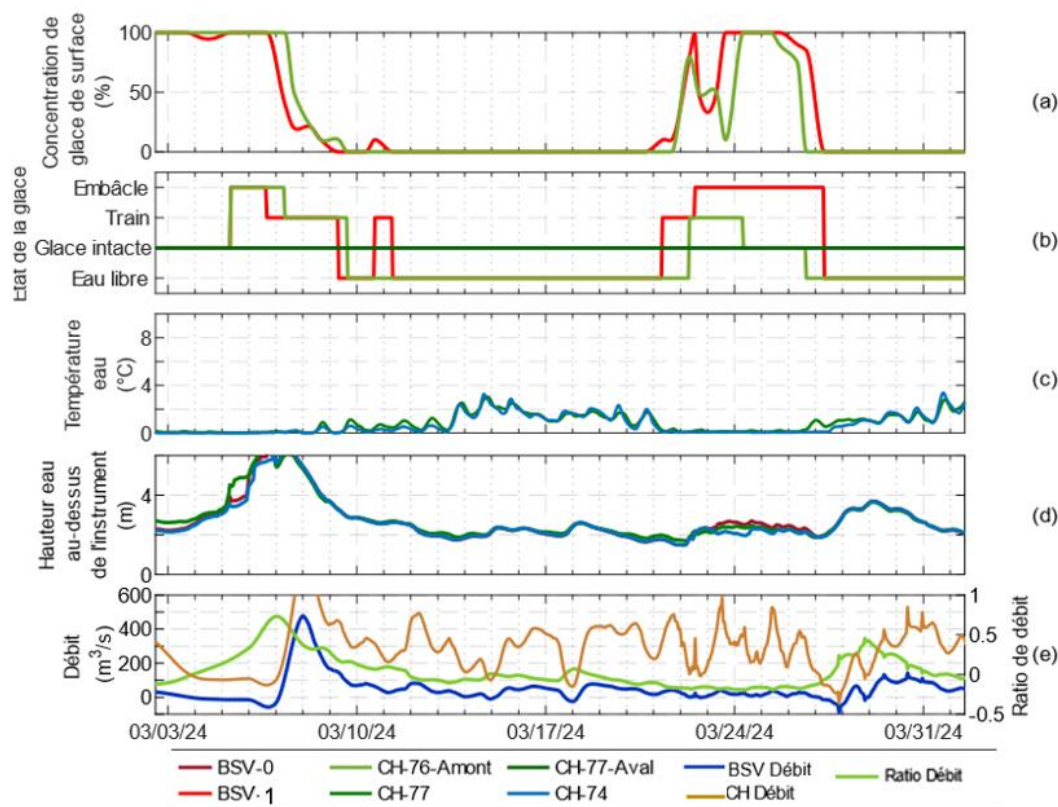


Figure 89. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BSV durant la débâcle 2024 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau, (d) niveau d'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 143,37 m à CH-76, 142,73 m à BSV-0 et 142,53 m à CH-74.

La débâcle 2024 à la confluence BSV a débuté par la disparition progressive du couvert de glace dans le tributaire, avec une fonte amorcée de l'aval vers l'amont (tableau 32b, 32d). La libération de la glace s'est ensuite propagée à la confluence, avant d'affecter la rivière CH, où la fonte a également suivi un mouvement de l'aval vers l'amont (tableau 32).

Un événement de pluie le 6 mars 2024 totalisant 14 mm qui a eu des impacts importants coïncide avec la création d'embâcles aux sites CH-76-Amont et BSV-1, soit les deux sites à l'amont de la confluence (figure 89b et figure 61b). La glace du tributaire s'est transformée en train avant celle de la rivière principale, le lendemain, soit le 7 mars 2024.

Un deuxième embâcle s'est ensuite formé au site BSV-1 le 23 mars, en lien avec une chute soudaine des températures et une accumulation de neige importante de 16 cm (figure 89b et figure 61b, 61d). La période du 21 au 25 mars a marqué des journées plus froides, avec des températures inférieures à -5 °C, provoquant une stagnation des degrés-jours de dégel cumulatifs (DJDC-5) à un total de 114,6 °C.J (figure 61c). Cet embâcle a persisté jusqu'au 27 mars avant d'être rompu sous l'effet de l'augmentation des températures et de l'apport en eau associé aux précipitations de 5 mm du 26 mars (figure 89b et figure 61b, e).

En conclusion, les deux sites situés directement à l'amont de la confluence ont réagi de manière semblable aux conditions météorologiques, avec la formation d'embâcles simultanés. La perte de plusieurs caméras en 2024 complique l'évaluation de l'influence de l'amont des rivières sur la formation des embâcles. Toutefois, il est possible d'observer que la rivière BSV s'est libérée de sa glace un jour après la rivière CH, où les trains de glace ont probablement entravé l'évacuation de la glace du tributaire.

Résumé

La figure 90 présente les sites à la confluence BSV où des embâcles printaniers ont été observés durant toutes les saisons étudiées, soit de 2019-2020 à 2023-2024. Le tableau 34 précise quant à lui les dates auxquelles les embâcles printaniers ont été observés et les instruments utilisés pour les détecter. Il est à noter que ces résultats reflètent uniquement l'information analysée et ne prétendent pas être exhaustifs.

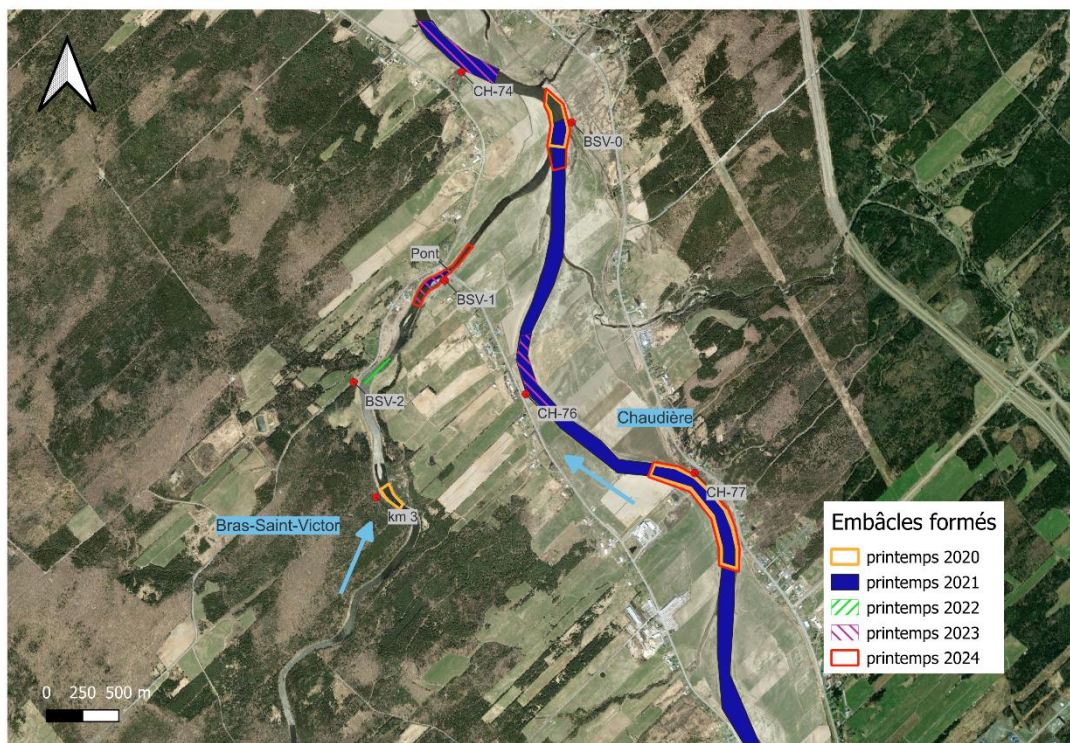


Figure 90. Embâcles printaniers observés directement à la confluence BSV pour toutes les saisons étudiées.

Tableau 34. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles printaniers observés à la confluence BSV pour toutes les saisons étudiées.

Année	Instrument de capture	Rivière	Station	Date
2020	Vol de drone	Bras Saint-Victor	km 3,0	26 mars 2020
	Caméra CH-77	Chaudière	km 77,4	3 avril 2020
	Vol de drone	Chaudière	km 80,0	3 avril 2020
	Caméra CH-77	Chaudière	km 77,4	3 avril au 5 avril 2020
	Caméra BSV-0	Chaudière	km 75,1	3 avril 2020
	Vol de drone	Chaudière	Confluence BSV et son amont	6 avril 2020
2021	Caméra BSV-10	Bras Saint-Victor	km 10,6	23 mars au 24 mars 2021
	Vol de drone	Bras Saint-Victor	km 1,0 à 2,1	24 mars 2021
	Caméra BSV-1	Bras Saint-Victor	km 1,2	24 mars au 26 mars 2021
	Caméra BSV-0	Chaudière	km 75,1	24 mars au 25 mars 2021
	Vol de drone	Chaudière	Confluence BSV et son amont	25 mars 2021
	Vol de drone	Bras Saint-Victor	km 1,2	25 mars 2021
	Caméra CH-74	Chaudière	km 74,2	25 mars 2021
	Caméra manuelle	Bras Saint-Victor	km 1,2	26 mars 2021
2022	Caméra BSV-2	Bras Saint-Victor	km 2,1	26 mars au 27 mars 2022
2023	Caméra CH-74	Chaudière	km 74,2	2 avril au 10 avril 2023
	Caméra CH-76	Chaudière	km 76,0	9 avril 2023
	Caméra BSV-1	Bras Saint-Victor	km 1,2	26 mars au 29 mars 2023
	Caméra BSV-1	Bras Saint-Victor	km 1,2	2 avril au 6 avril 2023
2024	Caméra BSV-0	Chaudière	km 75,1	5 mars au 6 mars 2024
	Caméra BSV-0	Chaudière	km 75,1	22 mars au 26 mars 2024
	Caméra BSV-1	Bras Saint-Victor	km 1,2	5 janvier au 10 mars 2024
	Caméra CH-77	Chaudière	77,4	12 déc. Au 18 déc. 2023

La débâcle a débuté dans la rivière BSV pour toutes les saisons étudiées, mais les répercussions de ces événements ne se sont pas fait sentir de la même manière d'une année à l'autre. En effet, en raison de la nature dynamique des débâcles de 2020 et 2021, plusieurs embâcles ont été formés dans le tributaire ainsi que dans la rivière principale. Des obstructions ont pu être observées dans la CH entre la confluence et plusieurs kilomètres en amont pour ces deux années (figure 90 et tableau 34). Des embâcles ont également été observés dans le tributaire au km 3 en 2020 et entre les km 1 et 2,1 ainsi qu'au km 10,6 en 2021 (figure 90 et tableau 34). De plus, une obstruction s'est créée au site CH-74 en aval de la confluence en 2021. La débâcle 2022 a été de nature thermique et donc beaucoup plus progressive. Celle-ci n'a engendré l'observation d'aucun embâcle dans la CH et d'un seul embâcle dans le tributaire au km 2,1 (figure 90 et tableau 34).

Les débâcles des années 2023 et 2024 sont assez similaires. Les embâcles se sont formés à des emplacements rapprochés, tant sur le tributaire que sur la rivière principale, et sont apparus à peu près à la même période en raison de conditions météorologiques comparables.

La formation d'embâcles dans cette section de la CH est en partie due au fait que la rivière BSV, dont la confluence se trouve au centre de la moyenne CH, draine une surface représentant 15 % du bassin versant en amont de son embouchure (tableau 1). Cette proportion confère au tributaire un apport hydrique significatif susceptible d'augmenter le débit et la charge de glace durant la débâcle. Lorsque cet apport rejoint la rivière principale, il peut ainsi provoquer une surcharge locale en glace et favoriser son accumulation. De plus, la pente du tributaire près de la confluence est 14 fois plus élevée que celle de la rivière principale à cet endroit (tableau 2). Une vitesse d'écoulement plus forte est donc induite, ce qui facilite le transport rapide des glaces vers la confluence. Celles-ci ont alors tendance à ralentir brusquement en entrant dans la section à plus faible pente de la rivière principale, ce qui accentue le risque de formation d'un embâcle. Finalement, la débâcle est généralement initiée dans le tributaire, ce qui a pour conséquence de créer des accumulations de glace à la confluence lorsque la glace de la rivière BSV se heurte au couvert intact de la CH.

5.2.2 Rivière Sainte-Anne.

Cette section fait l'analyse des données de la confluence de la rivière BDN situé à 3,3 km du BCP dans la rivière STA.

5.2.2.1 Confluence Bras-du-Nord

Débâcle 2021

Le tableau 35 présente les images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021. Les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 91.

Tableau 35. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2021 à la confluence BDN. Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

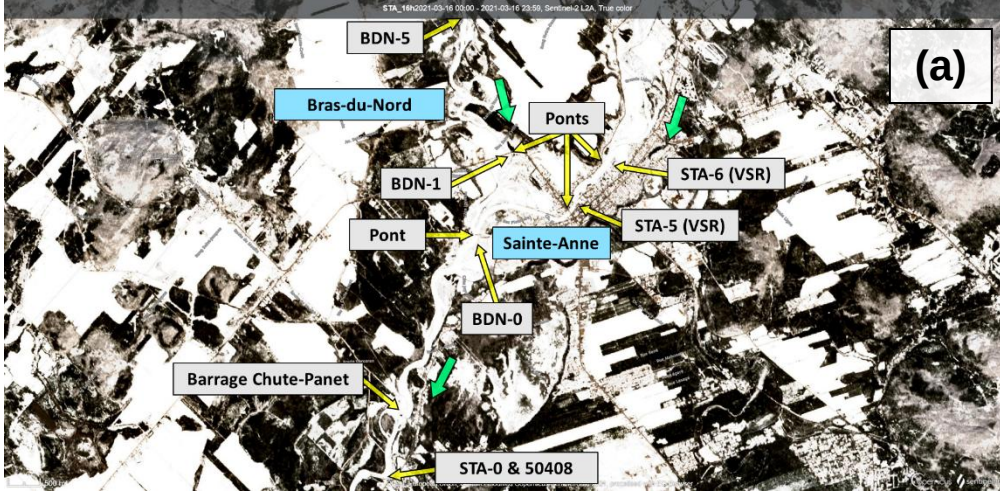
Description	Image
Image satellite prise le 16 mars 2021 à 12h. Le couvert de glace est intact sur les rivières BDN et STA.	

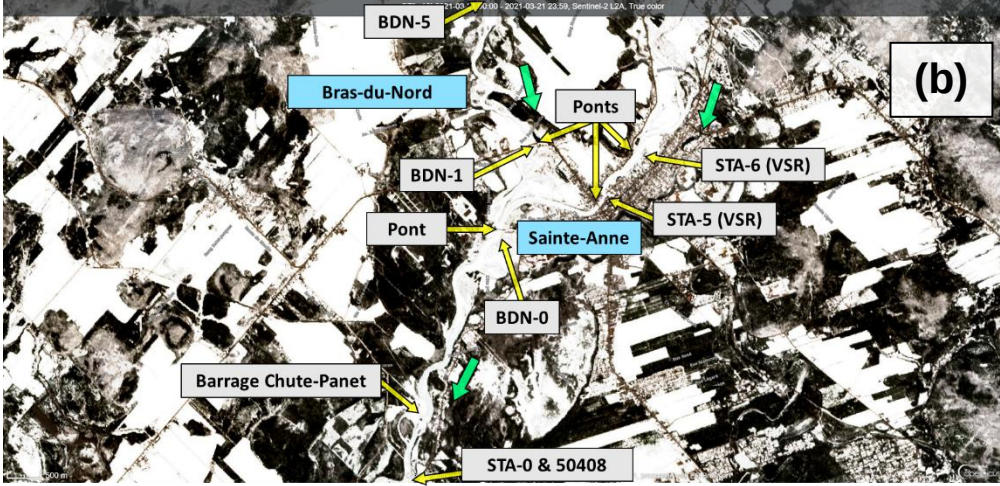
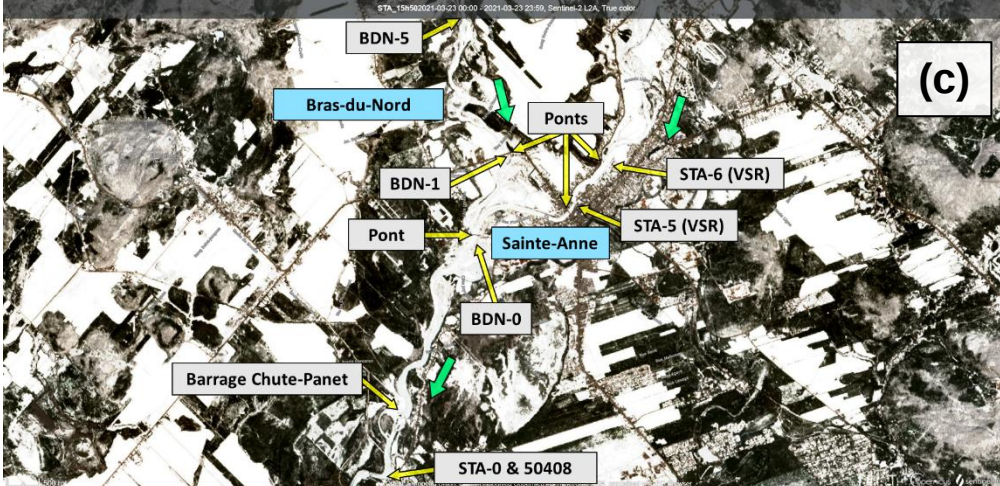
Image satellite prise le 21 mars 2021 à 12h. Le couvert de glace est intact sur les rivières BDN et STA, mis à part une ligne au centre de la STA (visible du site BDN-0 au site STA-5) due au passage d'une excavatrice spécialisée le 17 mars 2021.	
Image satellite prise le 23 mars 2021 à 11h50. Le couvert de glace est intact sur les rivières BDN et STA, à l'exception de l'ouverture créée par le passage d'une excavatrice spécialisée qui ne semble pas s'être élargie.	
Image de caméra prise le 27 mars 2021 à 5h56. Première image d'un embâcle en amont dans la rivière BDN contre un couvert de glace intact.	

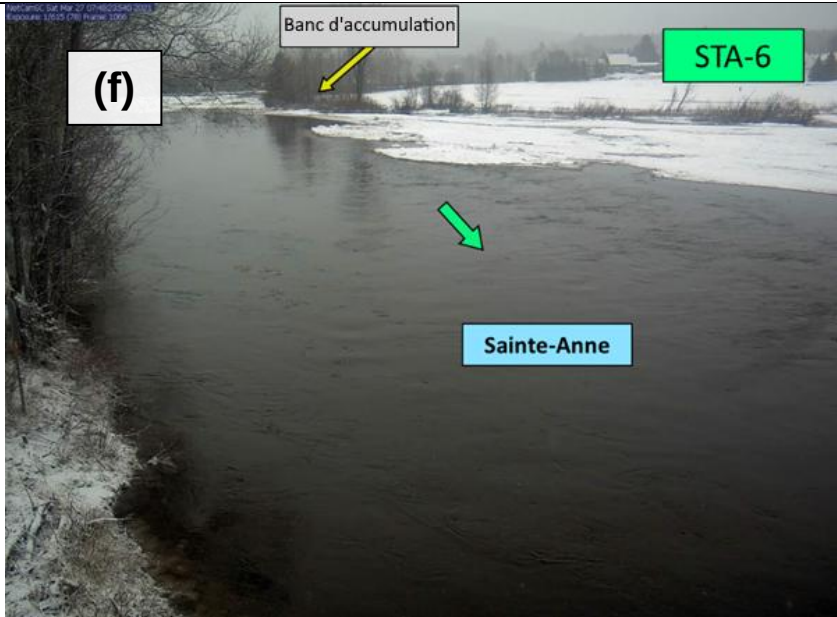
Image de caméra prise le 27 mars 2021 à 5h59. Première image d'un embâcle formé sur la rive droite dans la STA en amont de la confluence BDN.	
Image de caméra prise le 27 mars 2021 à 7h48. Première image d'un embâcle formé sur la rive gauche de la rivière STA en amont de la confluence BDN. Une accumulation de glace se trouve également à l'amont de la section.	

Image de caméra prise le 28 mars 2021 à 17h56. Dernière image d'un embâcle en amont dans la rivière BDN contre un couvert de glace intact.	(g) 
Image de caméra prise le 29 mars 2021 à 7h16. Embâcle à l'aval du site BDN-5.	(h) 

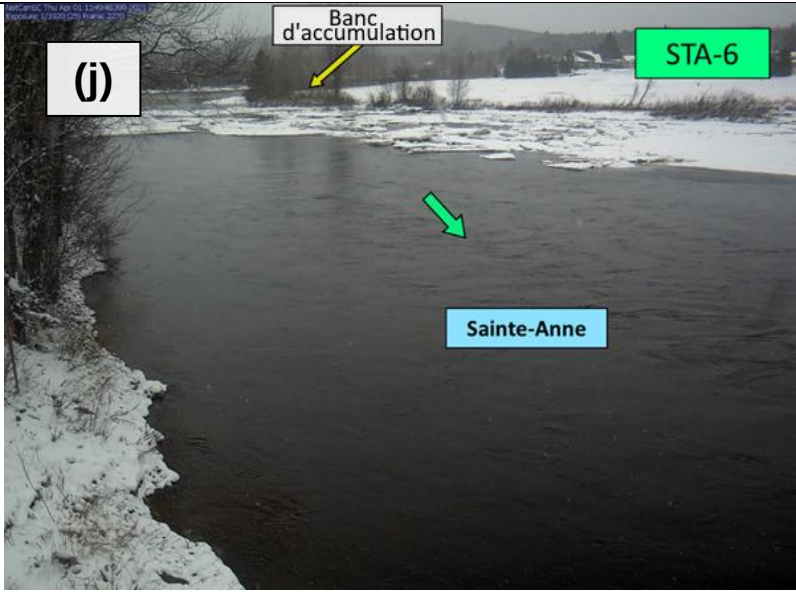
Image de caméra prise le 31 mars 2021 à 17h59. Dernière image d'un embâcle sur la rive droite dans la STA en amont de la confluence BDN.	
Image de caméra prise le 1^{er} avril 2021 à 11h49. Dernier moment où l'embâcle formé sur la rive gauche de la rivière STA en amont de la confluence BDN occupe la largeur entière de la STA.	

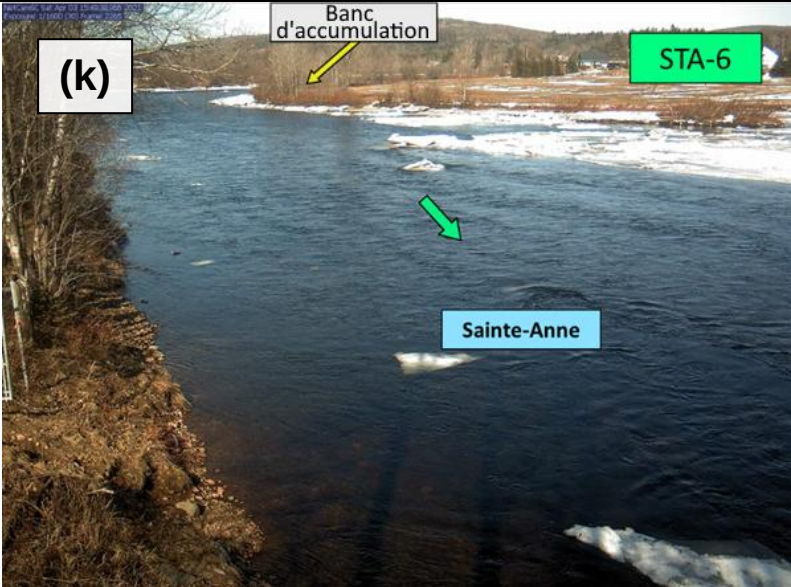
Image de caméra prise le 3 avril 2021 à 15h49. Dernière image d'un embâcle formé sur la rive gauche de la rivière STA en amont de la confluence BDN.	 (k) Banc d'accumulation STA-6 Sainte-Anne
Image de caméra prise le 4 avril 2021 à 18h30. Partie du couvert de glace coincée dans le coude situé au site BDN-1 à l'aval du pont de la route 367.	 (l) Pont Bras-du-Nord BDN-1 TLC200 2021/04/04 18:30:06

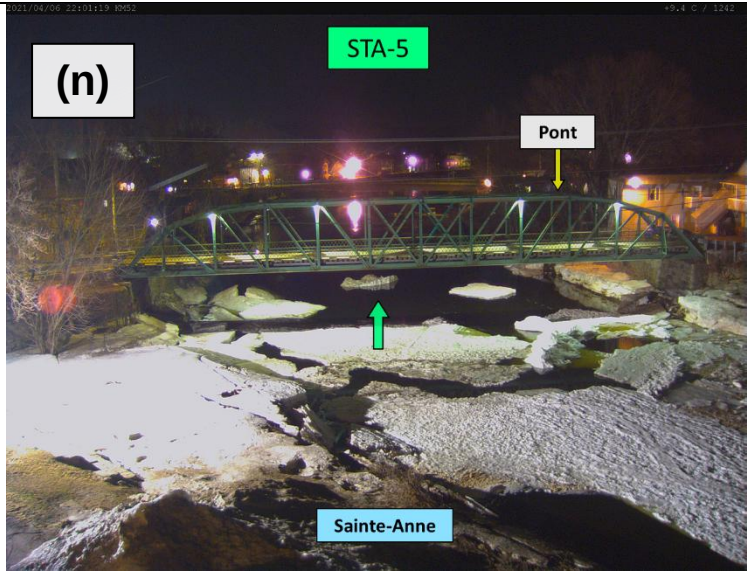
Image de caméra prise le 6 avril 2021 à 8h17. Le couvert de glace est disparu complètement de la rivière BDN (section aval) alors qu'il est toujours intact dans la STA à la confluence et à l'amont de celle-ci, mis à part une ligne au centre de la rivière créée par le passage d'une excavatrice spécialisée en date du 17 mars 2021.	
Image de caméra prise le 6 avril 2021 à 22h01. Première image d'un embâcle formé sur la rivière STA en amont du pont Tessier (av. Saint-Michel) en amont de la confluence.	

Image de caméra prise le 7 avril 2021 à 00h01. Dernière image d'un embâcle formé sur la rivière STA en amont du pont Tessier (av. Saint-Michel) en amont de la confluence.	 Image (o) showing a night view of a river with ice blocks upstream of a bridge. Labels include (o), STA-5, Pont, and Sainte-Anne.
Image de caméra prise le 7 avril 2021 à 6h17. Première image d'un embâcle formé dans la rivière STA tout juste en amont de la confluence.	 Image (p) showing a day view of a river with ice blocks. Labels include Bras-du-Nord, BDN-0, Sainte-Anne, and (p). A timestamp at the bottom reads 07/04/2021 06:17 AM -05°C.

Image satellite prise le 7 avril 2021 à 11h50.

Les rivières BDN et STA sont en eau libre, mis à part la section en amont du BCP avec un couvert d'une longueur de 1 km.

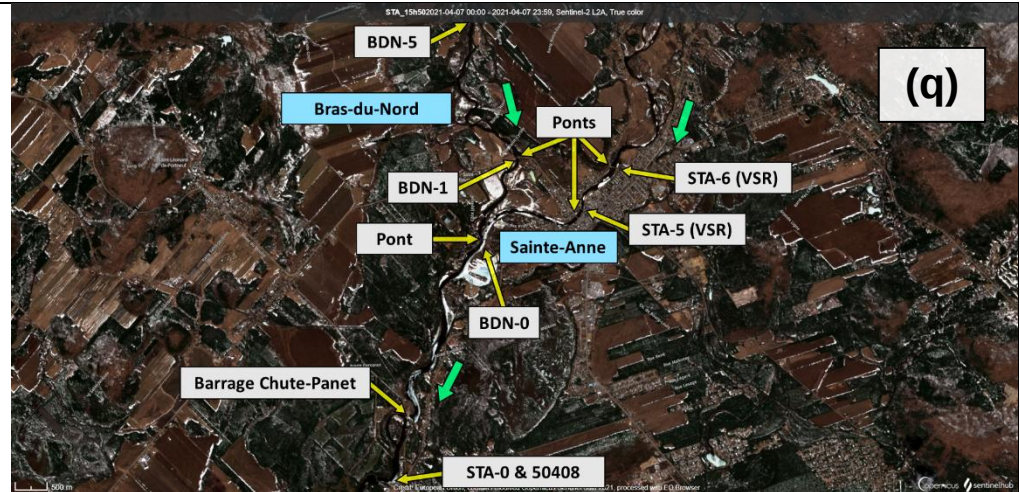


Image de caméra prise le 7 avril 2021 à 13h36.

Partie du couvert de glace coincé dans un coude au site STA-0.



Image de caméra prise le 7 avril 2021 à 14h17.

Dernière image d'un embâcle formé dans la rivière STA tout juste en amont de la confluence.

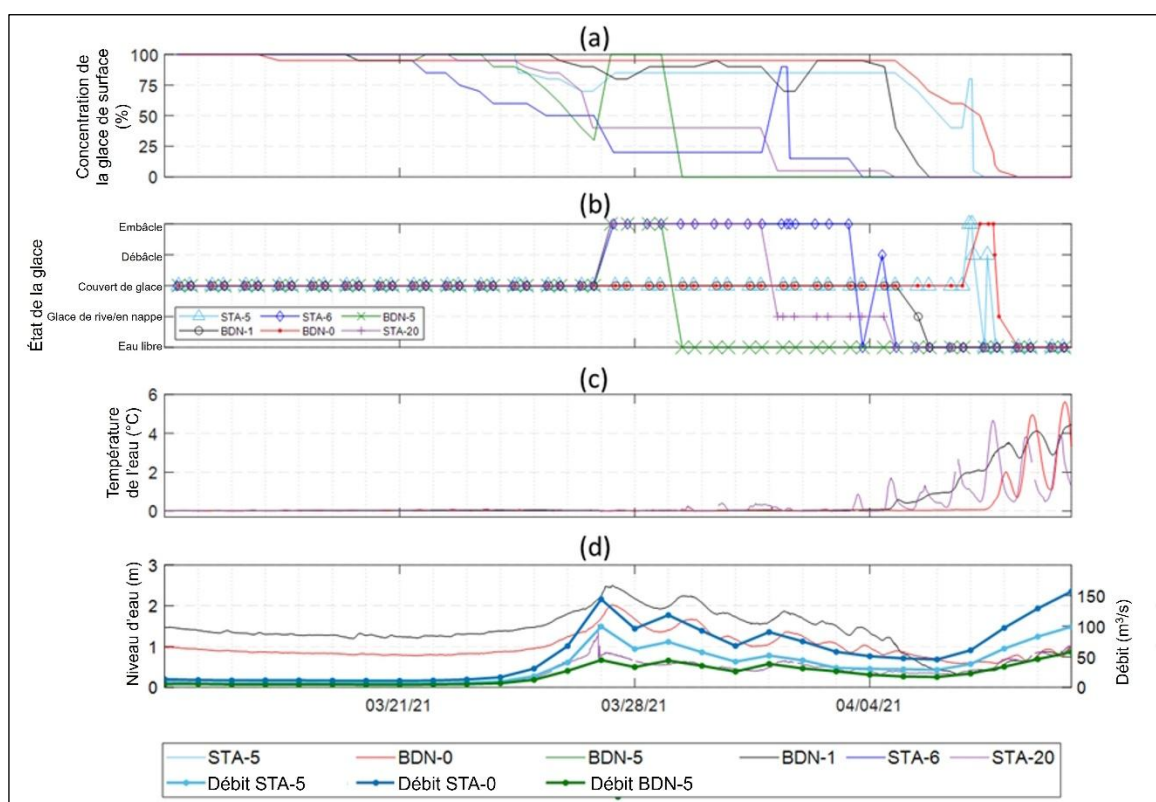
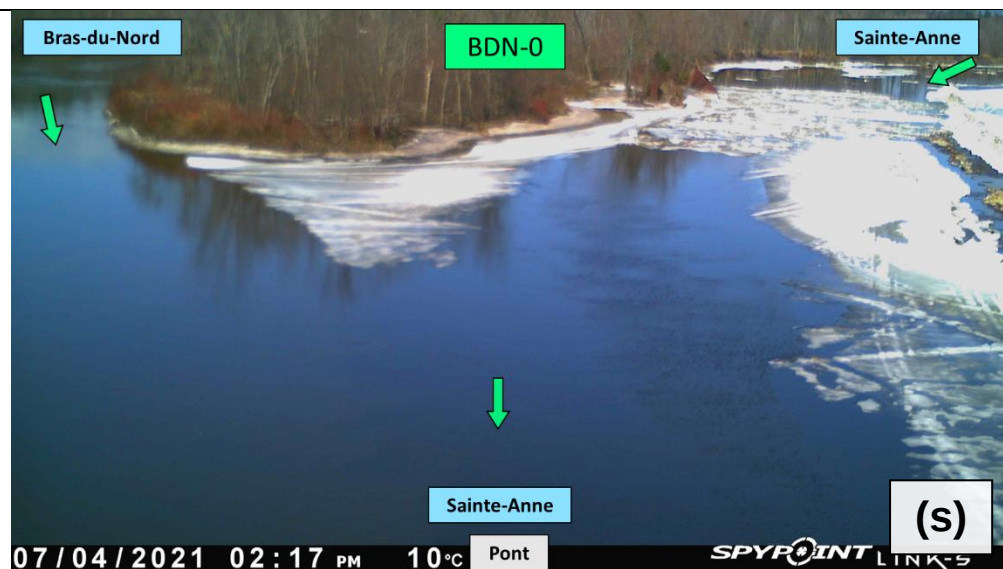


Figure 91. Données de caméras et stations hydrométriques pour la confluence BDN durant la débâcle 2021 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 132,1 m à BDN-0, 132,4 m à BDN-1 et 199,0 m à STA-20.

La débâcle dans le bassin versant de la STA a débuté en amont dans la rivière principale (STA-20 et STA-6) et dans le tributaire (BDN-5) à la fin du mois de mars 2021 (figure 91a). La perte du couvert a débuté en amont de l'estacade (STA-6) en date du 22 mars, puis s'est poursuivie en amont dans la STA (STA-20) et dans la BDN (BDN-5) à partir du 25 mars 2021. En raison d'une pluie de 36 mm le 26 mars 2021 (figure 62c), le 27 mars a marqué un maximum dans les débits enregistrés jusqu'à ce moment dans les deux rivières avec des valeurs de 45 m³/s dans la BDN (BDN-5) et 99 m³/s dans la STA en amont de la confluence (STA-5), engendrant le bris du couvert de glace à plusieurs endroits (figure 91b, d). Des embâcles ont alors été formés à trois sites. Sur le premier site l'embâcle s'est dissipé le 29 mars 2021 (BDN-5) à la suite d'une pluie de 40,2 mm, sur le deuxième site, l'embâcle a disparu le 1^{er} avril (STA-20) et sur le troisième site, l'embâcle s'est dégradé le 3 avril 2021 (STA-6) en raison d'un DJDC-5 supérieur à 90 °C.J depuis le 1^{er} avril 2021 (tableau 35d, 34e, 34f, 34g, 34h, 34i, 34j, 34k et figure 91b et figure 62b, 62c). Il est possible d'observer la formation de l'embâcle situé en rive droite à STA-20 dans l'augmentation rapide du niveau d'eau dans cette section le 27 mars 2021 et l'effet de sa disparition qui a permis à la température de l'eau de commencer sa montée quelques jours après, soit le 4 avril 2021 (figure 91c, 91d).

En raison des températures de l'air constamment supérieures à -5 °C et d'un DJDC-5 supérieur à 100 °C.J à partir du 4 avril 2021, le couvert de glace a poursuivi sa disparition en aval dans le tributaire (BDN-1), puis à la confluence (BDN-0) et en amont de celle-ci (STA-5) le 4 et le 5 avril 2021, respectivement (figure 62a, b et figure 91a). Lorsque le couvert de glace a fondu au site BDN-1, situé tout juste en aval du pont de la route 367, un morceau de celui-ci a subsisté dans la courbure à cette section et le site est devenu libre de glace le 5 avril 2021 (tableau 35l et figure 91a). Le niveau d'eau dans le tributaire a connu une diminution rapide à ce moment en raison de l'absence de friction associée à la glace et la température de l'eau a alors augmenté (figure 91c, d). Les dernières glaces ont quitté la STA en date du 7 avril 2021 après avoir formé des embâcles en amont de la confluence à STA-5 et à BDN-0 (figure 91b). Les morceaux du couvert de glace qui se sont accumulés en amont de la confluence (STA-5) ont été relâchés seulement quelques heures plus tard (tableau 35n, o). Près de la confluence (BDN-0), un embâcle s'est formé dans la rivière STA seulement, alors que la rivière BDN était libre de glace depuis deux jours. L'obstruction est restée en place durant la journée du 7 avril 2021 pour se déplacer vers l'aval à la fin de celle-ci, permettant ainsi à la température de l'eau d'augmenter dans cette section (tableau 35p, s et figure 91c). Le 7 avril 2021 a marqué le début de l'augmentation du débit dans les rivières STA (STA-5 et STA-0) et BDN (BDN-5), et ce, pour le reste de la saison (figure 91d).

En résumé, la débâcle a eu lieu de l'amont vers l'aval dans la STA comme dans la BDN et, par conséquent, plusieurs embâcles ont été formés dans les deux rivières. De plus, la rivière BDN s'est libérée de sa glace avant la STA et l'écoulement du tributaire dans la rivière principale a réduit l'espace disponible au passage des glaces de la STA à la confluence et en aval de celle-ci, ce qui a généré la création d'embâcles.

Débâcle 2022

Le tableau 36 présente les images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2022. Les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 92.

*Tableau 36. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2022 à la confluence BDN.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.*

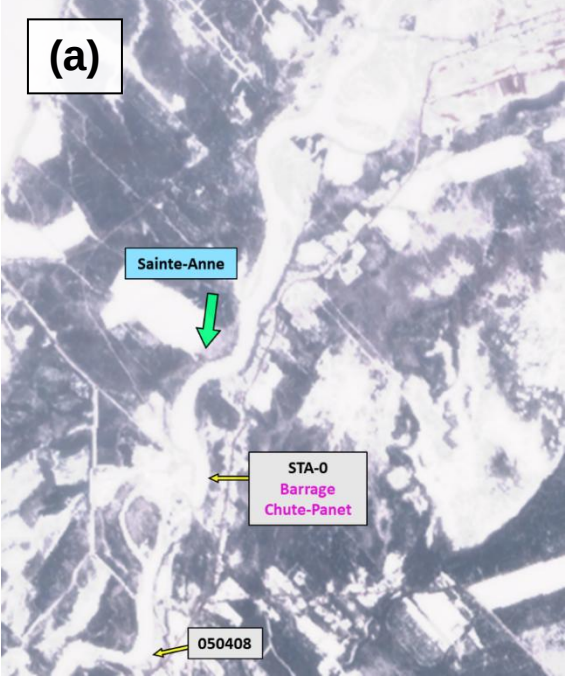
Description	Image
Image satellite prise le 23 mars 2022. Le couvert de glace dans la STA entre la station 050408 du MELCCFP et la confluence est intact.	(a)  The satellite image shows a river system with a confluence. A green arrow points from the label 'Sainte-Anne' towards the confluence. Another label 'STA-0 Barrage Chute-Panet' is located further downstream. A third label '050408' is located at the bottom of the image, with a yellow arrow pointing towards the confluence.

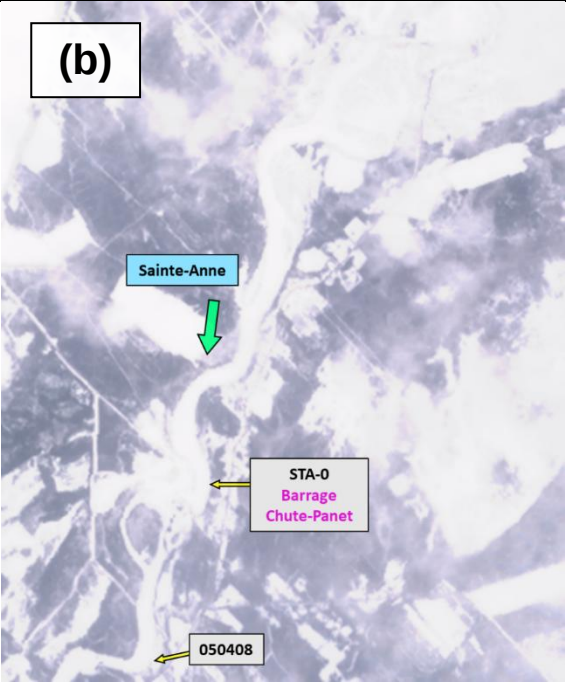
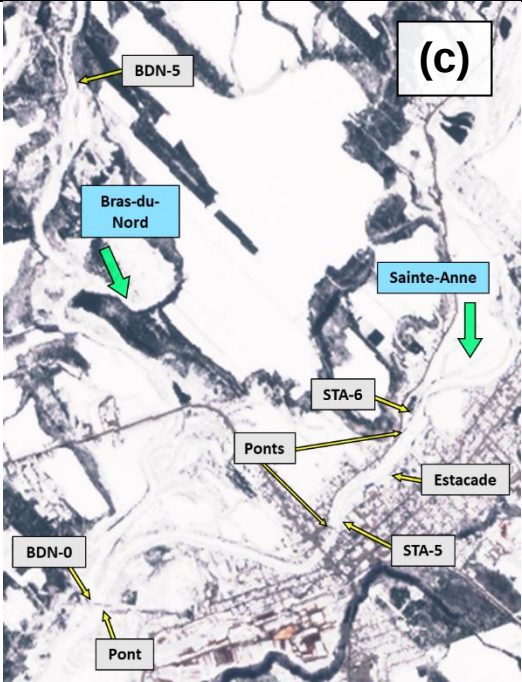
Image satellite prise le 28 mars 2022. Le couvert de glace dans la STA entre le BCP et la confluence est intact. Une ouverture longitudinale le long de la rive gauche de la STA entre le BCP et la station 050408 du MELCCFP a commencé à se former.	(b) 
Image satellite prise le 2 avril 2022. Le couvert de glace est majoritairement intact dans toutes les zones de la confluence BDN.	(c) 

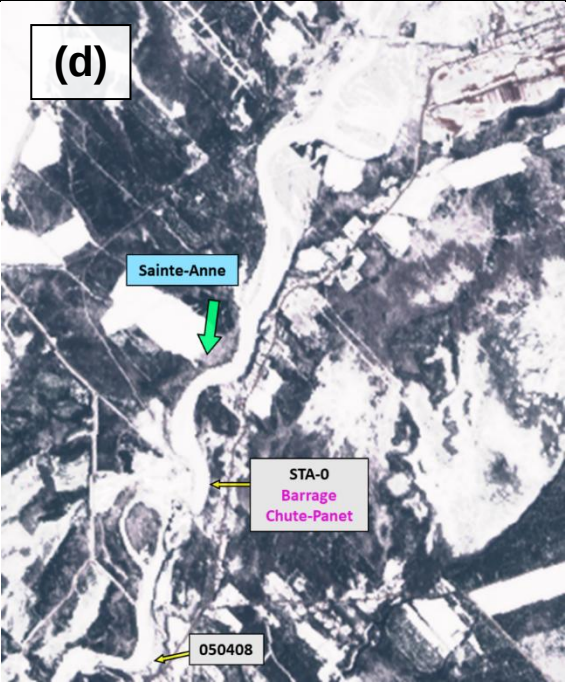
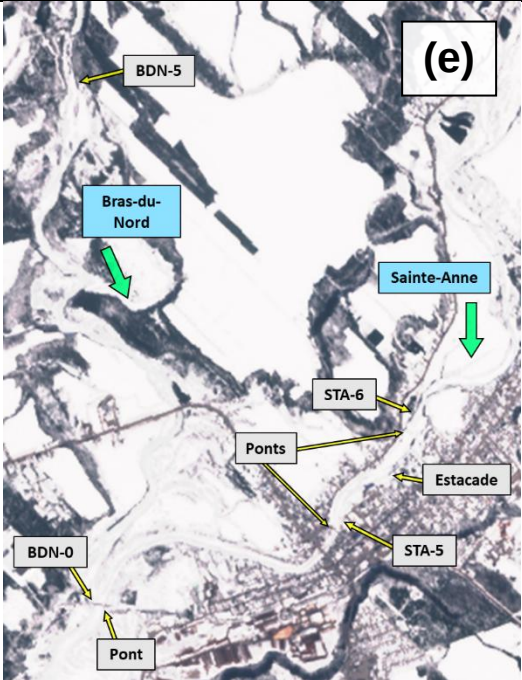
Image satellite prise le 2 avril 2022. Le couvert de glace dans la STA entre le BCP et la confluence est intact. L'ouverture longitudinale le long de la rive gauche de la STA entre le BCP et la station 050408 du MELCCFP s'est accentuée.	(d) 
Image satellite prise le 5 avril 2022. Le couvert de glace est majoritairement intact dans toutes les zones de la confluence BDN.	(e) 

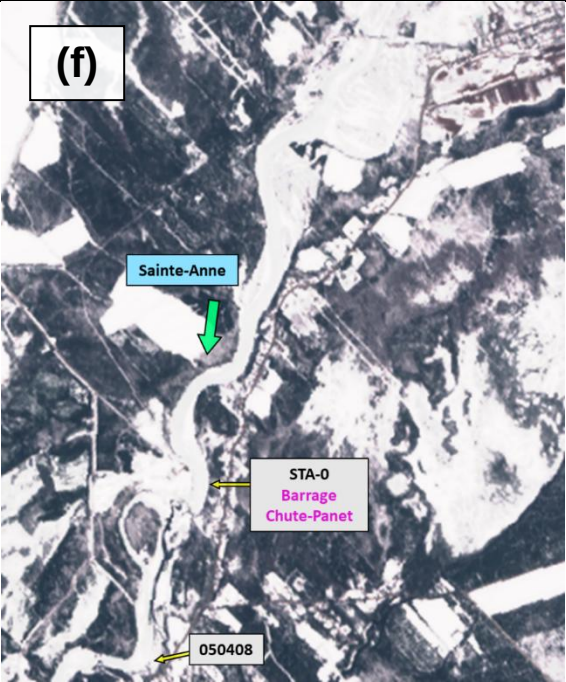
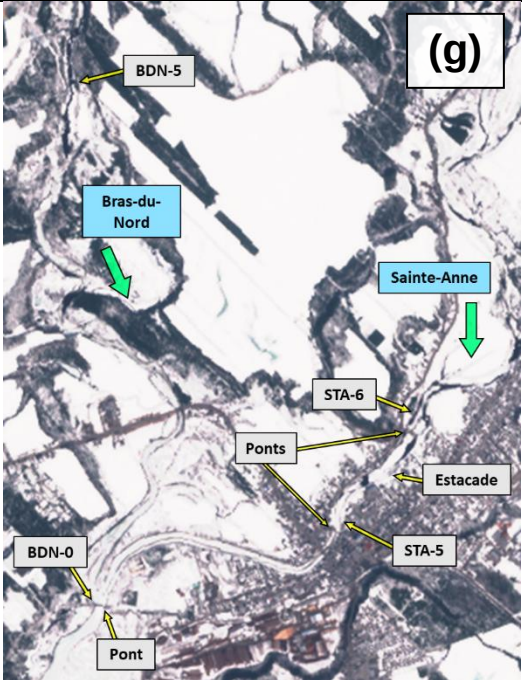
Image satellite prise le 5 avril 2022. Le couvert de glace dans la STA entre le BCP et la confluence est intact. La perte du couvert de glace sur la STA entre le BCP et la station 050408 du MELCCFP s'est accentuée.	(f) 
Image satellite prise le 12 avril 2022. Présence de trous dans le couvert de glace dans la STA en amont de la confluence à partir du km 5,2 et dans la BDN en amont du pont de la route 367 au km 1,5. L'ouverture au centre de la rivière STA faite par l'excavatrice spécialisée de la Ville de Saint-Raymond est bien visible entre la confluence et le km 5,5.	(g) 

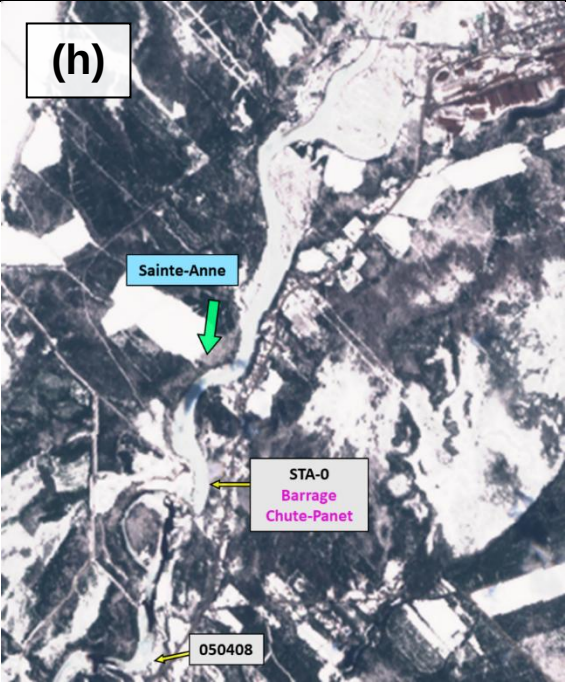
Image satellite prise le 12 avril 2022. Le couvert de glace dans la STA entre le BCP et la confluence est majoritairement intact. La perte du couvert de glace sur la STA entre le BCP et la station 050408 du MELCCFP s'est accentuée.	(h)  Sainte-Anne STA-0 Barrage Chute-Panet 050408
Image de caméra prise le 12 avril 2022 à 15h34. Apparition d'un petit embâcle dans la STA au km 6,2.	(i)  Sainte-Anne STA-6

Image de caméra prise
le 12 avril 2022 à
16h34.

Apparition d'un embâcle
dans la STA au km 6,2
sur la largeur entière de
la rivière pour une
longueur minimale de
200 m vers l'amont.



Image de caméra prise
le 13 avril 2022 à
14h04.

Déplacement vers l'aval
de l'embâcle formé au
km 6,2 de la rivière STA
le jour précédent.



Image de caméra prise le 14 avril 2022 à 12h07. Déplacement vers l'aval de l'embâcle formé au km 6,2 de la rivière STA le 12 avril.	 NetCam6C Thu Apr 14 12:07:05.056 2022 Exposure: 1/1200 (40) Frames: 4891 Sainte-Anne STA-6 (l)
Image satellite prise le 15 avril 2022. La rivière BDN est libre de glace, tout comme la STA à partir du km 6,2 vers l'amont. Des trous supplémentaires se forment dans le couvert de la STA qui subsiste.	 BDN-5 Bras-du-Nord Sainte-Anne STA-6 Ponts Estacade STA-5 BDN-0 Pont (m)

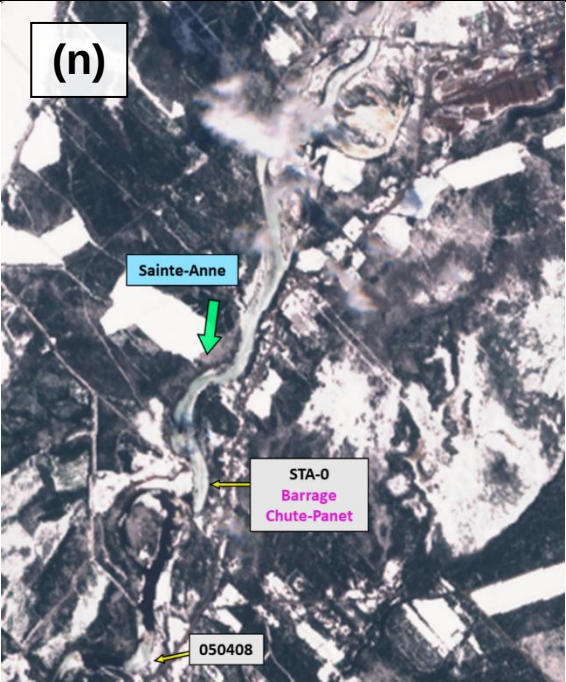
Image satellite prise le 15 avril 2022. Le couvert de glace en aval du BCP est disparu complètement. Il y a présence de trous dans le couvert de glace restant dans la STA entre le barrage et la confluence.	(n) 
Image de caméra prise le 15 avril 2022 à 10h. Un embâcle est apparu dans la STA à la confluence BDN et dans la partie aval du tributaire durant la nuit du 14 au 15 avril 2022. Cet embâcle est vu clairement pour la première fois sur cette image.	(o) 

Image de caméra prise le 15 avril 2022 à 11h06.

Dernière image capturée de l'embâcle formé le 12 avril 2022 au km 6,2 de la STA.



Image de caméra prise le 15 avril 2022 à 13h.

Déplacement de l'embâcle dans la STA à la confluence BDN et dans la partie aval du tributaire vers l'aval de la STA.

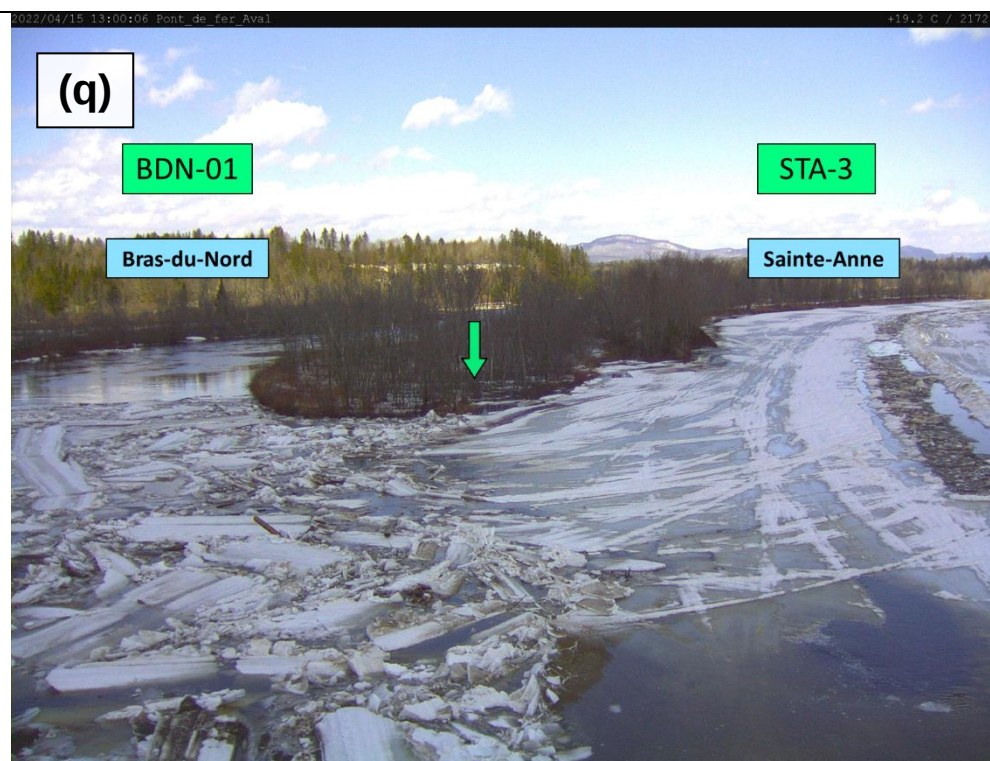


Image de caméra prise le 15 avril 2022 à 15h.

Dernière image de l'embâcle à la confluence BDN dans la STA couvrant la largeur entière de la rivière principale.

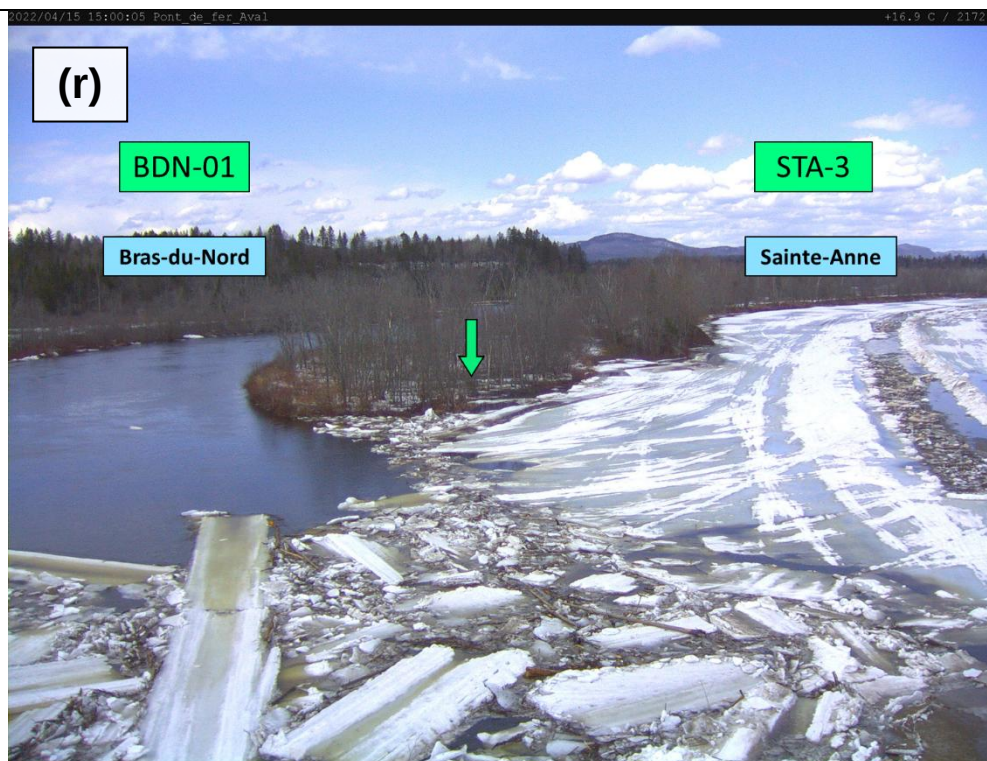


Image de caméra prise le 17 avril 2022 à 6h.

Trains de glace (côté droit) et accumulation de morceaux de glace (côté gauche) au niveau du BCP.

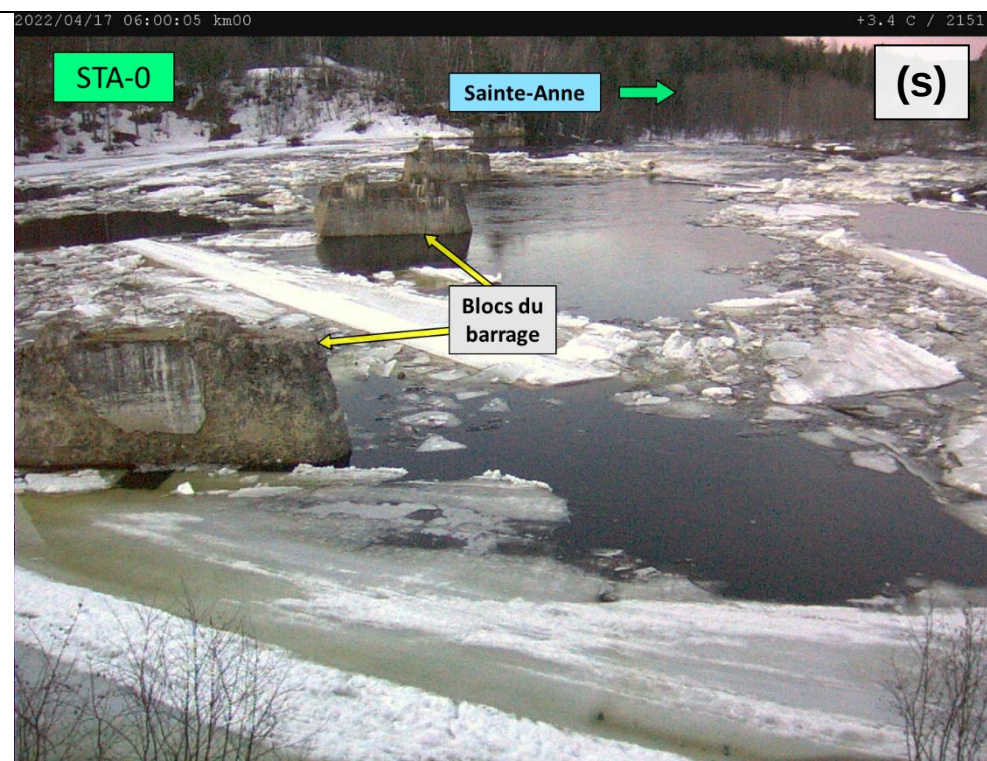


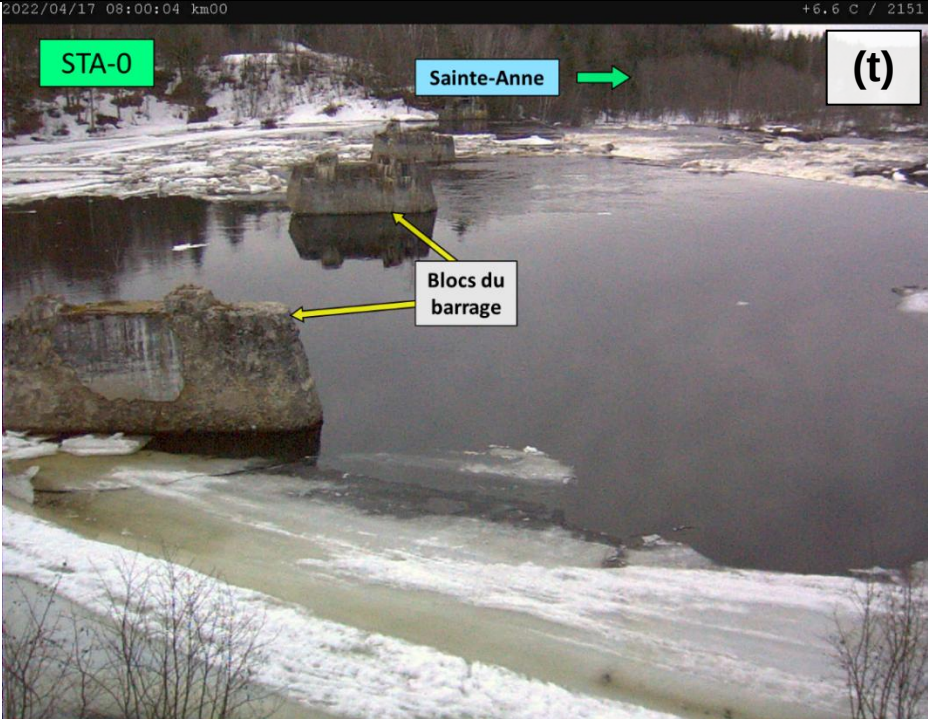
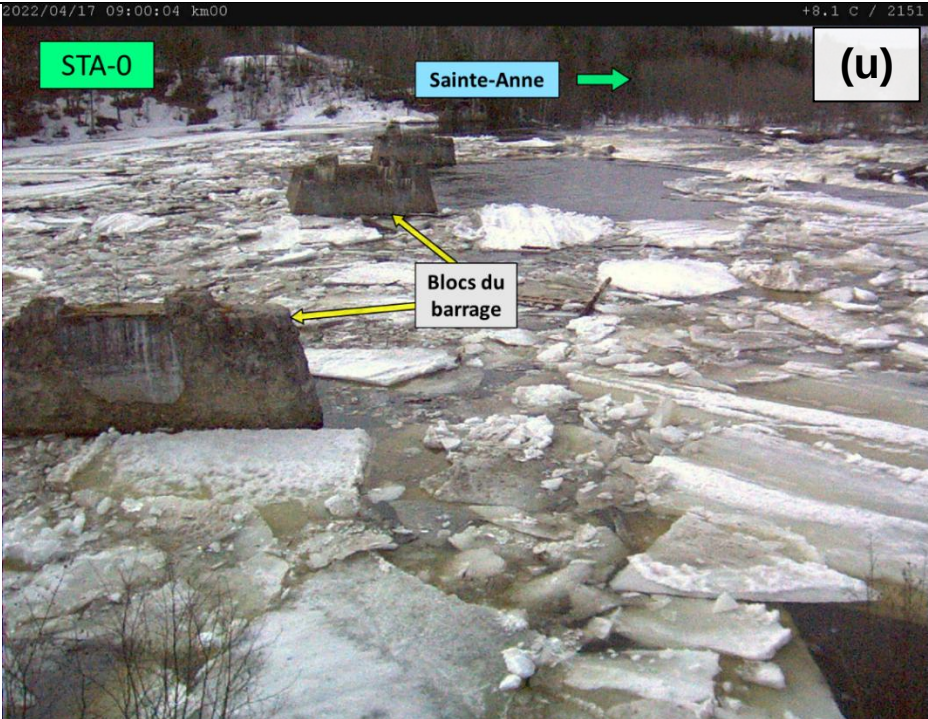
Image de caméra prise le 17 avril 2022 à 8h. Accumulation additionnelle de morceaux de glace en amont des blocs du BCP.	
Image de caméra prise le 17 avril 2022 à 9h. Apparition d'un embâcle au niveau du BCP.	

Image de caméra prise le 17 avril 2022 à 11h.

Dernière image de l'embâcle au niveau du BCP apparu deux heures plus tôt.

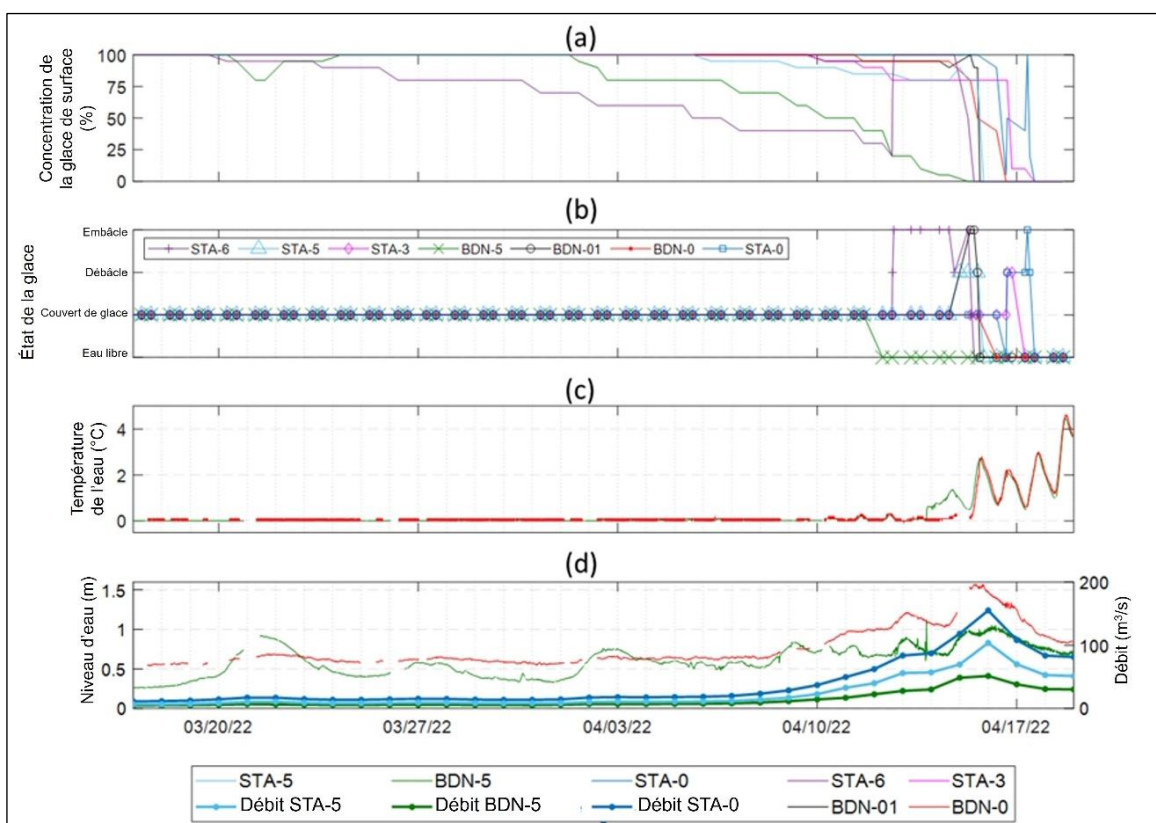
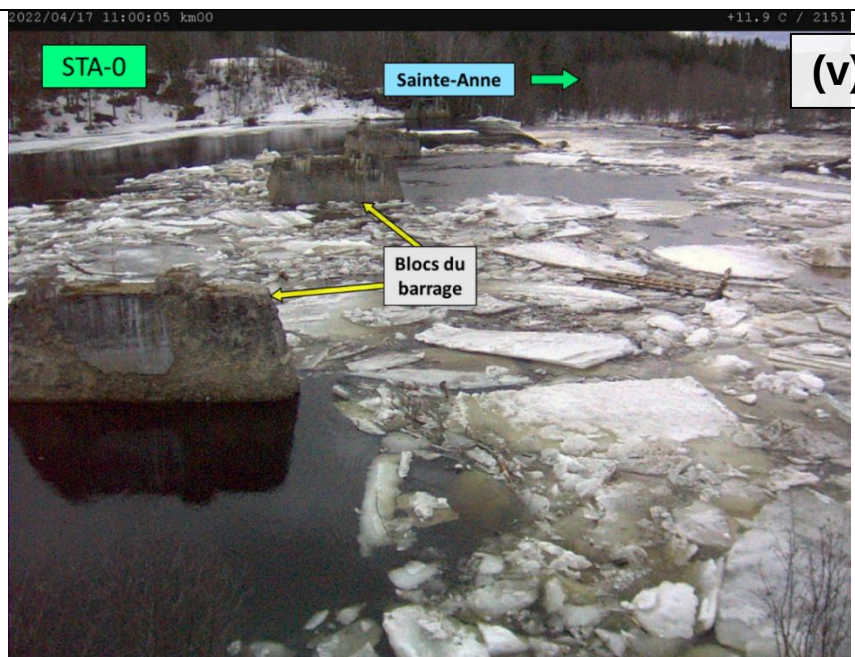


Figure 92. Données de caméras et stations la confluence BDN durant la débâcle 2022 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau et (d) niveau d'eau et débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 138,0 m à BDN-5 et 132,0 m à BDN-0.

À la confluence BDN, la débâcle 2022 a débuté de manière graduelle dans la rivière principale en amont de la confluence (STA-6) et en amont dans le tributaire (BDN-5). La glace a commencé à disparaître dans la STA (STA-6) le 24 mars 2022 à la suite d'une pluie de 11 mm, puis du site BDN-5 dans le tributaire le 2 avril 2022 (figure 92a et figure 63c). Ceci s'est terminé le 13 avril 2022 au site STA-6, puis un embâcle a été présent à cet endroit entre le 12 et le 15 avril 2022 (tableau 36i, j, k, l, p). Le 15 avril 2022 marque quant à lui la disparition complète du couvert de glace au site BDN-5, à la veille duquel la température de l'eau s'est mise à augmenter brusquement, tout comme le niveau d'eau qui a connu une variation brève, mais intense, à cet endroit (figure 92c, d). Cette dernière a été provoquée par la pluie d'une hauteur de 13,8 mm la journée précédente (figure 63). De plus, le débit dans le tributaire a connu une augmentation significative entre le 8 et le 15 avril 2022 passant de 9 à 49 m³/s, au même moment où 40 cm de neige au sol sont disparus (figure 92d et figure 63d).

La saison s'est terminée de manière abrupte comparativement à tous les autres sites étudiés. En effet, le couvert de glace a rapidement quitté l'aval du tributaire (BDN-01) ainsi que le reste des sites dans la STA (BDN-0, STA-5, STA-3 et STA-0) entre le 15 et le 17 avril 2022, alors que les débits dans la STA connaissaient leurs maximums avec des valeurs de 104 et 155 m³/s respectivement en amont de la confluence (STA-5) et au BCP (STA-0) le 16 avril 2022 (figure 92d). Une pluie totalisant 14,4 mm le 13 et le 14 avril 2022 ainsi qu'une diminution constante de la neige au sol depuis le début du mois ont pu être responsables de ce phénomène (figure 63c, d). La fonte a débuté dans la STA à la confluence (BDN-0) et à l'amont (STA-5) ainsi qu'à l'embouchure du tributaire (BDN-01) où le couvert a complètement disparu le 16 avril 2022 (figure 92a, b). Dès le début du retrait de la glace de la confluence (BDN-0), la température et le niveau d'eau se sont mis à augmenter, puis le niveau a diminué dès le couvert parti (figure 92a, c, d). Avant que la glace ne quitte le site BDN-01, un embâcle s'y est maintenu durant quelques heures le 15 avril 2022 (tableau 36o, q, r et figure 92b). La débâcle s'est conclue le 17 avril 2022 avec la perte du couvert de glace aux sites tout juste en amont de la confluence (STA-3) et en aval de celle-ci (STA-0) (figure 92a). La glace restante s'est accumulée en amont des blocs du BCP (STA-0) jusqu'au 17 avril 2022 et a fondu sur place (tableau 36s, t, u, v).

Pour conclure, la débâcle s'est entamée au site le plus en amont dans la rivière principale et dans le tributaire pour se terminer simultanément à tous les sites entre le 15 et le 17 avril 2022. La rivière BDN s'est libérée de sa glace une journée avant la STA et l'écoulement du tributaire a ainsi réduit l'espace disponible au passage des glaces de la STA à la confluence, ce qui a créé un embâcle juste en amont de la confluence dans la rivière principale.

Débâcle 2023

Le tableau 37 présente les images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023. Les données recueillies par les stations submersibles et les caméras sont illustrées à la figure 93.

Tableau 37. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2023 à la confluence BDN.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

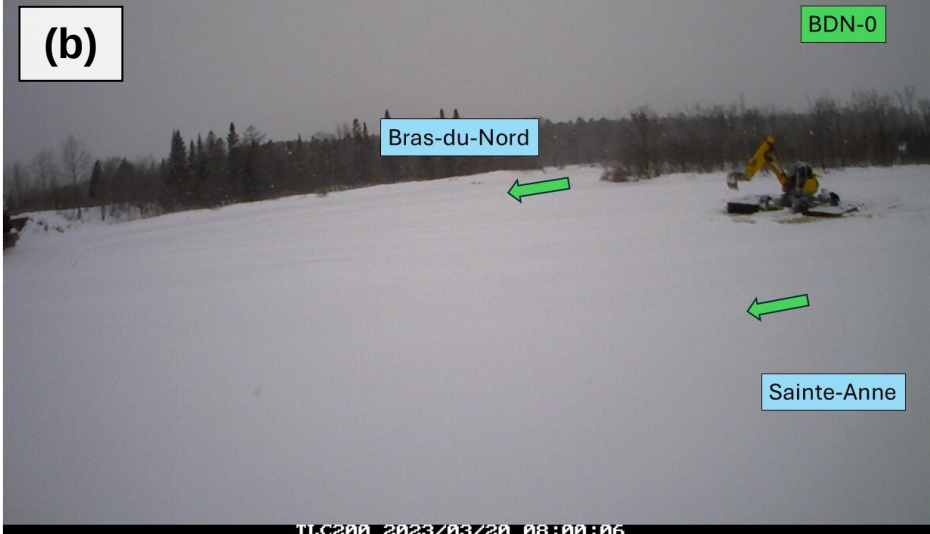
Description	Image
Image satellite prise le 11 mars 2023. Le couvert de glace est intact sur les rivières BDN et STA.	
Image caméra prise le 20 mars 2023 à 8h. Passage d'une excavatrice spécialisée pour créer une ouverture dans le couvert de glace en amont de la confluence sur la rivière STA, au site BDN-0.	

Image caméra prise le 22 mars 2023 à 8h. Passage d'une excavatrice spécialisée pour créer une ouverture dans le couvert de glace sur la rivière STA au site STA-4.	(c) 
Image satellite prise le 31 mars 2023. Le couvert de glace est toujours intact sur les rivières STA et BDN. Le chemin créé par l'excavatrice spécialisée est légèrement visible entre les stations BDN-0 et STA-4.	(d) 
Image caméra prise le 12 avril 2023 à 9h. Diminution progressive du couvert de glace qui débute le 12 avril au site STA-2, en aval de la confluence. Quelques jours, plus tard, à partir du 17 avril, la rivière STA est en eau libre sur ce site.	(e) 

Image satellite prise le 15 avril 2023.

Le couvert de glace est disparu sur la rivière BDN en amont de la confluence. Le couvert de glace est intact sur la rivière STA en amont et en aval de la confluence. Le passage de l'excavatrice spécialisée entre les sites BDN-0 et STA-4 est toujours visible.

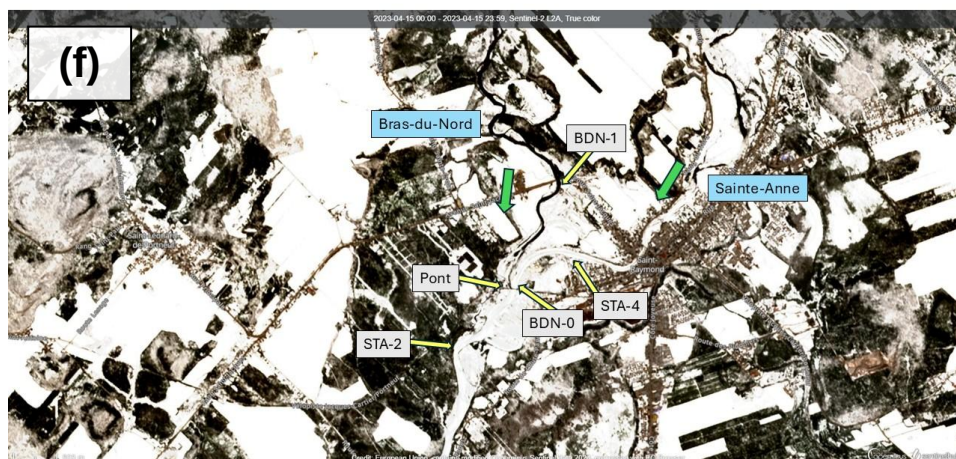


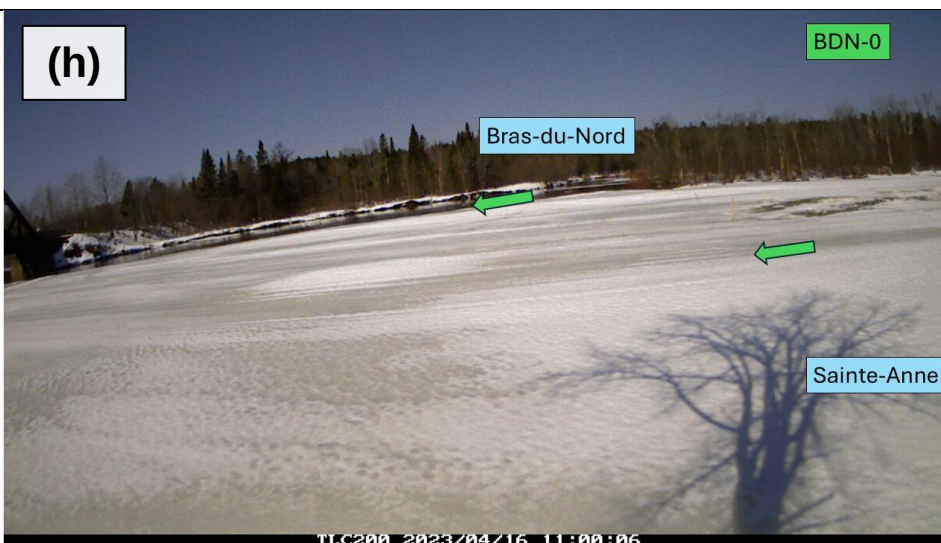
Image caméra prise le 15 avril 2023 à 8h.

Diminution progressive du couvert de glace au site BDN-1 jusqu'à laisser la rivière en eau libre le soir du 15 avril.



Image caméra prise le 16 avril 2023 à 11h.

La rivière STA, au site BDN-0, a un couvert de glace intact, avec le chemin de l'excavatrice spécialisée encore visible.



(i) Image caméra prise le 17 avril 2023 à 16h. Un embâcle de glace apparaît au site STA-4 alors que le couvert de glace commence à diminuer. Il reste en place quelques heures avant que la rivière ne soit en eau libre à partir de 19h.	
(j) Image caméra prise le 17 avril 2023 à 17h. Ouverture du couvert de glace sur la rivière STA au site BDN-0. Le lendemain, la rivière est en eau libre. La rivière BDN est déjà en eau libre depuis 2 jours.	

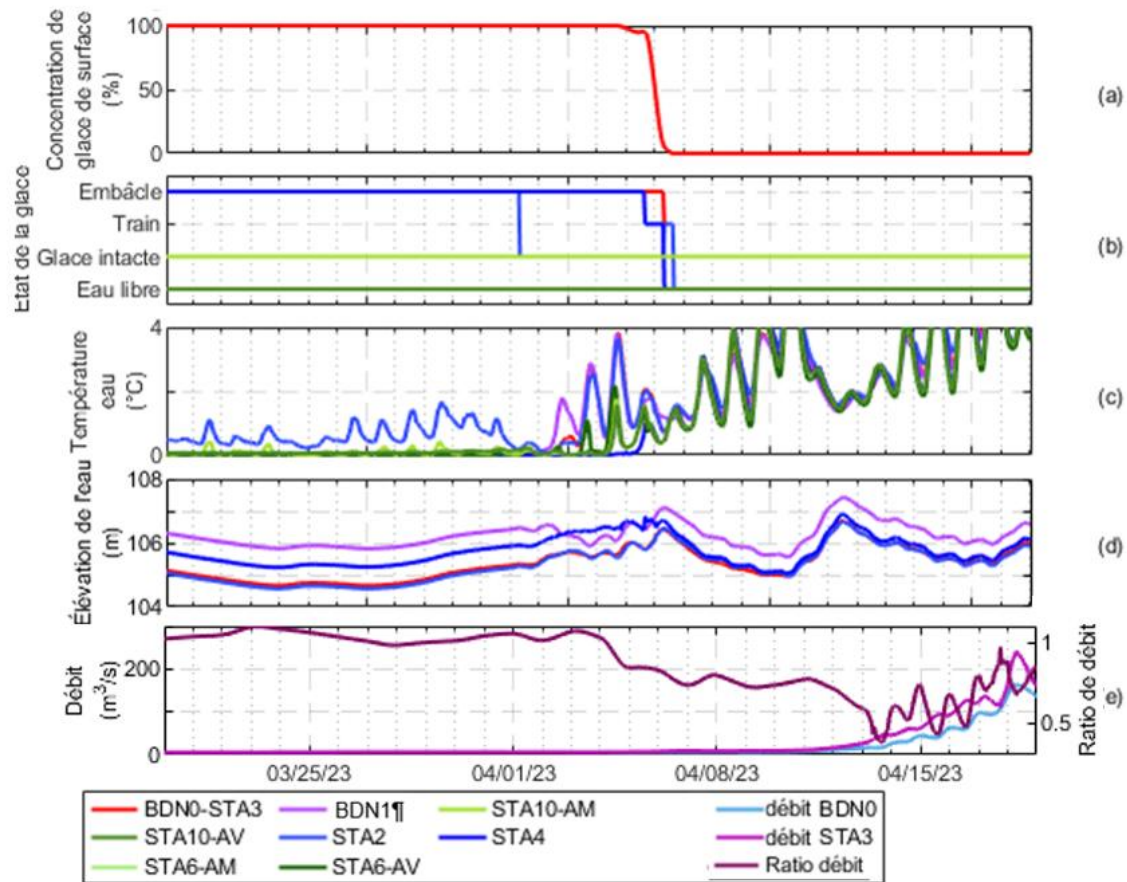


Figure 93. Données de caméras et stations à la confluence BDN durant la débâcle 2023 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau; (d) élévation de l'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 131,31 m à BDN-1, 132,63 m à BDN-0, 130,72 m à STA-2, 130,9 m à STA-4, 116,6 m à STA10-AM, 116,5 m à STA10-AV, 107,9 m à STA6-AM et 105,1 m à STA6-AV.

La débâcle 2023 s'est amorcée progressivement et simultanément en amont de la confluence dans la STA, et en amont de la BDN. La température de l'air est passée au-dessus de -5°C en moyenne de façon continue à partir du 4 mars et le DJDC-5 a ensuite entamé une montée régulière à partir de ce point pour terminer la saison à $399,5^{\circ}\text{C-jour}$ (figure 64a, b). La neige au sol a également commencé à fondre le 4 mars et a complètement disparu le 25 avril, représentant à une perte totale de 102 cm de neige au cours de cette période (figure 64d). La glace a commencé à fondre dans la rivière STA le 9 avril. La saison s'est ensuite terminée abruptement lorsque la couverture de glace a quitté la rivière BDN en aval et la rivière STA entre le 13 et le 17 avril. Un embâcle s'est formé à la confluence sur la rivière STA le 18 avril et a fondu le jour même, avec une baisse de la concentration de glace en surface (figure 93a, b). Cette débâcle a été accentuée par de fortes pluies de 12,6 mm et de 46,8 mm le 17 et le 23 avril respectivement (figure 64c).

Pour conclure, la débâcle a débuté au site le plus en amont dans la rivière principale et dans le tributaire pour se terminer simultanément à tous les sites entre le 13 et le 17 avril. La rivière BDN s'est libérée de sa glace une journée avant la STA. L'écoulement du tributaire a ainsi réduit l'espace disponible pour le passage des glaces de la STA à la confluence, provoquant un embâcle tout juste en amont de la confluence dans la rivière principale.

Débâcle 2024

Le tableau 37 présente les images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024. Les données recueillies par les stations submersibles ainsi que les caméras sont illustrées à la figure 94. Peu d'images de caméras ont pu être exploitées pour l'étude de la débâcle 2024. En effet, la caméra au site BDN-1 a été perdue alors que la caméra au site STA-2 a cessé de fonctionner au cours de l'hiver, ce qui a empêché l'enregistrement d'images de la débâcle 2024 sur ces sites.

Tableau 38. Images pertinentes pour l'analyse de la débâcle 2024 à la confluence BDN.
Les flèches vertes indiquent le sens de l'écoulement.

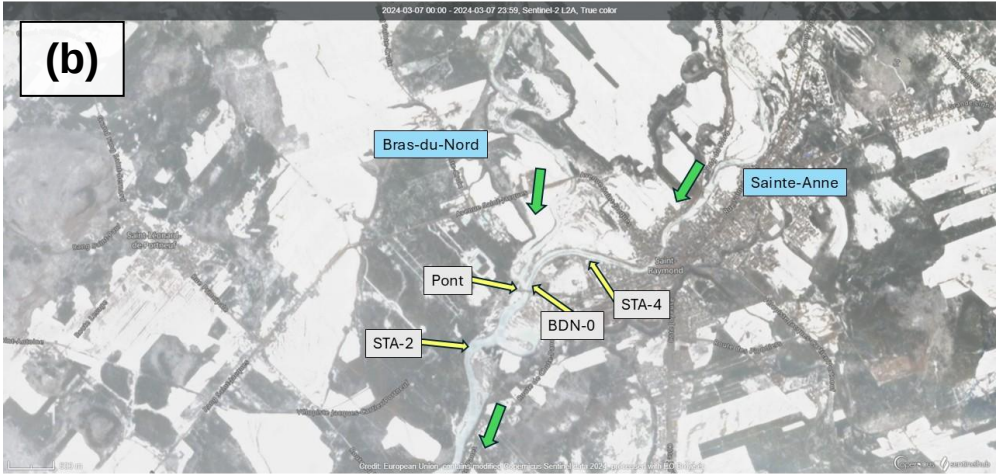
Description	Image
Image caméra prise le 4 mars 2024 à 9h30. Passage d'une excavatrice spécialisée dans la matinée afin d'ouvrir un couloir dans le couvert de glace sur la rivière STA au site BDN-0.	
Image satellite prise le 7 mars 2024. Le couvert de glace est intact sur la rivière BDN et sur la rivière STA en amont et en aval de la confluence. Toutefois, le passage de l'excavatrice spécialisée a laissé une ouverture dans le couvert de glace, visible entre les sites STA-2 et BDN-0.	

Image satellite prise le 22 mars 2024. Le couvert de glace est intact sur la rivière BDN et sur la rivière STA en amont et en aval de la confluence.	
Image caméra prise le 29 mars 2024 à 8h45. Ouverture dans le couvert de glace au site BDN-0, d'abord sur la rivière BDN, puis sur la rivière STA. Le chemin créé par le passage de l'excavatrice spécialisée du 4 mars est encore visible. Le couvert de glace diminue progressivement jusqu'à laisser la rivière en eau libre à partir du 5 avril.	
Image satellite prise le 30 mars 2024. Le couvert de glace est encore intact sur la rivière STA entre les sites STA-2 et BDN-0. Une ouverture dans le couvert de glace est visible en aval de la confluence. La rivière BDN est en eau libre.	

Image satellite prise le 9 avril 2024.

Le couvert de glace est entièrement fondu, les rivières BDN et STA sont en eau libre.

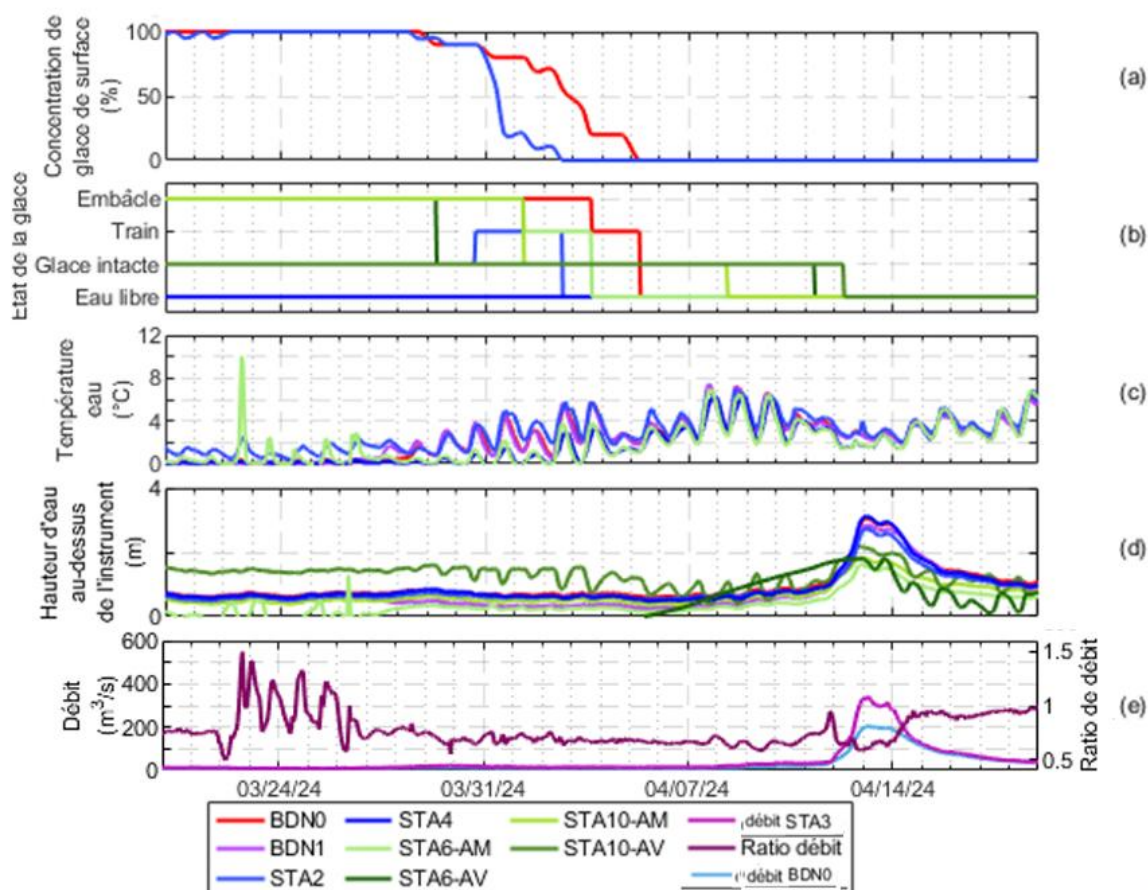


Figure 94. Données de caméras et stations la confluence BDN durant la débâcle 2024 : (a) concentration de la glace de surface; (b) état de la glace; (c) température de l'eau; (d) élévation de l'eau et (e) débit. L'élévation du sol sous la sonde de pression est de 132,9 m à BDN-1, 132,3 m à BDN-0, 132,3 m à STA-2, 132,4 m à STA-4, 145 m à STA10-AM, 144,8 m à STA10-AV, 136,7 m à STA6-AM et 133,5 m à STA6-AV.

La débâcle 2024 a débuté progressivement dans la rivière principale en amont de la confluence (STA6-AM) et dans le tributaire (BDN0). La concentration de glace de surface a commencé à diminuer dans STA6-AM dès le 24 mars 2024, tandis que la glace dans le tributaire BDN0 a persisté un peu plus longtemps avant de disparaître progressivement au début du mois d'avril (figure 94a). Un embâcle a été observé au site STA6-AM jusqu'au 1^{er} avril 2024, avant de se transformer en train de glace puis en eau libre le 3 avril (figure 94b).

La température de l'eau a suivi une tendance à la hausse, avec plusieurs variations brusques, notamment autour du 13 avril 2024, juste avant une augmentation importante du niveau d'eau (figure 94c, d). Cette élévation du niveau d'eau coïncide avec une montée du débit, particulièrement entre le 8 et le 14 avril 2024, période durant laquelle les débits dans STA3 et BDN0 ont augmenté de façon marquée (figure 94e). Cette hausse concorde avec une des précipitations importantes survenues pendant la débâcle, soit celle du 11 et du 12 avril, totalisant 30,2 mm.

La débâcle s'est déroulée de l'amont vers l'aval dans la BDN et la STA, à l'exception des sites STA10-AM et STA10-AV, qui correspondent respectivement aux sites amont et aval de l'estacade. De plus, la BDN a perdu sa glace avant la STA, ce qui a bloqué les glaces de cette dernière et a conduit à la formation d'embâcles aux sites aval de la STA.

En résumé, la débâcle a débuté en amont du tributaire et de la rivière principale pour se conclure simultanément le 12 avril 2024. L'augmentation du débit en amont de la confluence a réduit l'espace disponible pour l'évacuation des glaces de la rivière principale, entraînant la formation d'un embâcle temporaire à cet endroit avant la libération complète du couvert de glace.

Résumé

La figure 95 présente les sites à la confluence BDN où des embâcles printaniers ont été observés durant toutes les saisons étudiées et le tableau 39 précise les dates auxquelles chaque embâcle a été aperçu ainsi que l'instrument utilisé. Il est à noter que ces résultats reflètent uniquement l'information analysée et ne prétendent pas être exhaustifs. Certains embâcles présentés dans le tableau n'apparaissent pas sur la figure, car ils étaient situés beaucoup plus en amont de la confluence.

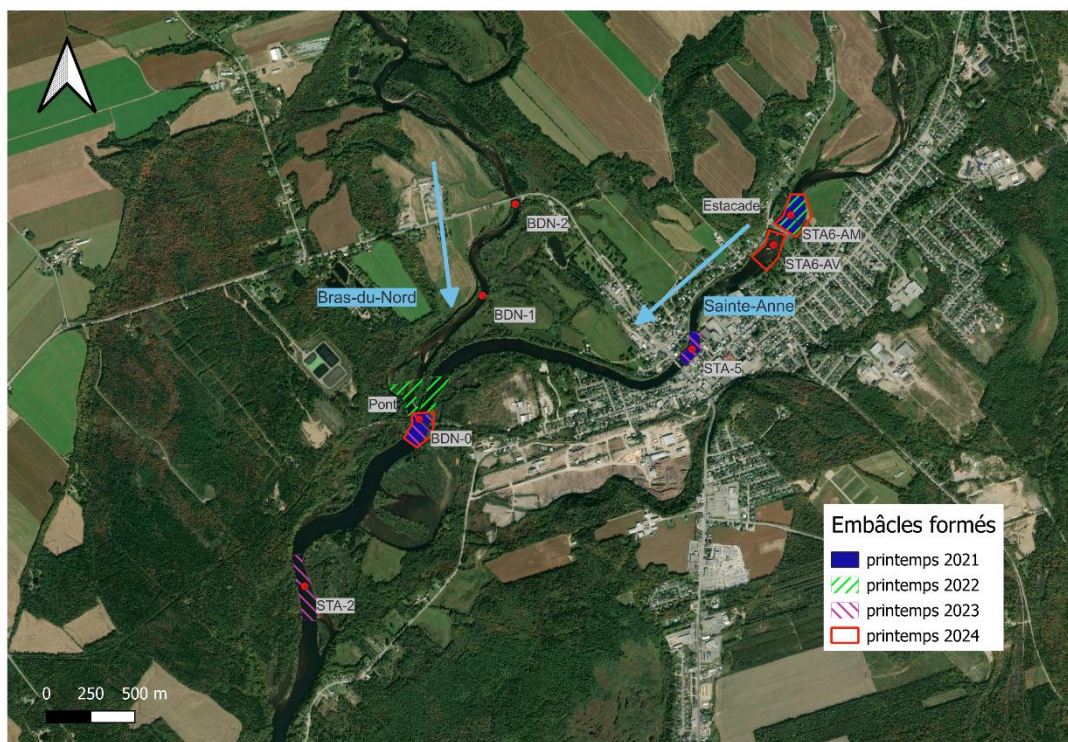


Figure 95. Embâcles printaniers observés directement à la confluence BDN pour toutes les saisons étudiées. Les flèches bleues indiquent le sens de l'écoulement.

Tableau 39. Instrument de capture, emplacement et dates des embâcles printaniers observés à la confluence BDN pour toutes les saisons étudiées.

Année	Instrument de capture	Rivière	Station	Date
2021	Caméra BDN-5	BDN	km 5,2	27 mars au 30 mars 2021
	Caméra STA-6	STA	km 6,2	27 mars au 3 avril 2021
	Caméra STA-5	STA	km 5,2	6 avril au 7 avril 2021
	Caméra BDN-0	STA	km 3,3	7 avril 2021
2022	Caméra STA-6	STA	km 6,2	12 avril au 15 avril 2022
	Caméra BDN-01/STA-3	BDN et STA	km 0,1 BDN et km 3,6 STA	15 avril 2022
	Caméra STA-0	STA	km 0,0	17 avril 2022
2023	Caméra BDN-0	BDN	km 0,0	10 déc. au 18 avril 2023
	Caméra STA-2	STA	km 2	1er janv. au 12 avril 2023
	Caméra STA-5	STA	km 4,8	10 déc. au 17 avril 2023
2024	Caméra BDN-0	BDN	km 0,0	31 déc. au 3 avril 2024
	Caméra STA6-AM	STA	km 6,2	5 janv. au 31 mars 2024
	Caméra STA6-AV	STA	km 5,8	2 janv. au 28 mars 2024
	Caméra STA10-AM	STA	km 10	5 janv. au 31 mars 2024

Pendant toutes les saisons étudiées, la débâcle s'est déroulée de l'amont vers l'aval pour la rivière principale comme pour le tributaire et c'est ce dernier qui s'est complètement débarrassé de sa glace en premier. Les débâcles ont connu des embâcles dans la rivière principale à l'amont et à la confluence ainsi que dans le tributaire (figure 95 et tableau 39). Un embâcle a été observé au km 2 de la rivière STA en 2022 seulement (figure 95 et tableau 39). Les images prises au BCP en 2022 montrent que la glace s'accumule en amont de la structure à la fin de la saison avant de fondre sur place (tableau 39).

La formation d'embâcles près de la confluence BDN est en partie due à l'importance de la surface drainée par le tributaire qui constitue 50 % de la surface du bassin versant de la STA en amont du BPC (tableau 3). En effet, la rivière BDN a perdu son couvert avant la STA et son écoulement à la confluence a donc restreint la section de la STA disponible pour le passage des glaces, ce qui a contribué à des accumulations à la confluence et en amont de la rivière principale durant les deux années. De plus, il est possible d'observer que l'estacade située au km 6,2 de la rivière STA remplit bien ses fonctions et a donc retenu la glace au site STA-6 situé tout juste en amont de celui-ci (figure 95).

6 Conclusions

En se basant sur les résultats obtenus pour les saisons étudiées, il est possible de tirer plusieurs conclusions générales sur la dynamique de la débâcle dans les bassins versants des rivières CH et STA.

Dans le cas de la rivière CH, les observations menées sur trois confluences illustrent la diversité des mécanismes de formation d'embâcles et la forte influence du contexte local. À la confluence DL, la présence du barrage Sartigan joue un rôle déterminant dans le contrôle du couvert de glace. En retenant les morceaux de glace provenant à la fois de la CH et du tributaire, le barrage favorise la formation d'un couvert stationnaire stable qui s'étend jusque dans la DL. Cette rétention assure une gestion efficace des glaces et réduit considérablement les risques d'inondation en aval, démontrant la pertinence du rôle de cet ouvrage de régulation dans la mitigation des embâcles.

À la confluence de la rivière FA, la dynamique est dominée par le contrôle morphologique exercé par les bancs d'accumulation et le pont de la route 173 situés à proximité de l'embouchure. Ces structures et dépôts imposent une contrainte hydraulique qui nécessite l'atteinte d'un débit minimal avant que la glace puisse s'évacuer efficacement. En deçà de ce seuil, la glace tend à s'accumuler, ce qui explique la récurrence d'embâcles observés au cours des saisons étudiées. La morphologie locale de la confluence s'avère donc un facteur limitant majeur pour la dissipation des glaces dans ce secteur.

La confluence BSV se distingue par une dynamique où la débâcle s'amorce d'abord dans le tributaire. La glace provenant du BSV atteint la rivière CH avant la rupture complète du couvert de glace de cette dernière, ce qui entraîne la formation d'embâcles à la jonction des deux cours d'eau. Ces embâcles se propagent ensuite à la fois dans le tributaire et en amont dans la CH, en particulier lors des débâcles dynamiques. Ce comportement souligne l'importance de prise en compte du synchronisme entre la fonte des glaces dans les différents sous-bassins et la propagation des crues.

Pour le bassin versant de la rivière STA, les observations à la confluence BDN révèlent un scénario similaire de désynchronisation, mais avec des conséquences inverses. Le tributaire, plus pentu et de plus petite superficie, se libère généralement de sa glace avant la rivière principale. Les glaces ainsi transportées vers la STA s'accumulent contre un couvert de glace encore stable, provoquant la formation d'embâcles en amont de la confluence, notamment dans le secteur de Saint-Raymond. Ce processus d'impact de courant correspond à l'un des mécanismes théoriques identifiés en laboratoire par Ettema et Muste (2001) et validés ici dans des conditions naturelles. Plus de détails sur la comparaison entre ce mécanisme développé en laboratoire et les conditions réelles de cette confluence ont été détaillés par Charbonneau et al. (2024) ainsi que Charbonneau et al. (2025).

Dans l'ensemble, ces résultats démontrent que la formation d'embâcles aux confluences résulte de l'interaction complexe entre la morphologie locale, les conditions hydrologiques et la chronologie relative des débâcles dans les cours d'eau d'une confluence (tributaire et rivière principale). Les différences de pente, de surface de drainage et de synchronisme des ruptures de couvert de glace expliquent la variabilité des comportements observés d'une confluence à l'autre. Ces conclusions soulignent également la nécessité de considérer la confluence comme un système intégré où les dynamiques du tributaire et de la rivière principale ne peuvent être dissociées.

Les observations menées dans le cadre du projet FLUTEIS permettent ainsi de documenter la diversité des processus en jeu dans les confluences du Québec méridional. Elles constituent une base solide pour la compréhension et la modélisation des embâcles printaniers, tout en renforçant les capacités d'analyse et de gestion du risque d'inondation liés aux glaces.

7 Perspectives futures et recommandations

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet offre une occasion unique de dresser un portrait d'ensemble de la dynamique des débâcles dans les zones de confluence et d'en dégager des enseignements utiles pour la recherche et la gestion des risques d'embâcles au Québec.

L'analyse croisée des quatre confluences étudiées permet d'abord de constater que la morphologie locale des confluences constitue un facteur de contrôle majeur dans la formation et la persistance des embâcles. Les caractéristiques telles que la largeur relative des lits, la présence de barres ou d'îles, l'angle de jonction et la présence d'ouvrages de franchissement modifient localement les conditions d'écoulement, créant des zones propices à l'accumulation de glace. Ces influences morphologiques se manifestent différemment selon les sites étudiés. À la rivière FA, par exemple, le pont route 173 et les bancs d'accumulation jouent un rôle déterminant en contrôlant la libération de la glace tandis qu'à la rivière BDN, c'est le contraste de pente et de débit entre les deux cours d'eau qui crée un impact de courant favorisant la formation d'embâcles. À la rivière BSV, c'est plutôt la configuration en cascade et la forte connectivité hydraulique entre les tronçons qui expliquent la propagation des embâcles à la fois dans le tributaire et dans la rivière principale.

Cette diversité de comportements met en évidence que la formation d'un embâcle en confluence n'est jamais le fruit d'un seul facteur isolé, mais résulte d'un ensemble d'interactions entre la morphologie, l'hydrologie et la thermodynamique des glaces. Le projet a montré que la géométrie des confluences et les conditions de pente influencent non seulement la localisation des accumulations, mais aussi la dynamique de rupture et la vitesse de propagation de la débâcle. Ces observations appuient les travaux de Ettema et Muste (2001), qui avaient identifié en laboratoire différents types de confluences susceptibles de générer des embâcles selon leur configuration. Les résultats de ce projet

permettent de valider sur le terrain plusieurs de ces mécanismes, tout en illustrant les ajustements requis pour les transposer à des environnements naturels complexes.

L'un des constats majeurs du projet concerne le rôle du désynchronisme des débâcles entre les tributaires et la rivière principale. Les observations répétées d'un tributaire se libérant plus tôt ou plus tard que la rivière principale montrent à quel point ce décalage temporel peut déclencher ou, au contraire, prévenir la formation d'embâcles. Lorsque le tributaire se dégage plus rapidement, les glaces en mouvement viennent heurter un couvert de glace encore intact à la confluence, provoquant un blocage et parfois une remontée d'embâcle jusque dans la rivière principale. À l'inverse, lorsque le tributaire demeure gelé après le début de la débâcle de la rivière principale, il agit comme un obstacle fixe qui retarde l'évacuation des glaces. Ces phénomènes démontrent que la compréhension du calendrier relatif des débâcles est tout aussi cruciale que l'analyse des débits ou des pentes pour anticiper les zones à risque d'embâcle.

Les conditions climatiques des hivers étudiés ont également exercé une influence notable sur les mécanismes observés. Les épisodes de redoux rapides et les pluies printanières ont souvent accéléré la fonte du couvert de glace, provoquant des ruptures quasi simultanées dans plusieurs sections du bassin et favorisant le transport massif de glaces vers les confluences. À l'opposé, les saisons marquées par un réchauffement plus graduel et des apports hydriques modérés ont conduit à des débâcles plus progressives, laissant le temps aux glaces de se détériorer et ainsi de s'évacuer sans créer d'accumulation importante. Ce lien direct entre les conditions thermiques, hydrologiques et la réponse dynamique des confluences illustre la sensibilité des embâcles aux variations climatiques interannuelles. Dans le contexte actuel de changements climatiques, où la fréquence et l'intensité des redoux hivernaux tendent à augmenter, cette sensibilité revêt une importance particulière pour la prévision des embâcles futurs.

En comparant les quatre sites, il est possible de reconnaître plusieurs types de comportements de confluences. Les confluences soumises à un contrôle artificiel, comme celle de la rivière DL, présentent des dynamiques plus stables et prévisibles étant donné que la gestion des niveaux d'eau limite la formation d'embâcles étendus. Les confluences à géométrie naturelle mais resserrée, telles que celles des rivières FA et BSV, montrent une forte variabilité interannuelle, avec des embâcles souvent récurrents mais d'ampleur variable selon la séquence de la débâcle. Enfin, la confluence sur la rivière STA illustre un cas où la dynamique du tributaire domine temporairement celle de la rivière principale, soulignant l'importance de la direction et de la force de l'écoulement entrant dans le contrôle des processus de formation d'embâcles.

Ce projet se distingue comme l'un des rares programmes de suivi de terrain à long terme consacré spécifiquement à la dynamique des glaces en confluence. Les données recueillies représentent une contribution importante à la littérature sur les embâcles, qui reste encore dominée par des études expérimentales ou des analyses de cas isolés. En validant plusieurs mécanismes théoriques à partir de données de terrain, le projet vient

combler une lacune significative dans la compréhension de ces processus en conditions naturelles. Les résultats pourraient notamment servir à la calibration de modèles hydrauliques ou numériques, à l'amélioration des critères de détection de zones à risque et à l'intégration de nouvelles variables de contrôle (telles que le ratio de pente et le rapport de débits) dans les outils de prévision opérationnels.

Ces connaissances ouvrent la voie à plusieurs perspectives de recherche et d'application. Il serait pertinent de poursuivre la comparaison entre les observations de terrain et les modèles empiriques développés en laboratoire afin de mieux définir les conditions limites d'application de ces équations. Une analyse plus quantitative des relations entre les variables de contrôle identifiées et la fréquence des embâcles permettrait de consolider la compréhension des mécanismes physiques en jeu. Sur le plan opérationnel, les résultats du projet pourraient être intégrés aux outils de gestion utilisés par le ministère de la Sécurité publique, notamment pour bonifier le recensement des zones connues pour des problématiques d'embâcle. De plus, ces connaissances pourront alimenter un effort de cartographie du risque par les autorités compétentes et les efforts de développement d'outils prévisionnels.

Enfin, le projet FLUTEIS a permis de développer une expertise et une base de données unique sur les embâcles de confluence au Québec. Ces travaux s'inscrivent dans un effort plus large visant à comprendre la dynamique des glaces dans un contexte de variabilité climatique et à adapter les stratégies de gestion du risque d'inondation. En ce sens, le projet laisse un héritage scientifique et opérationnel durable, qui continuera d'enrichir la connaissance et la gestion des embâcles dans les rivières québécoises.

Références

- Belore, H. S., Burrell, B. C., & Beltaos, S. (1990). Ice jam mitigation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(5), 675-685.
- Beltaos, S. (2008). River ice breakup. (LLC, Éd.) Water Resources Publications.
- Blackburn, J., She, Y., Hicks, F., & Nafziger, J. (2015). Ice effects on flow distributions in the Mackenzie dELTA. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment 18th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Québec City, Canada. August 18-20.
- Brayall, M., & Hicks, F. E. (2012). Applicability of 2-D modeling for forecasting ice jam flood levels in the Hay River Delta, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineers*, 39(6), 701-712.
- Charbonneau, L; Blouin, C & Ghobrial, T. (2024). Field study of breakup dynamics at a river confluence: A case study on the Sainte-Anne River, Québec. Proceedings of the 27th IAHR International Symposium on Ice, Gdansk (Pologne). Article revu par un comité de lecture et présenté lors de la conférence (Gdansk, 9-13 juin 2024).
- Charbonneau, L., Ghobrial, T. & Nafziger, J. (2025). Predicting ice jam formation at a confluence using hydraulic modelling and empirical relations: A case study on the Sainte-Anne River, Québec. Proceedings of the 23rd CGU HS CRIPE Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, St. John's, Newfoundland and Labrador (Canada). Article revu par un comité de lecture et présenté lors de la conférence (St. John's, 9-12 juin 2025).
- Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC). (2013). Sous-bassins versants de la rivière Chaudière [document cartographique]. Comité de bassin de la rivière Chaudière, Sainte-Marie.
- Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC). (2014). Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Chaudière : Mise à jour 2014 - Portrait. Comité de bassin de la rivière Chaudière, 2014, 256 p.
- Corporation d'aménagement et de protection de la Sainte-Anne (CAPSA). (2014) Bassin versant de la rivière Sainte-Anne – Localisation et hydrographie [document cartographique]. Corporation d'aménagement et de protection de la Sainte-Anne, Saint-Raymond.
- Corporation d'aménagement et de protection de la Sainte-Anne (CAPSA). (2014). Portrait, diagnostic et plan d'action des bassins versants de la rivière Sainte-Anne, Grimard et Lacoursière (mise à jour du portrait de la rivière Sainte-Anne). 258 p.
- Ettema, R., & Muste, M. (2001). Laboratory observations of ice jams in channel confluences. *J. Cold Reg. Eng.*, 15(1), 34-58.
- Ettema, R., Muste, M., Kruger, A., & Zufelt, J. (1997). Factors influencing ice conveyance at river confluences. Special Report.

- Rokaya, P., Budhathoki, S., & Lindenschmidt, K. E. (2018). Trends in the timing and magnitude of ice-jam floods in Canada. *Scientific Reports*, 8(1), 1-9.
- Simard-Robitaille, T. (2021). Mesures d'affaiblissement préventif du couvert de glace [mémoire de maîtrise, Université Laval].
- Turcotte, B., & Morse, B. (2017). The winter environmental continuum of two watersheds. *Water*, 9(5), 337.

Évaluer l'efficacité et l'applicabilité des structures de retenue des glaces pour la gestion des inondations - GQ524633 / Comportement des rivières en hiver et mesures de gestion des risques reliés aux inondations - FLUTEIS - GQ183121

Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2025
Contrat CPS 18-19-26

Rapport final

1^{er} mars 2025

Travail réalisé pour :

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

Travail réalisé par :

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

Ce projet a reçu une contribution financière de 2 450 000 \$ provenant du Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2025 du gouvernement du Québec [CPS 18-19-26].

Réalisation des travaux

Tadros Ghobrial – Professeur et responsable du projet FLUTEIS, Université Laval;

Brian Morse – Professeur, Université Laval;

Ahmad Shakibaeinia – Professeur, Polytechnique Montréal;

Hanif Pourshahbaz – Étudiant au doctorat, Université Laval;

Wendkudni Jude Benin – Étudiant au doctorat, Université Laval;

Clément Billy – Étudiant à la maîtrise, Polytechnique Montréal;

Gabriel Pelchat – Professionnelle de recherche, Université Laval;

Jean-Robert Ladouceur – Professionnel de recherche, Université Laval;

Amandine Pierre – Professionnelle de recherche, Université Laval.

Collaborateurs

Ministère de la Sécurité publique

Ce projet a bénéficié de l'expertise et des orientations de Pascal Marceau, Jean-Philippe Baril Boyer, Jonathan Hume, Sandra Garneau et Yannick Bourque de la direction générale de la planification et de la prévention, du sous-ministériat de la sécurité civile et de la sécurité incendie, du ministère de la Sécurité publique.

Valéry Hamel - Rédaction Graphite

Révision, orientations, réécriture, traduction, correction et mise en page.

Pour citation

Ghobrial, T. (2025). Comportement des rivières en hiver et mesures de gestion des risques reliés aux inondations. Rapport final : « Évaluer l'efficacité et l'applicabilité des structures de retenue des glaces pour la gestion des inondations ». 1^{er} mars 2025, présenté au ministère de la Sécurité publique dans le cadre du contrat CPS-18-19-26 (FLUTEIS). Université Laval, Québec.

Résumé

Le projet FLUTEIS vise à mieux comprendre le comportement des rivières en période hivernale sur le territoire québécois, en se concentrant sur l'étude de la dynamique des glaces ainsi que sur l'évaluation des risques d'inondations associés et leur mitigation.

Ce document présente le rapport final du sous-projet « Évaluer l'efficacité et l'applicabilité des structures de retenue des glaces pour la gestion des inondations » au 1^{er} mars 2025. Cette étude évalue l'efficacité des structures de retenue des glaces existantes et fournit des données pour optimiser leur conception afin de réduire les inondations causées par les embâcles de glace.

Table des matières

Liste des tableaux	4
Liste des figures	5
Mise en contexte	8
1 Introduction et objectifs	8
2 Plan d'étude	10
3 Sites d'étude.....	11
3.1 Du-Berger	13
3.2 Allard	13
3.3 Saint-Raymond	14
3.4 Du Moulin	14
3.5 Sartigan	15
4 Méthodologie.....	16
4.1 Volet 1 : Revue de la littérature	16
4.2 Volet 2 : Collecte de données sur le terrain.....	17
4.2.1 Instrumentation 2021-2022	17
4.2.2 Instrumentation 2022-2023	18
4.2.2.1 Installations propres à la SRG Sartigan.....	19
4.2.2.2 Installations propres à la SRG Saint-Raymond.....	24
4.2.2.3 Analyse des images du SCJ.....	26
4.3 Volet 3 : Modélisation numérique	26
4.3.1 Expériences en laboratoire.....	28
4.3.1.1 Quatre et neuf blocs	29
4.3.1.2 25 blocs.....	29
4.3.2 Modélisation sans maillage (MPARS - DualSPHysics).....	30
4.3.2.1 Quatre et neuf blocs	31
4.3.2.2 25 blocs.....	31
4.3.3 Modélisation avec maillage (FLOW-3D HYDRO)	31
5 Résultats	34
5.1 Volet 1 : Revue de la littérature	34
5.1.1 Publications et mots-clés	34
5.1.2 Évolution des études par catégorie	34
5.1.3 Sites d'étude et types de SRG	38

5.2	Volet 2 : Collecte de données sur le terrain.....	34
5.2.1	Résultats 2021-2022.....	41
5.2.1.1	Formation du couvert de glace	41
5.2.1.2	Discussion sur les résultats 2021-2022	51
5.2.2	Résultats 2022-2023.....	54
5.2.2.1	Synthèse des événements de mobilisation de la glace.....	54
5.2.2.2	Concentration de la glace	55
5.2.2.3	Vitesse de déplacement de la glace	57
5.2.2.4	Longueur des blocs de glace.....	59
5.3	Volet 3 : Modélisation numérique	61
5.3.1	Performances de calcul.....	61
5.3.2	Comparaisons qualitatives	62
5.3.3	Comparaisons quantitatives	67
6	Conclusions.....	72
6.1	Revue de littérature.....	72
6.2	Collecte de données sur le terrain.....	72
6.3	Modélisation numérique	73
	Références.....	75

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des sites d'étude*	13
Tableau 2. Répartition des documents relatifs à l'efficacité des SRG dans l'atténuation des embâcles de glace jusqu'en décembre 2023.	34
Tableau 3. Synthèse statistique des publications selon les méthodes d'évaluation des SRG pour réduire les inondations par embâcles de glace.	36
Tableau 4. Types de données collectées aux cinq sites à l'hiver 2021-2022.	42
Tableau 5. Caractéristiques des embâcles des SRG à l'étude à l'hiver 2021-2022	51
Tableau 6. Événements de mobilisation de la glace détectés lors de la débâcle.	55
Tableau 7. Statistiques de concentration de la glace durant la débâcle 2023.	57
Tableau 8. Vitesse de déplacement et de consolidation des blocs de glace durant la débâcle 2023.....	59
Tableau 9. Longueur des blocs de glace durant la débâcle de 2023.	60
Tableau 10. Caractéristiques des machines utilisées et temps de calcul pour les modélisations avec et sans maillage effectuées.	61

Liste des figures

Figure 1. Cinq sites à l'étude pour la saison hivernale 2021-2022. Les sites Saint-Raymond et Sartigan ont été étudiés plus en profondeur à l'hiver 2022-2023.	12
Figure 2. Grilles horizontales au site Sartigan.	15
Figure 3. Schéma du processus de sélection des documents	17
Figure 4. (a) plateformes submersibles installées aux cinq sites; (b) détails de la plateforme (c) emplacement de la caméra et (d) de la plateforme sur le site Du-Berger.	18
Figure 5. Installation de l'ADCP dans le fond du bassin Sartigan (photo prise par A. Pierre le 3 novembre 2022).	19
Figure 6. Emplacement du mini-ordinateur enregistrant les données de l'ADCP sur la rive gauche de la rivière Chaudière (photo prise par H. Pourshahbaz le 26 décembre 2022).	20
Figure 7. Schéma de la technologie GNSS et des conversions de signaux satellites directs et réfléchis en distance (Auteur D. Purnell)	21
Figure 8. GNSS et caméras Brinnos horizontales au site Sartigan à l'hiver 2022-2023 (photo prise par A. Pierre le 11 novembre 2022).	22
Figure 9. Schéma de la surface de mesure du GNSS au site Sartigan, vue du ciel (tiré de Purnell et collab., 2024).	22
Figure 10. (a) emplacement du SCJ sur la SRG Sartigan; (b) vue rapprochée du SCJ et de son fonctionnement.	23
Figure 11. Station météorologique UL installée sur la SRG Sartigan.	24
Figure 12. Dispositif d'installation des caméras horizontales à la SRG Saint-Raymond (photo prise par A. Pierre le 22 décembre 2022).	25
Figure 13. Caméras horizontales dirigées vers le couvert de glace en aval du barrage de Saint-Raymond (photo prise par A. Pierre le 22 décembre 2022).	25
Figure 14. Procédure de traitement des images provenant du SCJ et caractérisation des glaces en amont de la SRG Sartigan au moment de la débâcle (à lire de haut en bas).	28
Figure 15. (a) Disposition initiale des scénarios quatre et neuf blocs et (b) 25 blocs; (c) vue schématique de l'expérience de laboratoire de rupture de barrage avec quatre et neuf blocs et (d) 25 blocs avec des piles cylindriques.	30
Figure 16. Nuage de mots-clés utilisés dans les publications analysées, où la taille de chaque mot-clé reflète sa fréquence d'utilisation (généré par WordArt.com).	35
Figure 17. Nombre d'études par catégorie au travers des années, jusqu'en décembre 2023.	37
Figure 18: Classification des SRG : (a) piles (tiré de Tuthill et Lever, 2006); (b) déversoirs ou barrages (tiré de Vuyovich et White, 2007); (c) blocs inclinés; (d) déversoirs à piles et (e) treillis d'acier (tiré de Morse et collab., 2006).	39
Figure 19. Nombre d'études par type de SRG au travers des années, jusqu'en décembre 2023.	40

Figure 20. Résultat du site Allard (a) température de l'air (b) niveau d'eau et débit et (c) condition de glace à la surface, en amont et en aval.	43
Figure 21. Vue amont (vers l'aval) de la SRG Allard (a) couvert de glace total le 4 décembre 2021 et (b) émergence du couvert de glace le 17 février 2022.....	44
Figure 22. Résultat du site Saint-Raymond (a) température de l'air et de l'eau (b) niveau d'eau et débit et (c) condition de glace à la surface, en amont et en aval.	45
Figure 23. Vue amont (vers l'aval) de la SRG Saint-Raymond (a) croissance de la glace de rive et création d'un pont de glace le 25 novembre 2021 et (b) embâcle de glace le 15 avril 2022.	46
Figure 24. Résultats du site Du Moulin (a) température de l'air et de l'eau (b) niveau d'eau et débit et (c) condition de glace à la surface, en amont et en aval. Le débit traversant la SRG est estimé à 33 % du débit de la station des Mille-Îles située en amont (043201).	47
Figure 25. Vue amont de la SRG Du Moulin (courant de gauche à droite) (a) mouvement de frasil le 10 décembre 2021 (b) glace de rives et pont de glace le 10 janvier 2022. ...	48
Figure 26. Résultats du site Sartigan (a) température de l'eau et de l'air (b) niveau d'eau et débit et (c) condition de glace à la surface, en amont et en aval.....	50
Figure 27. Vue amont (vers l'aval) de la SRG Sartigan (a) apparition des crevasses et détachement du couvert de glace des piles le 23 mars 2022 (b) passage d'un train de glace le 4 mars 2022.	50
Figure 28. (a) Évolution temporelle et (b) distribution empilée de la concentration de glace durant la débâcle de 2023. À noter que les caméras n'enregistraient que de 6 h à 18 h. Ainsi, aucune valeur de concentration de la glace n'a été enregistrée durant la nuit.	56
Figure 29. (a) Évolution temporelle et (b) distribution empilée de la vitesse de déplacement de la glace durant la débâcle de 2023.	58
Figure 30. (a) Évolution temporelle et (b) distribution empilée de la vitesse de consolidation de la glace durant la débâcle de 2023.	58
Figure 31. (a) Évolution temporelle et (b) distribution empilée de de la longueur des blocs de glace durant la débâcle de 2023.....	60
Figure 32. Arrêt sur image de l'expérience en laboratoire et des simulations numériques de la rupture du barrage avec quatre blocs en condition de lit sec à différents intervalles de temps : $t = 0,4 \text{ s}$, $0,8 \text{ s}$, $1,2 \text{ s}$, $1,6 \text{ s}$, 2 s , et $2,4 \text{ s}$. Chaque sous-figure est composée de trois images : la 1 ^{re} les expériences en laboratoire, la 2 ^e les résultats DEM-MPS d'Amaro et collab. (2021), et la 3 ^e les résultats de FLOW-3D HYDRO.	63
Figure 33. Arrêt sur image de l'expérience en laboratoire et des simulations numériques de la rupture du barrage avec neuf blocs dans des conditions de lit sec à différents intervalles de temps : $t = 0,4 \text{ s}$, $0,8 \text{ s}$, $1,2 \text{ s}$, $1,6 \text{ s}$, 2 s , et $2,4 \text{ s}$. Chaque sous-figure est composée de trois images : la 1 ^{re} représente les expériences en laboratoire, la 2 ^e les résultats DEM-MPS d'Amaro et collab. (2021), et la 3 ^e les résultats de FLOW-3D HYDRO.	64
Figure 34. Arrêt sur image de l'expérience en laboratoire et des simulations numériques de la rupture du barrage avec 25 blocs avec des piles cylindriques à différents intervalles de temps : $t = 0,3 \text{ s}$, $0,6 \text{ s}$, $0,9 \text{ s}$, $1,2 \text{ s}$, $1,5 \text{ s}$ et 2 s . Chaque sous-figure est composée de	

trois images : la 1^{re} montre les expériences en laboratoire, la 2^e les résultats DEM-SPH de Billy et collab. (2023), et la 3^e les résultats de FLOW-3D HYDRO.66

Figure 35. Simulation à quatre blocs : graphiques des résultats expérimentaux (lignes pointillées) et numériques (ligne continue) comparant le mouvement le long des axes x et z pour les blocs B1 en (a) et (c) et B2 en (b) et (d).68

Figure 36. Simulation à neuf blocs : graphiques des résultats expérimentaux (lignes pointillées) et numériques (ligne continue) comparant le mouvement le long des axes x et z pour les blocs C1 en (a) et (d), C2 en (b) et (e), et C3 en (c) et (f).69

Figure 37. Simulation à 25 blocs : graphique des résultats expérimentaux (lignes pointillées) et numériques (ligne continue) comparant le mouvement le long de l'axe x (blocs 6, 12, 16 en (a), (b) et (c) et de l'axe z (blocs 21, 22 en (d) et (e).71

Mise en contexte

Le projet FLUTEIS s'inscrit dans une démarche de processus de gestion des risques liés aux inondations sur l'ensemble du territoire québécois, et plus spécifiquement en conditions hivernales quand les glaces modifient le comportement des rivières. C'est sous ce thème que l'Université Laval a lancé un projet de recherche pour évaluer l'efficacité et l'applicabilité de structures de retenue des glaces pour la gestion des inondations.

En effet, l'efficacité de ces structures de retenue des glaces n'a pas encore été analysée de manière quantitative, principalement en raison du manque de données détaillées et des défis associés à la transposition des résultats obtenus en laboratoire aux conditions réelles. La connexion entre la modélisation numérique, les essais en laboratoire et les situations observées sur le terrain demeurent complexes, limitant ainsi l'évaluation précise de ces structures.

Cette étude se concentre sur la collecte de données sur les caractéristiques de la glace près de certaines de ces structures au Québec, dans le but de comprendre le fonctionnement des structures existantes et de créer un ensemble de données pour calibrer un modèle numérique de dynamique des fluides. Ce modèle sera utilisé dans le but d'optimiser les structures existantes et d'évaluer de nouvelles solutions afin de réduire les inondations causées par les embâcles de glace.

Les résultats et analyses du présent rapport ont été publiés dans les revues à comité de lecture ci-dessous et présentés lors des conférences et seront discutés dans les sections suivantes.

1 Introduction et objectifs

Les mesures d'atténuation des embâcles de glace englobent tous les efforts visant à prévenir ou éliminer ces embâcles ou à minimiser les dommages causés par les inondations associées et peuvent être classées en mesures structurelles et non structurelles (Belore et collab. 1990; Hicks 2016). La construction et la conception de structures d'ingénierie permanentes ou temporaires relèvent des mesures structurelles. Ces infrastructures, communément appelées structures de retenue des glaces (SRG), sont plus coûteuses que les mesures non structurelles et peuvent avoir des impacts environnementaux importants. En contrepartie, elles sont généralement très fiables pour réduire les risques d'inondations par embâcles pour les communautés riveraines.

Jusqu'à présent, aucune analyse quantitative de l'efficacité des SRG n'a été réalisée, principalement en raison du manque de données détaillées sur le terrain et de la complexité à transposer les résultats de laboratoire aux conditions réelles (Shen, 2010). Cette étude a pour objectif de combler cette lacune en recueillant des données de terrain précises sur les caractéristiques et les mouvements de la glace à proximité de plusieurs SRG au Québec. Ces informations permettront de mieux comprendre le comportement de ces structures lors d'une inondation causée par un embâcle de glace et serviront à développer un ensemble de données pour un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics) en 3D. Ce modèle sans maillage combinera la méthode des éléments discrets

(DEM) pour simuler les composants solides (glace) et la méthode des hydrodynamiques particulières lissées (SPH) pour modéliser le composant fluide (eau).

Le modèle, validé avec des expériences de laboratoire simples, a démontré une précision suffisante (Pourshahbaz et collab., 2024). Une fois calibré avec les données de terrain, il sera utilisé par la suite pour optimiser les structures existantes et évaluer de nouvelles mesures structurelles potentielles afin de réduire les inondations causées par les embâcles de glace.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont de :

- a. Reconnaître les processus de formation et de mouvement de la glace responsables des embâcles et évaluer l'efficacité des structures existantes.
- b. Sélectionner la ou les structures adaptées à la collecte d'un ensemble de données de terrain détaillé destiné à la modélisation numérique.
- c. Analyser les données de terrain et les préparer en tant qu'entrées pour la modélisation numérique.
- d. Évaluer différentes méthodes de modélisation numérique 3D à l'aide d'expériences en laboratoire afin d'examiner leur capacité, leur précision et leur efficacité, puis choisir la méthode la plus adaptée.

2 Plan d'étude

Cette recherche est divisée en cinq parties distinctes, soit :

- 1) La revue de littérature,
- 2) La collecte de données de terrain,
- 3) L'analyse approfondie des données de terrain,
- 4) L'identification de différentes méthodes numériques,
- 5) La comparaison des méthodes numériques.

Les parties 1 et 2 visent à atteindre les deux premiers objectifs : évaluer l'efficacité des structures existantes et sélectionner le ou les sites appropriés pour la collecte de données de terrain. Cette sélection repose sur plusieurs critères, tels que les infrastructures disponibles, les défis techniques rencontrés, les coûts liés à la collecte des données sur chaque site, la disponibilité des ressources humaines, ainsi que d'autres facteurs pertinents. Ces étapes permettent également d'acquérir une compréhension globale des types de données pouvant être recueillies et des sites les plus adaptés à l'étude.

La partie 3 répond au troisième objectif en assurant la collecte et l'analyse des données de terrain. Ces données constituent un ensemble de référence essentiel pour l'étalonnage des modèles numériques, une ressource encore rare à ce jour.

Les parties 4 et 1 se concentrent sur l'évaluation des différentes méthodes numériques offertes. Elles analysent leurs avantages et leurs limites pour la simulation d'objets en mouvement.

Enfin, la partie 5 se consacre à la validation des méthodes numériques en comparant leurs résultats aux données expérimentales de laboratoire. Cette étape permet de déterminer l'approche la plus précise et efficace pour simuler les interactions entre les vagues et la glace en 3D. La combinaison des résultats issus des parties 5 et 3 fournira, à terme, aux chercheurs des outils performants pour optimiser les structures existantes et développer de nouvelles conceptions afin de limiter les inondations causées par les embâcles de glace. L'étalonnage et la validation de la méthode numérique sélectionnée ont nécessité davantage de temps et de ressources, ce qui dépasse le cadre du présent rapport. Toutefois, il s'agit d'un objectif à long terme qui fait actuellement l'objet d'une étude.

3 Sites d'étude

Le travail sur le terrain a été effectué aux hivers 2021-2022 et 2022-2023. Au cours du premier hiver, des caméras et plateformes ont été installées pour surveiller les importants processus glaciels au voisinage de cinq SRG sur les barrages suivants:

- a) Jean-Perrin sur la rivière du Berger à Québec;
- b) Allard sur la rivière Saint-Charles à Québec;
- c) Saint-Raymond sur la rivière Sainte-Anne près de Saint-Raymond;
- d) Du Moulin sur la rivière des Mille-Îles à Laval;
- e) Sartigan sur la rivière Chaudière en amont de Saint-Georges.

Des visites régulières du site ont également été effectuées pour assurer la sécurité des instruments et recueillir des données de terrain importantes, telles que l'épaisseur de la glace ainsi que la vitesse et la rugosité sous la glace.

Lors de la saison hivernale 2022-2023, deux sites ont été sélectionnés pour une étude approfondie, soit les barrages Sartigan et Saint-Raymond. Cette sélection a été basée sur divers paramètres, tels que l'accessibilité aux sites, le soutien des municipalités locales et les comportements hivernaux distincts des deux barrages. Sartigan constituait le principal point d'intérêt de l'étude, tandis que les données recueillies à Saint-Raymond ont été collectées en tant qu'ensemble de données supplémentaires, offrant une solution de rechange en cas de lacunes dans les relevés effectués à Sartigan.

Les SRG étudiées sont de type béton-gravité et classées comme des piles sur les déversoirs. Les cinq sites sont présentés à la



figure 1, au tableau 1 puis détaillés ci-après.

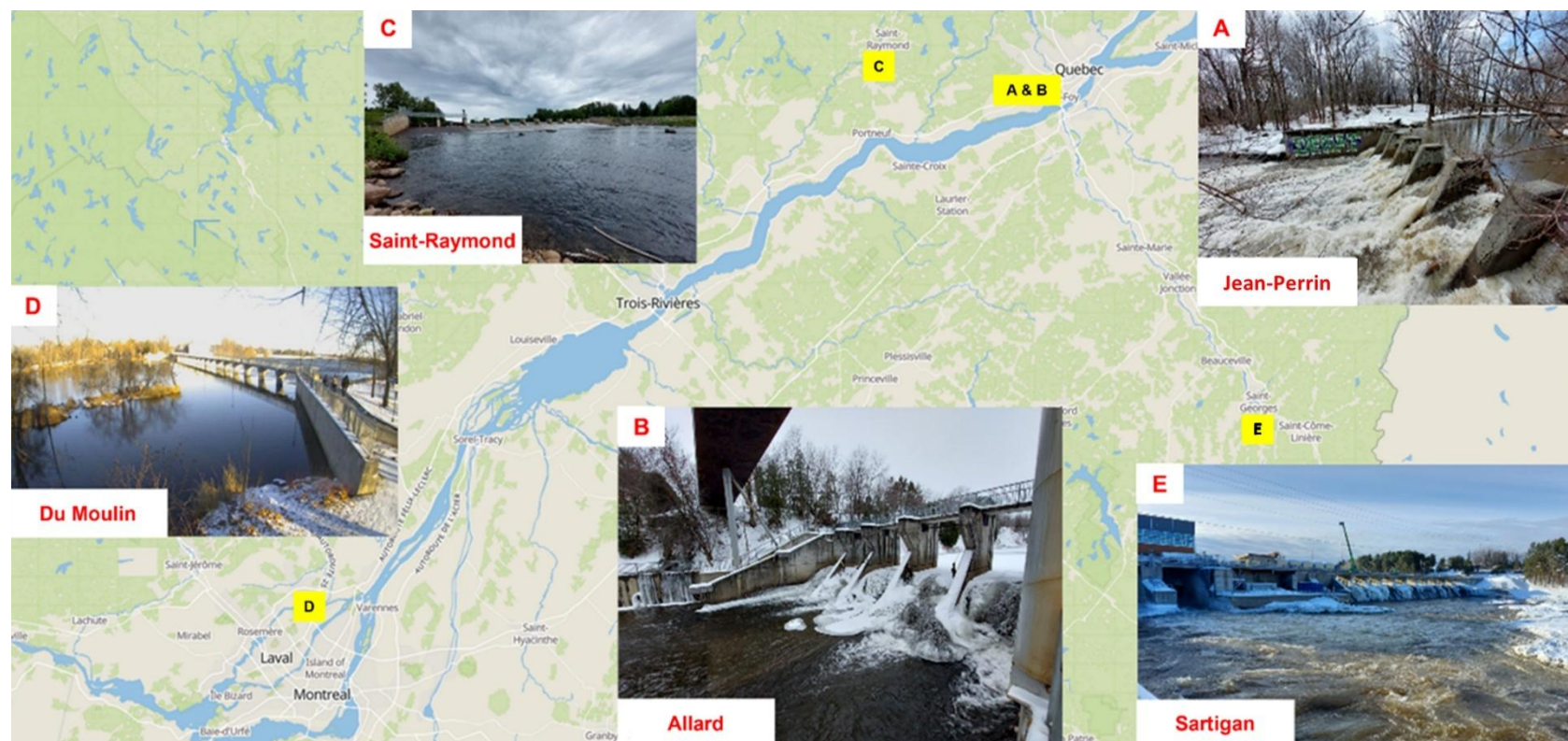


Figure 1. Cinq sites à l'étude pour la saison hivernale 2021-2022. Les sites Saint-Raymond et Sartigan ont été étudiés plus en profondeur à l'hiver 2022-2023.

Tableau 1. Caractéristiques des sites d'étude.*

Nom officiel	Nom dans le cadre de l'étude	Cours d'eau	Taille du bassin versant en amont du barrage (km ²)	Année de construction du barrage	Largeur du barrage (m)	Espaces entre les piles (m)	Hauteur de déversoir (m)
Barrage Jean-Perrin	Du-Berger	Rivière du Berger	57	1983	14,0	1,50	1,00
Barrage Allard	Allard	Rivière Saint-Charles	80	1983	19,9	3,50	2,50
Barrage de Saint-Raymond	Saint-Raymond	Rivière Sainte-Anne	756	1975	101,5	7,62	1,50
Barrage du Grand-Moulin	Du Moulin	Rivière des Mille-Îles	146	1954	125,4	6,00	1,75
Barrage Sartigan	Sartigan	Rivière Chaudière	3100	1967	140,0	6,10	7,62

*Les noms officiels sont basés sur le Répertoire des barrages du MELCCFP et la Commission de toponymie du Québec alors que la hauteur du déversoir fait référence à la distance verticale entre le point le plus bas du relief naturel et le point le plus élevé de la SRG.

3.1 Du-Berger

La rivière du Berger est une rivière de 18,4 km de longueur. Elle prend sa source dans un lac non identifié dans le secteur du boisé de Notre-Dame-des-Laurentides et se déverse dans la rivière Saint-Charles. Le bassin versant de la rivière du Berger couvre environ 53 km². Le barrage Jean-Perrin construit en 1983, désormais appelé Du-Berger dans le cadre de la présente étude, est une structure de type béton-gravité, c'est-à-dire un barrage en béton dont la stabilité est garantie par son propre poids. Cette SRG se compose de 6 piles (2 m de haut par 0,5 m de large) construits sur un déversoir de 1 m de haut. L'ouverture entre les piles est de 1,5 m (Morse et collab, 2006). Le rôle principal de cette SRG est d'empêcher l'entrée des banquises et des blocs de glace de la rivière du Berger dans la rivière Saint-Charles. Selon Morse et collab. (2006), cette SRG a fonctionné efficacement depuis sa construction en raison de l'absence d'embâcles en aval.

3.2 Allard

La rivière Saint-Charles, d'une longueur de 33 km, prend sa source dans lac Saint-Charles et se déverse dans le fleuve Saint-Laurent. Les crues annuelles de récurrence 2 ans et 100 ans sont de 64 m³/s et 105 m³/s, respectivement. Ce lieu est exposé aux risques d'inondations dues aux embâcles, en partie à cause de la dynamique complexe des glaces, mais aussi parce que le lit de la rivière présente une forte pente en amont. Cette situation est exacerbée par les particularités hydrauliques locales et l'hydrologie hivernale spécifique du bassin versant urbain, qui se caractérise par des réponses rapides aux précipitations.

Selon des bases de données historiques et des journaux locaux, 14 inondations par embâcles en saison hivernale ou pendant la saison de la débâcle ont été répertoriées entre 1953 et 2018. L'inondation de 2018 est le dernier événement en date discuté en profondeur par Lafleur et collab. (2021).

Le barrage Allard, nommé Allard dans le cadre de cette étude, représente la SRG sur ce site. Cette SRG a été construite en 1983 en réponse à un événement d'inondation par embâcle. Cependant, le moment exact de cet événement demeure incertain, car il n'est pas clairement indiqué dans les sources consultées. Ainsi, la SRG est un déversoir gravitaire en béton de 7,2 m de hauteur par 49,5 m de longueur, équipé de cinq ouvertures. Deux de ces ouvertures peuvent être actionnées par des portes basculantes alors que les trois autres possèdent des bouchons d'arrêt. Le réservoir associé à la SRG est capable de rehausser le niveau d'eau en amont de plus de deux mètres et d'abaisser la vitesse du courant, favorisant ainsi la formation d'une couche de glace stable durant la saison froide tout en limitant la production de frasil. Ceci permet de diminuer le risque d'inondations liées aux embâcles (Lafleur et collab., 2021).

3.3 Saint-Raymond

La rivière Sainte-Anne possède un bassin versant de 2 694 km². Elle prend sa source dans le lac Saint-Anne dans la réserve faunique des Laurentides et se jette dans le fleuve Saint-Laurent à Sainte-Anne-de-la-Pérade. Son débit moyen à son embouchure est de 78 m³/s. La SRG à l'étude se trouve sur le barrage de Saint-Raymond, appelé Saint-Raymond dans le cadre de la présente étude. Cette SRG mesure 102 m de long et contient des déversoirs en béton espacés aux quatre mètres. La conception de la SRG repose en partie sur une approche empirique, inspirée du succès observé avec la SRG Sartigan à Saint-Georges (Tuthill, 1995).

Cette SRG a été conçue pour favoriser la création d'une couverture de glace stable en réduisant la vitesse d'écoulement et en augmentant la profondeur de l'eau au réservoir. Les piles composant sa structure facilitent le maintien de la couverture de glace et préviennent le déplacement des blocs de glace durant les périodes de débâcle. Cependant, selon les observations sur le terrain de Morse et collab. (2006), cette SRG a fonctionné comme prévu certaines années, mais a permis la libération des accumulations de glace lors d'autres années. Par exemple en 2000, un embâcle s'est libéré en moins de 10 minutes de la structure et a provoqué une inondation dans la ville de Saint-Raymond située en aval. De plus, selon les mêmes auteurs, cette SRG présenterait deux problèmes : 1) le grand espace entre les piles (4 m) qui permet à de grands blocs de glace de se libérer pouvant contribuer à la création d'embâcles en aval et 2) l'absence de plaines inondables en raison de la construction de digues latérales en amont qui empêche le contournement du débit supplémentaire.

3.4 Du Moulin

La rivière des Mille-Îles s'étend sur près de 42 km et coule sur la partie nord de la ville de Laval, entre les villes de Saint-Eustache et de Lachenaie, où elle rejoint la rivière des Prairies. La rivière a une profondeur moyenne de 1,5 m. Le barrage du Grand-Moulin, ci-

après nommé du Moulin, est une structure de béton-gravité de 6 m de hauteur et de près de 155 m de largeur. La fonction du déversoir est d'augmenter le niveau d'eau en amont et d'encourager la formation d'un couvert de glace pour réduire le risque d'inondation par embâcle sur la rivière des Mille-Îles à Terrebonne (Tremblay et Thibault, 1980).

3.5 Sartigan

La rivière Chaudière coule du sud au nord sur 185 km à partir du lac Mégantic pour se déverser sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent à Lévis. Le bassin versant draine une vaste région de près de 7 000 km². La rivière Chaudière peut être découpée en trois tronçons distincts, soit la haute, la moyenne et la basse Chaudière.

La haute Chaudière, s'étendant de l'exutoire du lac Mégantic à la ville de Saint-Georges, est caractérisée par une pente forte, avec une moyenne de 0,262%, et traverse principalement une zone forestière. La moyenne Chaudière, qui s'étend de la ville de Saint-Georges à la municipalité de Scott, présente quant à elle une pente plus faible, avec une moyenne de 0,039%, et traverse un paysage urbain et agricole. Enfin, la basse Chaudière, s'étirant de la municipalité de Scott jusqu'à son exutoire dans le fleuve Saint-Laurent, maintient une pente prononcée, avec une moyenne de 0,205%, et traverse des zones agricoles et urbaines.

Le barrage Sartigan est composé de piles construites sur un déversoir de type Creager. Ce barrage a une largeur de 200 m et a été conçu et construit en 1967 (Perham, 1983). Des grilles horizontales ont été insérées entre les piles pour empêcher les plus petits blocs de glace de traverser la SRG (figure 2). Le rôle principal de cette SRG est de piéger et de stocker les blocs de glace pendant la saison de débâcle et de protéger la ville de Saint-Georges en aval. Depuis sa construction, cette SRG a montré son efficacité. Cependant, elle présente quelques inconvénients majeurs, notamment son coût initial élevé et le fait qu'il s'agisse d'une structure massive en béton intrusive pour l'environnement et n'est donc pas recommandé pour les conceptions futures (Morse et collab., 2006).



Figure 2. Grilles horizontales au site Sartigan.

4 Méthodologie

4.1 Volet 1 : Revue de la littérature

Une revue de la littérature sur les SRG a été réalisée. La littérature scientifique évaluée par les pairs concernant l'efficacité des SRG dans l'atténuation des inondations causées par les embâcles de glace est limitée; de nombreuses études étant non publiées ou accessibles uniquement sous forme de rapports et de manuels techniques. Pour combler cette lacune, l'approche adoptée a combiné la littérature évaluée par les pairs et des documents de la littérature grise, tels que des manuels, actes de conférences, rapports techniques, mémoires, guides spécialisés, présentations d'ateliers et autres documents pertinents.

La recherche documentaire englobe les documents accessibles jusqu'en décembre 2023 et a été effectuée à travers diverses bases de données, dont *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar* et les bases de données des bibliothèques (Par exemple, des ressources telles que la bibliothèque des actes du Committee on River Ice Processes and the Environment (CRIPE), les archives des conférences de l'International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) et la bibliothèque du Corps des ingénieurs de l'armée américaine). Le processus de sélection, incluant le filtrage, l'évaluation de l'éligibilité et la validation finale, est illustré à la figure 3. Lors du filtrage initial, les publications dans des langues autres que l'anglais ont été exclues, entraînant l'élimination de neuf documents pour des raisons linguistiques. Cependant, ces documents pertinents ont été cités à différents endroits dans le texte, permettant aux lecteurs intéressés de s'y référer au besoin. De plus, 13 publications ont été retirées en raison de l'inaccessibilité de leur texte intégral.

L'objectif principal de cette recherche bibliographique visait à évaluer l'efficacité des SRG dans la réduction des inondations par embâcles de glace. Conformément à Morse et collab. (2003), les SRG ont été définies comme des interventions structurelles distinctes des estacades flottantes ou des grands barrages, déployées en travers de la largeur d'un cours d'eau. Les digues et les installations longitudinales, comme les structures flottantes étudiés par Calkins (1991), ont été exclues. De même, les piles et culées de ponts ont été omises, sauf si elles étaient spécifiquement conçues pour atténuer les inondations par embâcles (par exemple, l'étude de Stothart et Croteau (1965).

Après le filtrage initial, 137 publications ont été retenues. Une analyse approfondie a ensuite été effectuée lors de la phase d'éligibilité, examinant les titres, mots-clés, résumés, méthodologies et, dans de nombreux cas, les textes intégraux. Cette étape a conduit à l'exclusion de 31 publications non pertinentes pour l'évaluation des SRG, de 36 portant sur des types de structures différents et de 17 revues générales ne traitant pas explicitement des SRG. Au terme de ce processus, 53 publications ont été retenues.

Un examen des références citées dans ces publications a permis de trouver neuf études supplémentaires pertinentes, portant le nombre total de documents inclus dans l'analyse finale à 62 (figure 3).

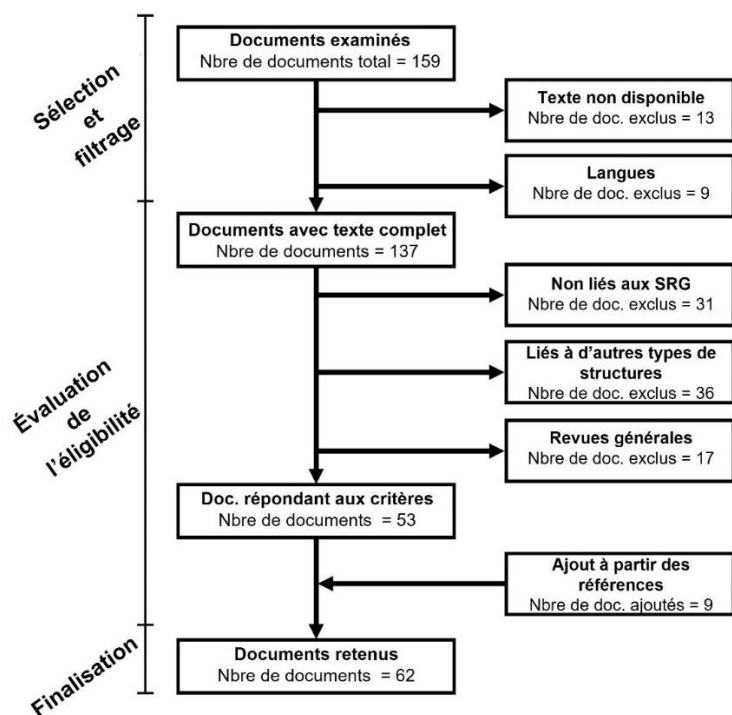


Figure 3. Schéma du processus de sélection des documents

4.2 Volet 2 : Collecte de données sur le terrain

Le travail sur le terrain a été réalisé pendant les hivers 2021-2022 et 2022-2023. Les résultats sont donc présentés séparément pour les deux saisons hivernales.

4.2.1 Instrumentation 2021-2022

À l'hiver 2021-2022, les cinq sites à l'étude ont été équipés de deux caméras (Brinno BCC 100), une en amont et une en aval du site, pour capturer des séquences accélérées de l'évolution des glaces. Ces caméras installées sur des arbres ont recueilli des données à des intervalles de 30 minutes. De plus, deux plateformes submersibles (figure 4) ont été déployées sur chaque site, l'une en amont et l'autre en aval de la SRG. Chaque plateforme comprenait un capteur de température de l'eau (RBRsolo³ T) permettant de recueillir des données chaque minute, un capteur de pression (HOBO U20L-01) acquérant des données toutes les 10 minutes et un pédalet d'accélération (HOBO UA-004-64) surveillant les turbulences près du lit de la rivière aux 15 minutes.

Les données hydrométriques ont été recueillies à partir des jauges du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) sur chaque rivière. De plus, des données météorologiques ont été recueillies auprès des stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) à proximité.



Figure 4. (a) plateformes submersibles installées aux cinq sites; (b) détails de la plateforme (c) emplacement de la caméra et (d) de la plateforme sur le site Du-Berger.

4.2.2 Instrumentation 2022-2023

À partir des résultats de la première saison hivernale (2021-2022), deux sites ont été sélectionnés afin d'être étudiés plus en profondeur durant la deuxième saison hivernale (2022-2023), soit les sites Sartigan et Saint-Raymond. Pour les deux sites, les mêmes plateformes et configurations que pour la saison 2021-2022 ont été utilisées. La configuration des caméras a cependant été ajustée pour recueillir davantage de données, et des instruments supplémentaires, propres à chaque site, ont été installés (voir sections 4.2.2.1 et d).

Des visites régulières sur le terrain ont été effectuées afin de recueillir des données sur l'épaisseur de la glace et d'obtenir des mesures de vitesse de courant sous glace à l'aide d'un FlowTracker2. De plus, lorsque cela était possible, des vols de drone ont été effectués afin de recueillir davantage de données en amont et en aval de ces structures. Les données recueillies visent à obtenir des informations sur les processus de fragmentation et de mouvements des glaces à proximité de la SRG, d'évaluer l'efficacité des SRG dans l'arrêt des passages de glace et de constituer une base de données terrain, comprenant des informations hydrauliques et relatives aux glaces, destinées à l'étalonnage et à la validation des modèles CFD.

4.2.2.1 Installations propres à la SRG Sartigan

a. Courantomètre acoustique à effet doppler

Au site Sartigan, un courantomètre acoustique à effet doppler (ADCP) Signature1000 (Nortek, É.-U.) a été installé le 3 novembre 2022 à 15 mètres en amont du barrage et à 100 m de la rive gauche, à une profondeur estimée de 3 m (figure 5). Posé sur une plateforme de métal de 600 lb, l'ADCP a été installé à l'aide de plongeurs et d'une grue. L'instrument enregistre des données de vitesse de courant et des profils de hauteurs d'eau aux cinq secondes. Il a été relié par un câble de connexion à un mini-ordinateur (Fitlet2, NW) afin de pouvoir télécharger les données facilement toutes les 2 semaines (figure 6).



Figure 5. Installation de l'ADCP dans le fond du bassin Sartigan (photo prise par A. Pierre le 3 novembre 2022).



Figure 6. Emplacement du mini-ordinateur enregistrant les données de l'ADCP sur la rive gauche de la rivière Chaudière (photo prise par H. Pourshahbaz le 26 décembre 2022).

b. Réflectométrie GNSS

La réflectométrie GNSS ou GNSS-R de l'anglais « Global Navigation Satellite System Reflectometry » utilise les signaux des satellites de navigation qui se réfléchissent sur la surface de la Terre pour mesurer des caractéristiques géophysiques ou environnementales, telles que l'humidité du sol, les niveaux d'eau et la topographie des glaces.

Ici, les GNSS, équipés de quatre antennes GPS, mesuraient au pas de temps de 10 minutes les signaux GPS réfléchis par la surface de la Terre. Comme chaque type de surface réfléchit les signaux différemment, l'algorithme développé par Purnell et collab. (2024) a été utilisé pour traiter ces derniers et les comparer aux signaux directs afin de les convertir en distance (figure 7).

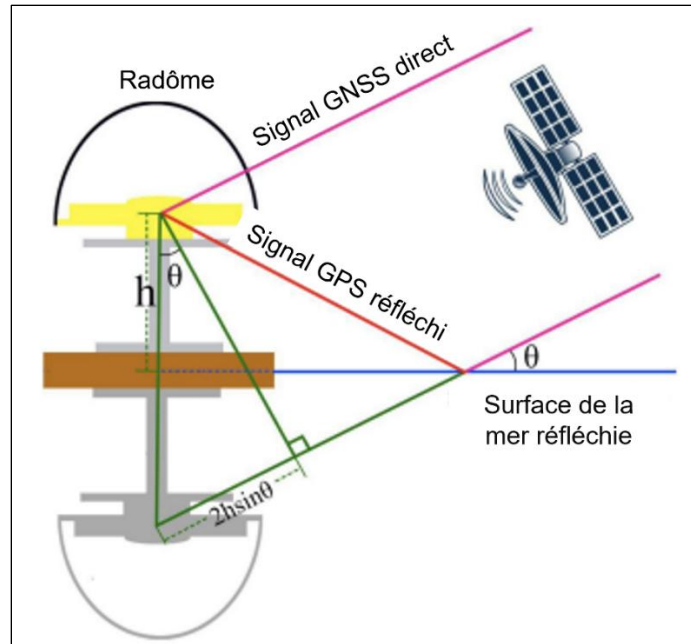


Figure 7. Schéma de la technologie GNSS et des conversions de signaux satellites directs et réfléchis en distance (Auteur D. Purnell)

Un GNSS a ainsi été déployé sur la rivière Chaudière à compter du 11 novembre 2022 (figure 8). Depuis 2022, la technologie GNSS a été améliorée et devrait permettre d'estimer la hauteur de neige, de glace et d'eau sur la surface de mesure (figure 9). Toutefois, comme ces améliorations sont encore à l'essai, des mesures manuelles d'épaisseurs de glace ont tout de même été nécessaires durant la saison 2022-2023. De plus, le GNSS a été équipé de caméras « time lapse » permettant de capturer des séquences accélérées de la surface de la rivière afin de valider les données de présence de glace ou non. Les données du GNSS seront comparées à celles du ADCP.

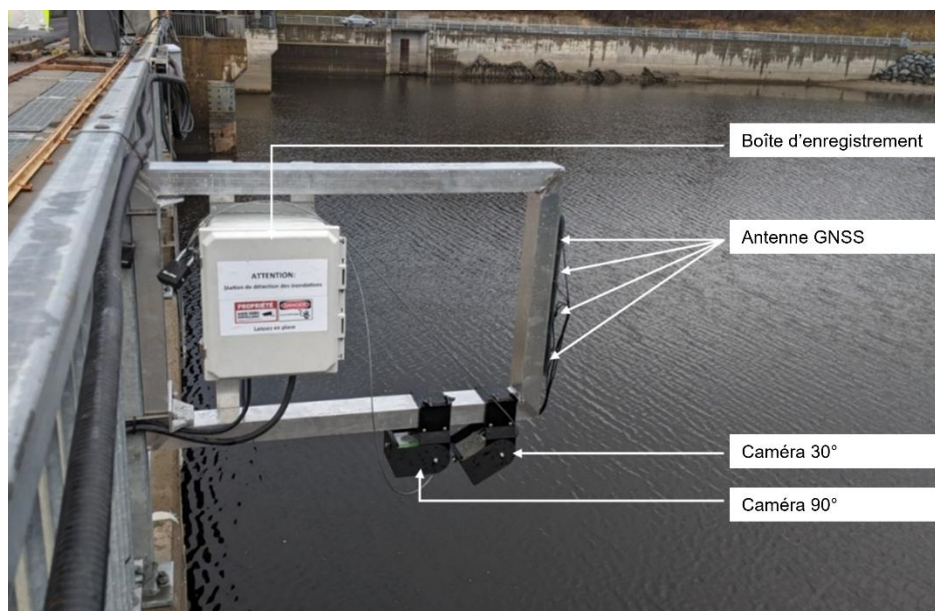


Figure 8. GNSS et caméras Brinnos horizontales au site Sartigan à l'hiver 2022-2023 (photo prise par A. Pierre le 11 novembre 2022).

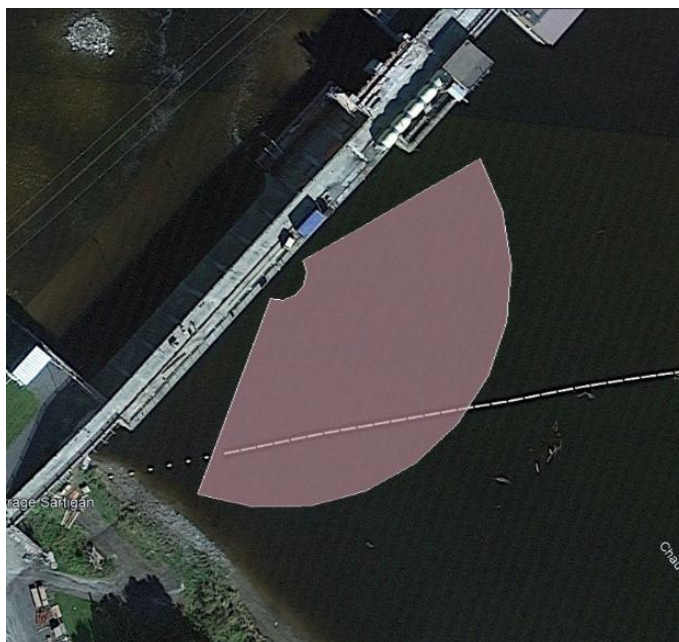


Figure 9. Schéma de la surface de mesure du GNSS au site Sartigan, vue du ciel (tiré de Purnell et collab., 2024).

c. Caméras horizontales

Afin de caractériser la rétention des glaces en amont, un système de caméras juxtaposées (SCJ) a été installé au centre de la passerelle du barrage Sartigan, au-dessus du pilier séparant les ouvertures n°05 et n°06 (figure 10a). La hauteur entre le SCJ et la crête du barrage était de 5 m (H_{SCJ} sur la figure 10a).

Le SCJ, composé de deux tubes rectangulaires en aluminium de 2" x 3", a été fixé à la rambarde de sécurité de la SRG (figure 10b). Il a été équipé de deux caméras « time lapse » Brinno TLC200, alimentées par des piles AA et offrant une résolution maximale de 1280x720 pixels. La première caméra a été positionnée verticalement, à un angle de 90°, orientée directement vers la surface de l'eau (vue en plan), tandis que la seconde a été inclinée à 45°, placée juste devant la première afin d'offrir une vue plus éloignée de la structure (vue en perspective).

Les deux caméras ont été installées à une distance minimale de 0,5 m de la rambarde (D_{JCS} sur la figure 10b) et espacées de 6 cm de manière précise pour permettre un chevauchement partiel de leurs images respectives. Ainsi, l'image capturée par la caméra inclinée à 45° prolongeait celle de la caméra verticale (90°) lorsqu'elles étaient combinées.

Les caméras ont été programmées pour prendre une photo toutes les 10 secondes, entre 6 h et 18 h chaque jour, du 23 novembre 2022 au 17 avril 2023.

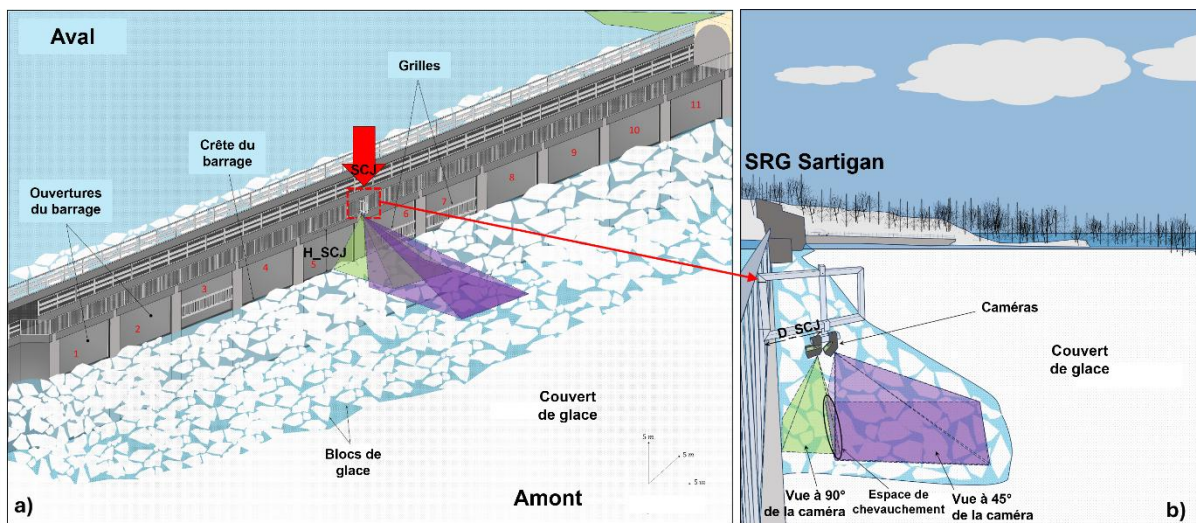


Figure 10. (a) emplacement du SCJ sur la SRG Sartigan; (b) vue rapprochée du SCJ et de son fonctionnement.

d. Station météorologique UL

Une station météorologique cellulaire (HOBO RX-3000) a été installée sur le barrage par l'équipe de l'UL afin de recueillir des données hydrométéorologiques. La station fournissait des mesures en temps réel toutes les 30 minutes pour les paramètres suivants :

- Température de l'air (précision $\pm 0,25$ °C, résolution 0,02 °C)
- Humidité relative (précision $\pm 2,5$ %, résolution 0,01 %)
- Vitesse du vent (précision $\pm 1,1$ m/s, résolution 0,5 m/s)
- Direction du vent (précision $\pm 5^\circ$, résolution 1,4°)
- Rayonnement solaire (précision ± 10 W/m², résolution 1,25 W/m²)
- Pression atmosphérique (précision $\pm 3,0$ mbar, résolution 0,1 mbar)

Ces mesures ont été enregistrées à l'aide des capteurs HOBO S-THC-M002, S-WSB-M003, SWDA-M003, S-LIB-M003 et S-BPB-CM50.

Les détails de la station météorologique sont présentés à la figure 11.

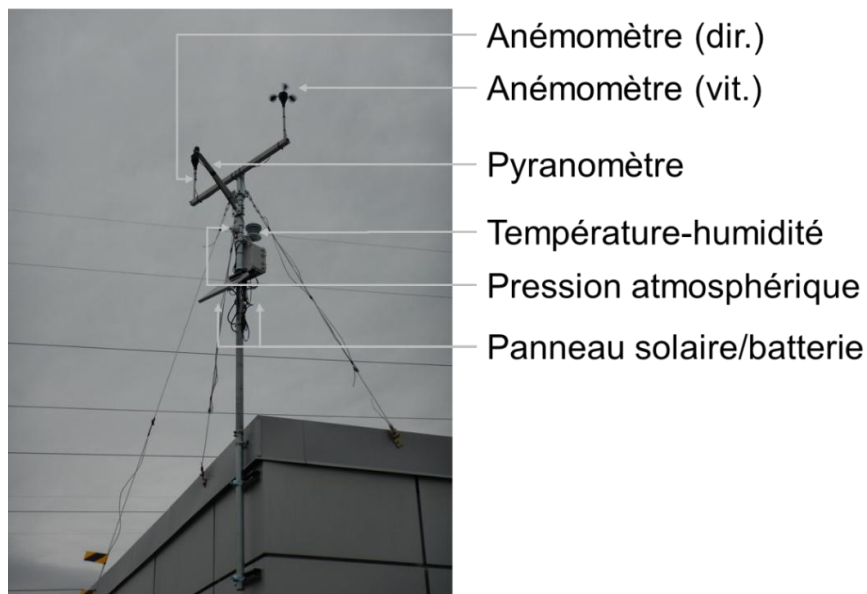


Figure 11. Station météorologique UL installée sur la SRG Sartigan.

4.2.2.2 Installations propres à la SRG Saint-Raymond

Avec l'accord de la Direction générale des barrages, un dispositif de caméras horizontales équivalent à celui de Sartigan a été installé le 22 décembre 2022 au-dessus du barrage de Saint-Raymond (figure 12 et figure 13). Le pas de temps des caméras était de sept secondes et les images possédaient une zone de recouvrement identique à celle de Sartigan.

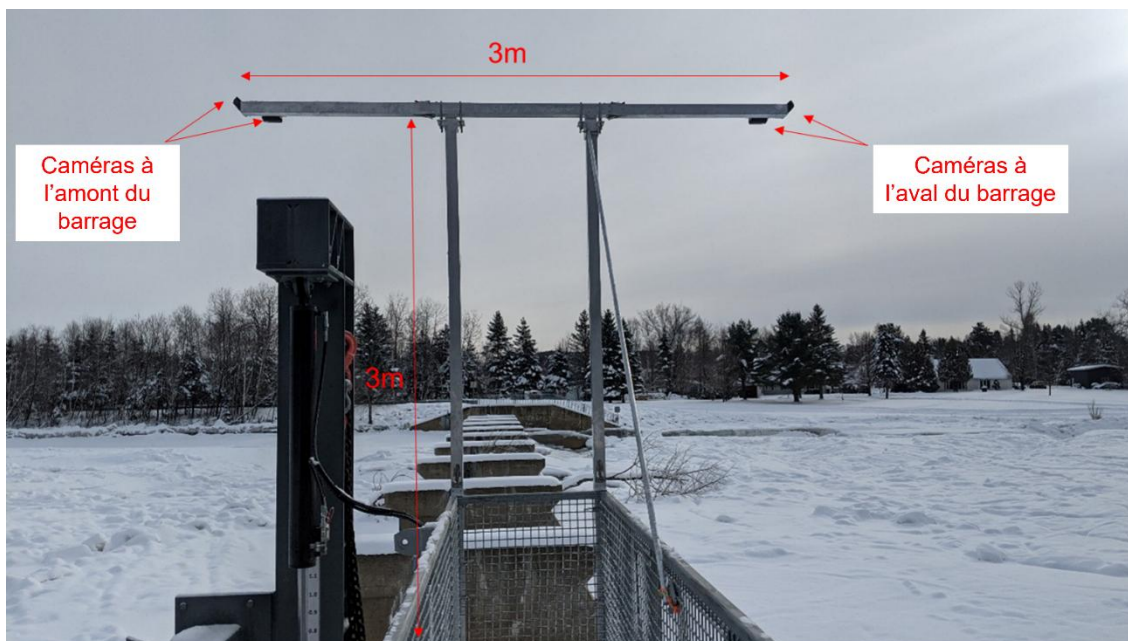


Figure 12. Dispositif d'installation des caméras horizontales à la SRG Saint-Raymond (photo prise par A. Pierre le 22 décembre 2022).



Figure 13. Caméras horizontales dirigées vers le couvert de glace en aval du barrage de Saint-Raymond (photo prise par A. Pierre le 22 décembre 2022).

4.2.2.3 Analyse des images du SCJ

Les images provenant du SCJ ont été traitées et analysées en cinq étapes successives, mises en évidence en orange dans la figure 14.

1) D'abord, les séquences d'images brutes ont été analysées afin de déterminer les journées où la glace était en activité, c'est-à-dire si des fragments de glace étaient présents ou en mouvement, contrairement à une couverture de glace stationnaire et uniforme sur l'ensemble du plan d'eau. Cette étape a permis de limiter le traitement aux séquences d'images brutes de trois journées, soit les 11, 12 et 13 avril 2023.

2) Ensuite, les images brutes, où des mouvements de glace ont été observés ont été extraites individuellement, à une fréquence de 10 secondes, à l'aide d'un logiciel de montage vidéo.

3) L'effet de distorsion causé par les lentilles des caméras (effet de barillet) a été corrigé à l'aide d'un code PYTHON provenant de la bibliothèque OPENCV. Pour ce faire, des images d'un échiquier, capturées avec les mêmes caméras de terrain, ont été utilisées afin de calculer la matrice de distorsion la plus adaptée. Celle-ci permet de reproduire avec précision les dimensions réelles des cases, préalablement mesurées et définies dans le code. La matrice obtenue a restitué les cases avec une erreur totale de 0,024 ou 2,4 %, un résultat très satisfaisant, sachant que l'erreur moyenne est d'environ 5 %. Cette calibration a ensuite été appliquée à toutes les images extraites à l'étape 2.

4) Une vue en plan des images capturées par la caméra inclinée à 45° a été générée en utilisant la même bibliothèque OPENCV que celle employée à l'étape 3. L'application de ce code reposait sur la connaissance des lignes (ou points) de perspective dans l'image ainsi que sur la hauteur entre la surface de l'eau et la caméra. Dans cette étude, la variation du niveau d'eau a été moyennée quotidiennement, entraînant des lignes de perspective différentes pour chaque journée où des événements liés à la glace ont été observés. Ces lignes ont été déterminées à partir d'images montrant les mêmes fragments ou blocs de glace dans la vue en perspective de la caméra inclinée à 45° et dans la vue en plan de la caméra verticale. L'emplacement des points de perspective a été ajusté par itération afin de minimiser les erreurs sur les dimensions en pixels de ces blocs. En d'autres termes, les dimensions des blocs de glace restaient presque identiques d'une caméra à l'autre.

Cette méthode a permis d'obtenir des points de perspective finaux avec une erreur maximale sur les dimensions des blocs de glace de 1,59 % le 11 avril, 10,79 % le 12 avril et 3,78 % le 13 avril. Les vibrations de la caméra ont été plus marquées le 12 avril en raison d'une vitesse du vent cinq fois plus élevée que celle mesurée le 11 avril et le 13 avril, ce qui explique l'erreur maximale de 10,79 %. Ces erreurs ont été considérées comme acceptables compte tenu des limites liées à la qualité des images.

5) Les images capturées simultanément par les deux caméras ont été combinées pour créer une mosaïque, permettant d'extraire des paramètres tels que :

- Les événements de mobilisation des glaces : définis comme l'avancée de blocs de glace dans le champ de vision du SCJ à un instant donné de la journée. Ces blocs pouvaient être retenus par la structure ou non. Si les blocs de glace étaient retenus par la structure, l'événement était classé comme « avec temps de rétention » (ATR).

Alors que si les blocs de glace traversaient librement la structure sans s'arrêter, l'événement était classé comme « sans temps de rétention » (STR).

- La concentration de la glace du plan d'eau : évaluée à l'aide d'un seuillage noir et blanc appliqué aux images combinées. Le seuil a été optimisé en caractérisant les couleurs typiques de l'eau et de la glace sur les images. La concentration de la glace a ensuite été calculée comme le pourcentage de pixels blancs (glace) par rapport au nombre total de pixels de chaque image.
- La vitesse de mouvement et la longueur des blocs de glace : déterminées en convertissant les pixels des images en unités métriques. Pour cette conversion, les images ont été géoréférencées à l'aide des coordonnées relevées d'un rectangle de 1 m × 1 m, placé sur la couverture de glace dans le champ de vision du SCJ le 30 mars 2023. Une fois les images géoréférencées, leurs pixels ont été convertis en unités métriques avec une échelle de 0,005763 m/pixel.

La vitesse des blocs de glace a été calculée à l'aide de l'équation 1 :

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{\sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2}}{(t_f - t_i)} \quad (1)$$

où d est la distance parcourue par le bloc de glace (m), Δt est la durée du déplacement (s), x_f et x_i sont respectivement les coordonnées d'arrivée et de départ du bloc de glace sur l'axe des abscisses (m), y_f et y_i sont respectivement les coordonnées d'arrivée et de départ du bloc de glace sur l'axe des ordonnées (m) et t_f et t_i sont respectivement le moment d'arrivée et de départ du bloc de glace (s).

La vitesse a ensuite été classée en deux catégories :

- Vitesse de déplacement : lorsque le bloc se déplaçait librement vers la structure (durant un STR et aussi au début d'un événement ATR).
- Vitesse de consolidation : lorsque le bloc faisait déjà partie d'une accumulation de glace en amont de la SRG (uniquement dans les événements ATR).

La longueur des blocs de glace, soit la plus grande distance entre deux points de son contour, a été calculée à l'aide de l'équation 2 :

$$c = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2)$$

où c est la longueur du bloc de glace visible dans le plan d'eau (m), x_2, x_1, y_2, y_1 , sont les coordonnées en x et en y des deux points les plus éloignés du contour du bloc de glace (m).

Les coordonnées du contour des blocs de glace ont été obtenues en utilisant la bibliothèque OPENCV de PYTHON.

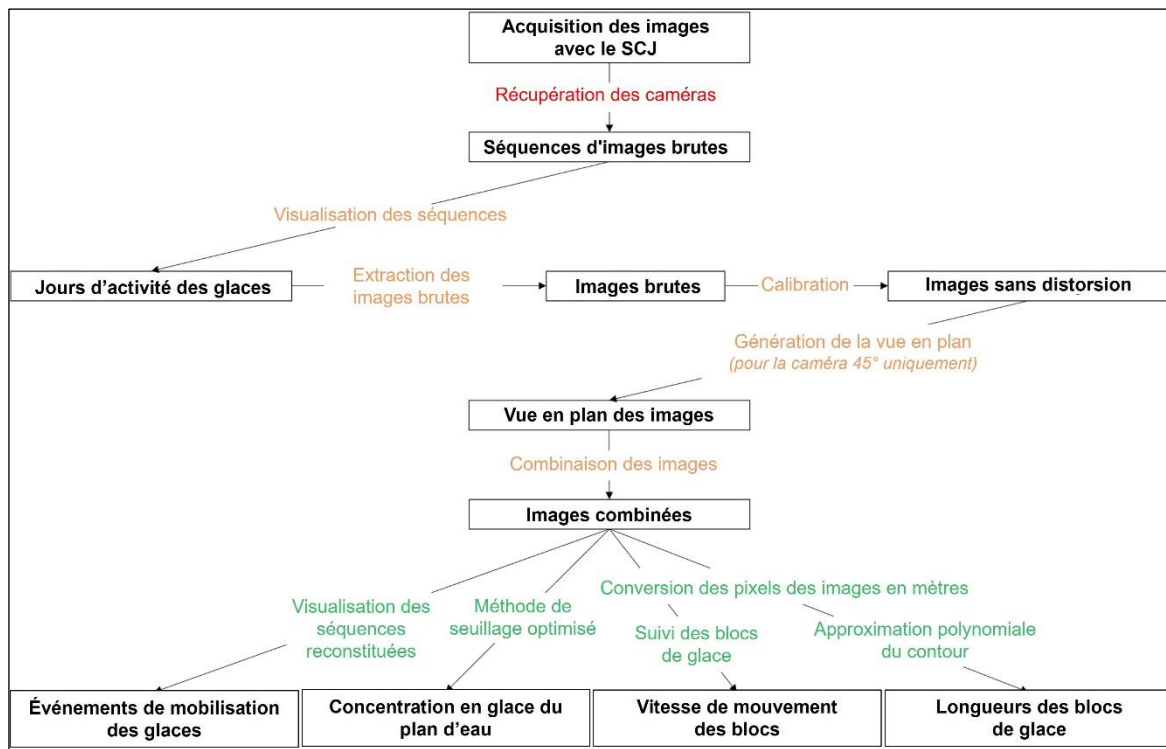


Figure 14. Procédure de traitement des images provenant du SCJ et caractérisation des glaces en amont de la SRG Sartigan au moment de la débâcle (à lire de haut en bas).

4.3 Volet 3 : Modélisation numérique

Des expériences en laboratoire ont été menées au sein du laboratoire hydraulique à froid de Polytechnique Montréal afin d'étudier le comportement des glaces dans des scénarios de rupture de barrage pour des cas de quatre, neuf et 25 blocs. De plus, des expériences en laboratoire ont été réalisées avec 160 blocs dans un canal rectiligne, sous différentes conditions d'écoulement (nombres de Froude) et en utilisant divers matériaux (glace réelle et polypropylène). Ces expériences, intégrant des SRG, visaient à reproduire des conditions plus proches de la réalité et à évaluer les performances des modèles numériques.

Ces scénarios ont ensuite été simulés dans des modèles numériques avec et sans maillage. Les résultats des expériences en laboratoire et des modélisations ont été comparés et sont présentés à la section 5.3.

4.3.1 Expériences en laboratoire

Dans cette étude, les expériences de laboratoire sont rapportées par Amaro et collab. (2021) pour les cas de ruptures de barrage et par Billy et collab. (2022, 2023) pour l'interaction de la glace avec des piles cylindriques. Elles sont utilisées comme bases pour évaluer et comparer les modèles CFD. Ces expériences de laboratoire génèrent des données standards pour la validation et le paramétrage des simulations numériques.

4.3.1.1 Quatre et neuf blocs

Des expériences de rupture de barrage ont été réalisées en utilisant deux scénarios, soit quatre et neuf blocs retenus flottants en amont d'une vanne (considérée comme un barrage). Le réservoir présentait des dimensions intérieures de 70 cm de longueur sur 15 cm de largeur sur 30 cm de hauteur. Une porte amovible de 0,5 cm d'épaisseur divisait le réservoir en longueur où la partie amont mesurait 15 cm de long et la partie aval 55 cm de long. La hauteur de l'eau a été fixée à 15 cm en amont, tandis qu'à l'aval différentes hauteurs d'eau (0 cm, 1 cm, 2,5 cm et 5 cm) ont été évaluées.

Chaque expérience de laboratoire a été répétée trois fois pour en vérifier la fiabilité. Des blocs de glace artificiels en polypropylène blanc présentaient une densité approximative de 868 kg/m³. Dans le scénario à quatre blocs, chaque bloc mesurait 7,25 cm sur 7,25 cm sur 1,95 cm $\pm 0,06$ cm, et dans le scénario avec neuf blocs, les dimensions des blocs étaient de 4,8 cm sur 4,8 cm sur 1,95 cm $\pm 0,05$ cm. La porte a été soulevée rapidement afin de reproduire un scénario de rupture de barrage, et deux caméras situées à l'avant et au-dessus du réservoir ont permis d'enregistrer le mouvement des blocs de glace dans les directions X et Z.

4.3.1.2 25 blocs

La deuxième série d'expériences portait sur l'étude de l'interaction de 25 blocs de glace, artificielle et réelle, libérés par une vague de rupture de barrage avec un ensemble de piles cylindriques. Les dimensions du réservoir étaient de 100 cm de long sur 25 cm de large sur 30 cm de haut. Une vanne de 0,5 cm d'épaisseur divisait le réservoir en longueur. La partie amont mesurait 25 cm de long et la hauteur d'eau était aussi de 25 cm. La partie aval mesurait pour sa part 75 cm de long alors que la hauteur d'eau était de 2,5 cm. La SRG était représentée par trois cylindres en PVC de 3,1 cm de diamètre, placés à 30 cm en aval de la porte amovible, espacés de 3,75 cm les uns des autres. Les 25 blocs avaient des dimensions de 4,6 cm sur 4,6 cm sur 0,9 cm $\pm 0,05$ cm. Les autres caractéristiques étaient les mêmes que pour les expériences à quatre et neuf blocs.

Une vue schématique du réservoir et des instruments utilisés pour la réalisation des expériences en laboratoires pour quatre, neuf et 25 blocs est présentée à la figure 15.

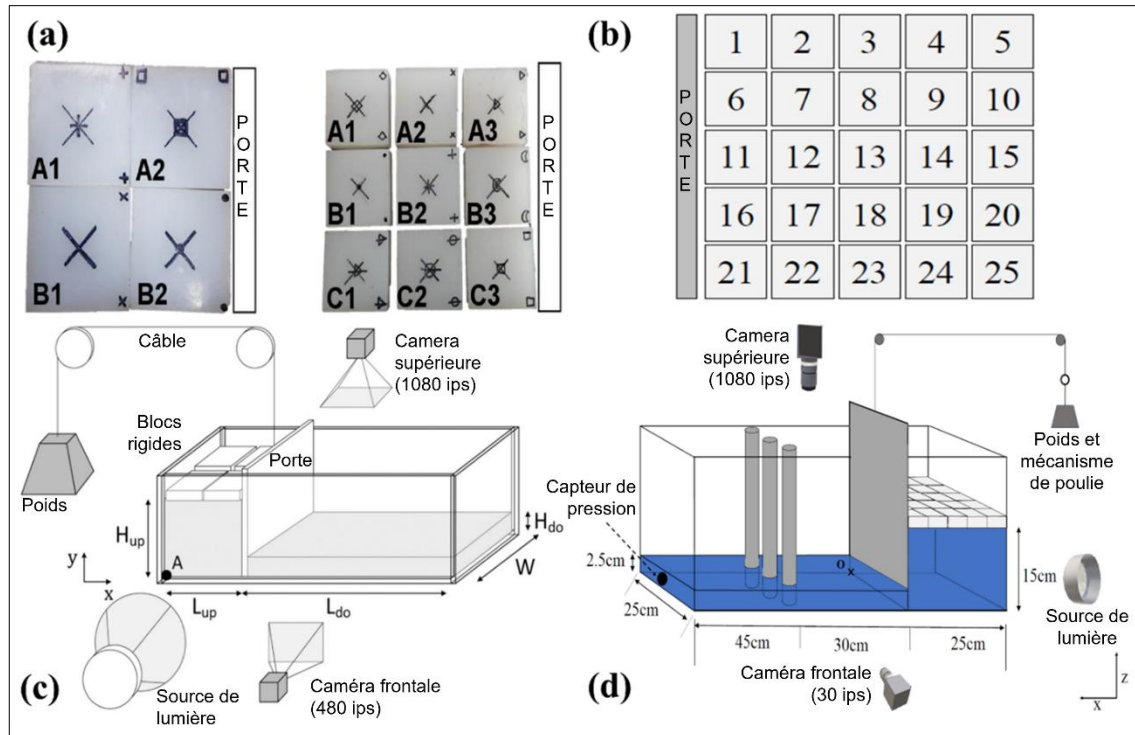


Figure 15. (a) Disposition initiale des scénarios quatre et neuf blocs et (b) 25 blocs; (c) vue schématique de l'expérience de laboratoire de rupture de barrage avec quatre et neuf blocs et (d) 25 blocs avec des piles cylindriques.

4.3.2 Modélisation sans maillage (MPARS - DualSPHysics)

Les dispositifs expérimentaux de quatre, neuf et 25 blocs ont été simulés dans des modèles numériques sans maillage. Pour ce faire, la vitesse de déplacement de la porte a été calculée à 0,4 m/s, représentant la médiane de la vitesse moyenne de la porte dans 24 expériences de laboratoire alors que les mouvements des blocs de glace dans les directions X et Z ont été obtenus en suivant la masse centrale de chaque bloc avec le logiciel Tracker. Le profil de surface a également été obtenu en numérisant les images de la caméra frontale.

Le modèle numérique tient compte de l'interaction entre le fluide¹ (phase continue) et les blocs de glace (parties solides discrètes). Les deux phases sont résolues à l'aide de lois physiques dans un cadre lagrangien, et leur interaction est couplée. La phase fluide est régie par la conservation de la masse et de la quantité de mouvement qui sont décrites par les équations de Navier-Stokes. Pour plus d'informations sur les équations régissant l'écoulement et les méthodes de couplage, se référer à Billy et collab. (2023) et Amaro et collab. (2021).

¹ Les fluides comprennent les liquides, les gaz et les plasmas. Ils se caractérisent par leur capacité à s'adapter à la forme du contenant qui les accueille et à s'écouler sous l'action de forces extérieures, comme la gravité ou la pression. La dynamique des fluides étudie le comportement des fluides en mouvement ainsi que les forces qui les influencent.

4.3.2.1 Quatre et neuf blocs

Le dispositif expérimental de quatre et neuf blocs a été simulé à l'aide d'un modèle DEM-MPS (MPARS) comme indiqué par Amaro et collab. (2021). Dans cette étude, seuls les cas où le niveau d'eau en aval était nul (sécheresse) sont présentés dans les résultats. Pour plus d'informations, les lecteurs peuvent se référer à Pourshahbaz et collab. (2024) pour une discussion complète des autres simulations réalisées avec FLOW-3D HYDRO. La méthode MPS (Moving Particle Semi-implicit) a été utilisée pour résoudre les équations régissant la phase continue (eau) dans Amaro et collab. (2021). Cette méthode repose sur des particules mobiles pour modéliser le fluide, permettant une simulation dynamique des interactions fluides et de la surface libre de l'eau, sans nécessiter de maillage fixe comme dans d'autres méthodes numériques.

4.3.2.2 25 blocs

Le dispositif expérimental de 25 blocs a été simulé à l'aide d'un modèle DEM-SPH (DualSPHysics) comme indiqué par Billy et collab. (2023). Billy et collab. (2022) ont aussi simulé l'expérience de laboratoire de 9 blocs avec ce modèle numérique comme cas de validation. Dans la présente étude, seuls les résultats des simulations utilisant des blocs en polypropylène sont présentés pour le modèle FLOW-3D HYDRO. Les lecteurs intéressés peuvent se référer à Pourshahbaz et collab. (2024) pour une discussion complète sur les autres simulations réalisées avec FLOW-3D HYDRO. La méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) a été utilisée pour les méthodes numériques dans Billy et collab. (2022, 2023). Cette méthode repose sur la discrétisation du fluide en particules, chacune portant des propriétés physiques telles que la masse, la vitesse et la densité afin de représenter des phénomènes tels que les écoulements, la dynamique des crues et les interactions fluides-structure.

4.3.3 Modélisation avec maillage (FLOW-3D HYDRO)

Les dispositifs expérimentaux de quatre, neuf et 25 blocs ont été simulés dans un modèle numérique avec maillage. Le modèle FLOW-3D HYDRO R1 a été utilisé. Ce modèle est une branche de FLOW-3D et se concentre sur les problèmes d'ingénierie civile et environnementale. Il s'agit d'un modèle CFD, s'appuyant sur des maillages fixes, capable de simuler l'écoulement, la turbulence, la charge de fond, la charge en suspension et les objets en mouvement pour diverses conditions limites.

Sa force réside dans sa capacité à résoudre les équations de Navier-Stokes en 3D dans des conditions non hydrostatiques, en utilisant un schéma de différences finies. Cela rend le modèle particulièrement utile pour simuler l'écoulement en surface libre. Ainsi, les équations de continuité et de la quantité de mouvement utilisées sont présentées dans les équations (3) et (4) :

$$\frac{\partial}{\partial x} uA_x + \frac{\partial}{\partial y} vA_y + \frac{\partial}{\partial z} wA_z = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} U_j A_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (4)$$

Dans ces équations, u , v et w sont les composantes de la vitesse dans les directions x , y et z . ρ est la densité du fluide, P' est la pression hydrostatique et g_i est l'accélération de la pesanteur dans chaque direction. La contrainte de Reynolds est indiquée par f_i et le modèle de turbulence l'utilise pour créer une boucle de calcul. Les zones fractionnaires ouvertes à l'écoulement dans chaque direction sont représentées par A_x , A_y et A_z . La fraction de volume de fluide dans chaque cellule est indiquée par V_f qui, lorsque les cellules de calcul sont remplies par le fluide, correspond à A_j et est égale à un. Ceci conduit à réduire les équations à un seul fluide incompressible sous la forme d'une moyenne de Reynolds de Navier-Stokes (RANS).

Afin de résoudre les itérations numériques, les équations de RANS ont été appliquées. Différents modèles de turbulence sont offerts dans FLOW-3D HYDRO, mais dans le cadre de cette recherche, le modèle de turbulence $k-\epsilon$ RNG a été sélectionné, pour son caractère pratique, sa rentabilité et sa capacité à fournir des solutions raisonnables à l'aide de processeurs PC courants, afin d'estimer la contrainte de cisaillement près de la paroi. Ceci a été fait avec suffisamment de précision pour couvrir les flux de turbulence faibles et les régions de contrainte de cisaillement élevée.

Dans ces simulations, une frontière externe est utilisée pour contrôler la surface du fluide avec la méthode VOF (Volume of Fluid). L'écoulement est simulé en traitant le fluide comme incompressible, ce qui signifie qu'on ignore l'impact de l'air ou du gaz à proximité de l'écoulement du fluide. Pour simplifier et accélérer les calculs, les espaces vides sont considérés comme étant remplis de gaz.

FLOW-3D HYDRO comprend un module GMO (un modèle DEM-CFD) pour simuler la translation et la rotation d'objets dans un mouvement à six degrés de liberté (6-DOF). La translation d'un corps rigide est décrite par la deuxième loi de Newton et la rotation d'un corps rigide, quant à elle, est décrite par le principe de conservation du moment angulaire. Ces deux mouvements sont résolus simultanément afin de décrire le mouvement 6-DOF d'un corps rigide, comme le montrent les équations (5) et (6) :

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{V}_G}{dt} \quad (5)$$

$$\vec{T}_G = J \cdot \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + \vec{\omega} \times J \cdot \vec{\omega} \quad (6)$$

Dans ces équations, la force totale est représentée par F , la masse est m , le couplage autour du centre de la masse dans le système de référence du corps fixe est T_G , la vitesse du centre de la masse est V_G , la vitesse angulaire dans le système du corps est ω et le tenseur du moment d'inertie autour du centre de masse est J .

Dans cette étude, un simple maillage rectangulaire composé de 1 450 000 cellules pour des cas de quatre et neuf blocs, et de 1 780 000 cellules pour des cas de 25 blocs a été utilisé. Ceci a été jugé suffisant pour capturer les principales caractéristiques des simulations. D'autres aspects de la modélisation numérique, comme les coefficients de restitution et de frottement, les conditions limites et initiales employées dans les

simulations étaient cohérents avec ceux utilisés dans les expériences de laboratoire et les simulations numériques.

Plus de détails sur les équations régissant l'écoulement, les méthodes de couplage et les coefficients utilisés pour chaque simulation sont accessibles dans Pourshahbaz et collab. (2023a, 2024). Les lecteurs intéressés sont invités à s'y référer pour plus d'informations.

5 Résultats

5.1 Volet 1 : Revue de la littérature

5.1.1 Publications et mots-clés

Comme mentionné dans la section précédente, 62 documents ont été retenus pour la présente étude et classés en quatre catégories distinctes :

- 1) Actes de conférence;
- 2) Articles de revues scientifiques;
- 3) Rapports;
- 4) Chapitres de livres.

Le tableau 2 présente le nombre et le pourcentage de publications pour chacune de ces catégories.

Tableau 2. Répartition des documents relatifs à l'efficacité des SRG dans l'atténuation des embâcles de glace jusqu'en décembre 2023.

Type de publication	Nombre de publications	Répartition (%)
Actes de conférence	35	56,5%
Articles de revues scientifiques	13	21%
Rapports	11	17,7%
Chapitres de livres	3	4,8%
Total	62	100%

Plus de la moitié de ces documents (56,5%) proviennent de conférences, en particulier celles organisées par l'*International Association for Hydro-Environment Engineering and Research* (IAHR) et le *Committee on River Ice Processes and the Environment* (CRIPE). Cette prévalence s'explique par l'orientation de ces conférences vers l'ingénierie des glaces en rivière ainsi que par la rapidité de publication et l'accessibilité de leurs articles.

Cela souligne également que ce type de recherche a été principalement mené par des ingénieurs praticiens et des chercheurs en ingénierie appliquée, qui ne sont pas nécessairement rattachés à des institutions académiques. En conséquence, ils pourraient être moins enclins à publier leurs travaux dans des revues scientifiques à comité de lecture.

Les articles de revues scientifiques et les rapports représentent respectivement 21 % et 17,7 % du total des documents retenus. Les rapports proviennent principalement du *Cold Regions Research and Engineering Laboratory* (CRREL) de l'armée américaine, et couvrent diverses études sur la construction, l'optimisation et l'évaluation de différents SRG.

Enfin, la dernière catégorie regroupe des chapitres de livres, notamment sur les embâcles de glace en rivière, la débâcle fluviale, la formation de la glace en rivière et un chapitre totalement consacré aux SRG et à leur évaluation.

Tableau 3. Synthèse statistique des publications selon les méthodes d'évaluation des SRG pour réduire les inondations par embâcles de glace.

Catégories	Nombre d'études*	Répartition des documents par catégorie (%)	Date de première publication
Modélisations numériques	28	42%	1986
Études historiques et observations de terrain	15	22%	1981
Revue de littérature	15	22%	1965
Expériences en laboratoire	9	14%	1990

**Certaines études ont été comptabilisées plusieurs fois, car elles utilisent plus d'une méthode d'évaluation.*

D'après le tableau 3, la modélisation numérique est la catégorie la plus utilisée, représentant 42 % des publications. Cette méthode joue un rôle clé dans plusieurs types d'évaluations, allant de l'étude de faisabilité initiale pour la mise en place d'une nouvelle SRG (Kolerski et collab., 2008), à l'analyse des structures existantes et des modifications visant à atténuer les embâcles de glace (Nolin et collab., 2017), jusqu'à la planification du démantèlement d'une SRG et l'évaluation de ses impacts sur la réduction des embâcles (Carr et collab., 2011).

Les expériences en laboratoire, avec 14 % des publications, sont généralement utilisées lorsqu'une nouvelle structure est envisagée (par exemple dans Lever et Gooch, 1999; 2001) ou lorsque la modélisation numérique seule ne permet pas de simuler adéquatement les interactions complexes entre la glace et la structure. Dans ce dernier cas, les expériences en laboratoire peuvent compléter l'analyse numérique, comme l'illustre l'étude de Tuthill et collab. (2008a).

Les revues de littérature et les études historiques et observations de terrain représentent chacune 22 % des publications. Les revues de littérature apparaissent généralement en réponse aux avancées en ingénierie des glaces, en fournissant un aperçu des dernières technologies offertes, comme en témoignent les travaux de Tuthill (1998) et Vuyovich et White (2008).

Les études historiques et les observations de terrain constituent des étapes essentielles pour évaluer l'efficacité d'une SRG dans l'atténuation des embâcles de glace. Les études historiques permettent d'évaluer la fréquence et la gravité des embâcles, des éléments souvent nécessaires aux études de faisabilité menant à la mise en place d'une mesure d'atténuation. Elles servent aussi à évaluer l'efficacité des SRG existantes en comparant la fréquence et la gravité des embâcles avant et après la construction de la structure (par exemple dans Lever et Gooch, 2005). De la même manière, les observations de terrain fournissent des informations précieuses sur les processus de formation et de déplacement de la glace sur les sites d'étude, permettant de définir les mécanismes dominants en jeu tels que la formation d'une couverture de glace stable ou les épisodes de transport de glace (Pourshahbaz et collab., 2024).

Les observations de terrain sont également incontournables au développement des modèles numériques (Axelson et collab., 1990). Elles servent de référence pour comparer les résultats des expériences en laboratoire et des simulations numériques, qui constituent des outils fondamentaux pour l'évaluation des SRG (Lever et Gooch, 1998; Turcotte et Morse, 2015).

La figure 17 montre le nombre d'études par catégorie au travers des années, jusqu'en décembre 2023. La première publication recensée est une revue réalisée par Stothart et Croteau (1965), qui portait sur certains aspects d'une SRG de Montréal. Par la suite, l'étude de Deck et Gooch (1981) s'est penchée sur les embâcles de glace à Oil City, en Pennsylvanie aux États-Unis.

En 1990, l'étude de la SRG de Cazenovia Creek, dans l'État de New York, est devenue la première publication à utiliser des expériences en laboratoire dans une étude préliminaire sur la construction d'une SRG (Gooch et Deck, 1990). Il est intéressant de noter que, bien que cette SRG soit une adaptation de celle de Hardwick, au Vermont, les études sur la SRG de Cazenovia Creek ont été publiées plus tôt que celles sur Hardwick (Gooch et Deck, 1990; Lever et collab., 1997).

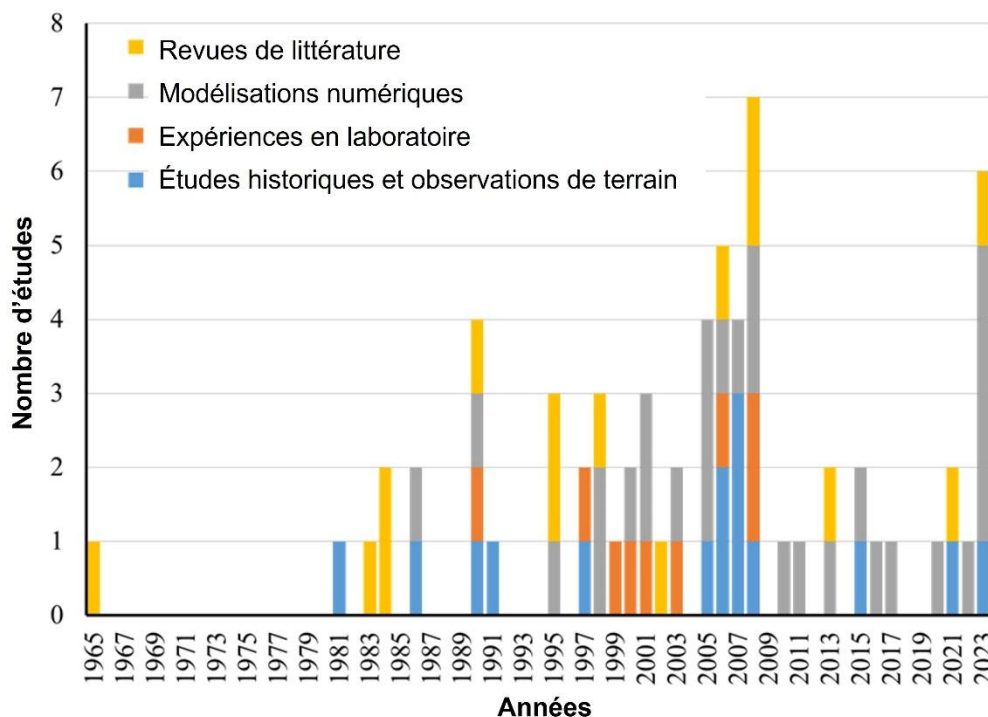


Figure 17. Nombre d'études par catégorie au travers des années, jusqu'en décembre 2023.

Entre 2005 et 2008, un total de 18 documents ont été publiés, abordant divers sujets tels que l'étude de faisabilité d'une SRG sur la rivière Grasse, à Massena, New York (États-Unis), impliquant des approches numériques et expérimentales (Tuthill et collab., 2005, 2008b; Kolerski et Shen, 2008). Cette période comprend également l'évaluation de SRG

existantes, notamment à Hardwick (Lever et Gooch, 2005) et à Lancaster, New Hampshire (États-Unis) (Vuyovich et White, 2006; Vuyovich et collab., 2006), la proposition d'un nouveau type de SRG basé sur des structures en filet d'acier (Morse et collab., 2006), ainsi que des études sur le démantèlement de barrages et ses effets sur les inondations par embâcles de glace (Vuyovich et White, 2008).

Après cette période, entre 2009 et 2023, l'intérêt pour le sujet a diminué, avec en moyenne une publication par an. Toutefois, en 2023, les avancées en modélisation numérique et un numéro spécial de la revue *Canadian Journal of Civil Engineering* consacré à l'interaction entre les infrastructures et la glace ont encouragé les chercheurs à contribuer davantage dans ce domaine (Burrell et Ghobrial, 2024).

5.1.3 Sites d'étude et types de SRG

L'analyse des publications a permis de retracer 22 sites à travers 44 études. Certains concernaient des SRG existantes (par exemple Lever et Daly, 2001), tandis que d'autres portaient sur des sites proposés pour la construction de nouvelles SRG (par exemple dans Zufelt, 2005a; 2005b). Il est à noter que certaines études traitaient de plusieurs sites simultanément (par exemple dans Pourshahbaz et collab., 2024).

La majorité des sites étudiés étaient situés en Amérique du Nord, avec 50 % aux États-Unis (11 sites) et 45 % au Canada (10 sites). Seul un site a été recensé en Europe (Finlande), qui propose l'utilisation de grands blocs rocheux pour la construction des structures (Verta et Pohjamo, 2015).

Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'intérêt plus limité des pays nordiques hors Amérique du Nord pour la construction de SRG en ligne tels que :

- un aménagement urbain moins développé à proximité des rivières sujettes aux inondations par embâcles de glace,
- un climat moins rigoureux,
- les caractéristiques morphologiques des rivières (largeur, profondeur, débit, etc.),
- des considérations politiques par exemple où certaines rivières traversent plusieurs pays,
- l'utilisation d'autres infrastructures, telles que des barrages hydroélectriques, qui peuvent indirectement contribuer à la gestion des inondations par embâcles,
- un manque de documentation sur les structures existantes.

Les SRG recensées dans la littérature ont été classées en cinq catégories (figure 18) soit les piles, les déversoirs ou barrages, les blocs inclinés, les déversoirs à piles et les structures en treillis d'acier.

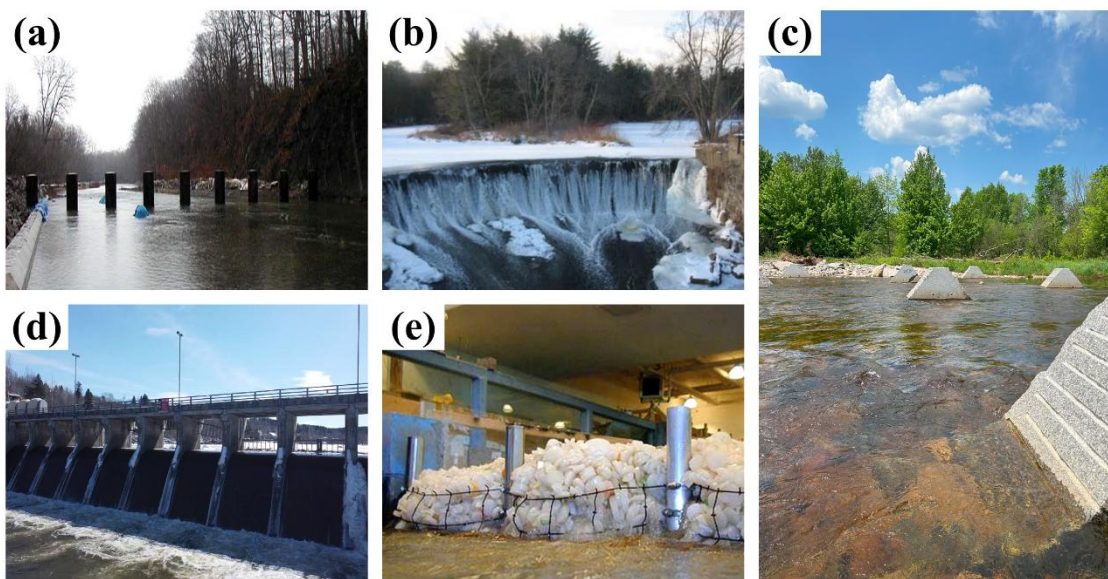


Figure 18: Classification des SRG : (a) piles (tiré de Tuthill et Lever, 2006); (b) déversoirs ou barrages (tiré de Vuyovich et White, 2007; (c) blocs inclinés; (d) déversoirs à piles et (e) treillis d'acier (tiré de Morse et collab., 2006).

La figure 19 présente le nombre d'études par type de SRG au travers des années, jusqu'en décembre 2023. Les piles (figure 18a) constituent le type de structure le plus représenté, avec 34 % des publications. Les piles cylindriques ont émergé comme une amélioration des SRG à blocs inclinés, installés à Hardwick, et ont fait l'objet de premières analyses expérimentales et numériques pour Cazenovia Creek en 1994 (Lever et collab., 2000).

Ce type de SRG a suscité un intérêt croissant auprès des chercheurs en raison de son coût réduit et de son faible impact environnemental (Lever et Daly, 2003). Des expériences en laboratoire ont montré que les performances des SRG de type piles sont comparables aux SRG traditionnels de type déversoir à piles et supérieures aux blocs inclinés, notamment pour la rétention d'une glace mince durant la débâcle. Cependant, son efficacité repose sur la présence d'une plaine inondable boisée, un élément difficile à trouver dans les zones développées.

Pour pallier cette contrainte, une nouvelle variante en L, intégrant un canal d'évacuation de crues, a été développée pour la rivière Grasse et évaluée par des approches expérimentales et numériques (Tuthill et collab., 2008b; Kolerski et Shen, 2024). Ce type de SRG, composé de piles cylindriques espacées uniformément, a également été utilisé comme modèle de base pour l'évaluation des modèles CFD par Pourshahbaz et collab. (2023, 2024) et Billy et collab. (2023).

Les premières études sur les SRG à piles ont commencé entre 1995 et 1999 et ont atteint un pic de 10 études entre 2000 et 2009 (figure 19). Ce nombre élevé de publications est directement lié aux recherches menées sur les SRG de Cazenovia Creek et de la rivière Grasse. Par la suite, l'intérêt pour ce type de structure a diminué avant de connaître un regain entre 2020 et 2023.

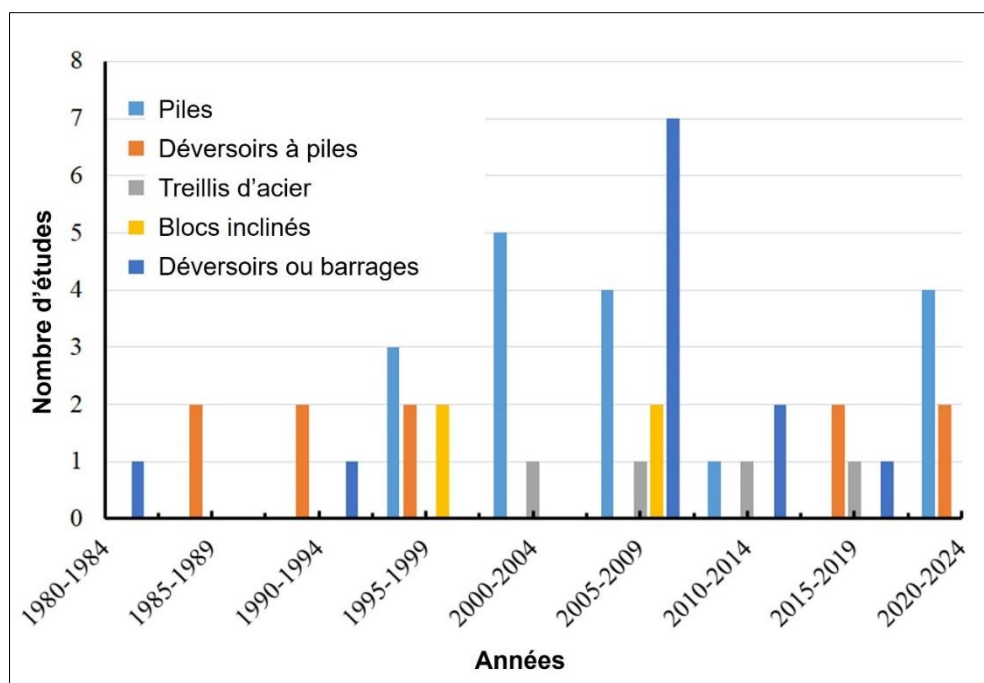


Figure 19. Nombre d'études par type de SRG au travers des années, jusqu'en décembre 2023.

Le deuxième type de SRG le plus représenté (30 % des publications) regroupe les déversoirs et les barrages (figure 18b) explicitement mentionnés dans la littérature à des fins de contrôle des glaces. Les études sur les déversoirs d'Oil City, en Pennsylvanie (États-Unis) (Carr et collab., 2010; 2017) et sur la rivière Israel à Lancaster, New Hampshire (États-Unis) (Axelson, 1991; Vuyovich et collab., 2006) sont particulièrement notables dans cette catégorie.

Au cours des dernières décennies, plus de 2,5 millions de barrages ont été construits aux États-Unis pour répondre à divers besoins, notamment la production d'électricité, l'approvisionnement en eau, le contrôle des crues et les loisirs (National Academies Press, 1992). Cependant, il est estimé que 85 % des grands barrages avaient atteint ou dépassé leur durée de vie prévue en 2020 (Vuyovich et White, 2007). L'inquiétude croissante concernant les impacts écologiques, économiques, récréatifs et de sécurité associée aux barrages a conduit à une réévaluation de leur utilité, incluant leur mise hors service et leur démantèlement (Heinz Center, 2002). Cependant, comme l'ont souligné White et Moore (2002) ainsi que Huang et Shen (2022; 2024), le démantèlement des barrages peut engendrer des effets considérables sur la formation, la croissance et la débâcle des glaces dans les rivières nordiques. L'évaluation de ce type de SRG a gagné en popularité entre 2005 et 2009, principalement en raison des études sur le retrait des barrages (figure 19).

La troisième catégorie la plus représentée concerne les déversoirs à piles (figure 18d), avec 22 % des publications. Ces SRG classiques sont constituées d'un déversoir qui réduit la vitesse d'écoulement et favorise la formation d'une couverture de glace stable lors de la période de gel, tout en étant soutenu par des piles. Au moment de la débâcle,

ces piles permettent de retenir les blocs de glace fragmentés en mouvement afin de former un embâcle en amont de la SRG (Calkins, 1984; Giovando et collab., 2023).

La conception de la SRG Sartigan sur la rivière Chaudière, à Saint-Georges en 1967, ainsi que celle de la SRG Saint-Raymond sur la rivière Sainte-Anne en 1975 au Québec a contribué à populariser ce type de structure et a servi de modèle pour la SRG de Cazenovia Creek (Tuthill, 1995; Lever et Gooch, 1999; Tuthill et Lever, 2006). Cependant, la formation de réservoirs en amont et les préoccupations environnementales qui en découlent peuvent rendre ces SRG coûteuses et moins acceptables sur le plan écologique (Lever et Gooch, 1999).

L'évaluation de ces SRG classiques est demeurée relativement stable au fil du temps. Cependant, entre 2000 et 2014, alors que l'intérêt s'est progressivement tourné vers les piles et les déversoirs ou barrages, ce type de SRG a bénéficié de moins d'attention et a donc fait l'objet d'un nombre réduit d'études (figure 19).

Enfin, les SRG à blocs inclinés (figure 18c) et à structures en treillis d'acier (figure 18e) contribuent chacune pour 8 % des publications. Les SRG à blocs inclinés, conçues à Hardwick, ont été développées pour offrir une solution abordable aux petites collectivités riveraines afin d'atténuer les embâcles en retenant la glace en amont tout en permettant l'écoulement de l'eau par les plaines inondables (Lever et Gooch, 2007).

Les structures en treillis d'acier visent à offrir une conception fiable de contrôle des glaces, capable de retenir les blocs de glace, quelle que soit leur taille et les propriétés de l'écoulement, sans dépendre des plaines inondables pour dévier le flux ni des déversoirs pour retenir l'eau ou moduler le débit. Deux variantes de cette technologie ont été proposées dans la littérature et testées en laboratoire, mais n'ont jamais été construites (Morse et collab., 2003, 2006). Il s'agit de (1) piles largement espacées et reliées par des treillis d'acier et de (2) bouées cylindriques flottantes en acier, fixées à des treillis d'acier verticaux (Morse et collab., 2006; Turcotte et Morse, 2013). L'évaluation des SRG en treillis d'acier a commencé avec l'étude de Morse et collab. (2003) puis entre 2003 et 2015, un total de quatre études a examiné ce type de structure.

5.2 Volet 2 : Collecte de données sur le terrain

5.2.1 Résultats 2021-2022

5.2.1.1 Formation du couvert de glace

Les caméras terrestres, les sondes de pressions, de températures et d'accélération installées aux cinq sites ont permis de recueillir de nombreuses données pendant l'hiver 2021-2022. Les instruments de terrain ont été déployés le 28 octobre 2021 et ont été récupérés après la débâcle entre le début du mois d'avril et la fin du mois de juin 2022. Cependant, comme les caméras installées sur le site Du-Berger ont été volées et que toutes les autres données reposent sur des comparaisons avec ces images, ce site n'a pas été inclus dans les résultats.

Pour des raisons inconnues, la plateforme submersible en amont de la SRG Allard a été perdue, mais toutes les caméras ont été récupérées avec succès pour tous les autres sites d'étude. Le tableau 4 indique le type de données collectées, en amont et en aval des cinq SRG.

Tableau 4. Types de données collectées aux cinq sites à l'hiver 2021-2022.

Sites	Du-Berger		Allard		Saint-Raymond		Du Moulin		Sartigan	
	Amont	Aval	Amont	Aval	Amont	Aval	Amont	Aval	Amont	Aval
Température de l'eau					✓		✓	✓	✓	
Élévation de l'eau				✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Condition de glace de surface			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Les résultats pour les sites Allard, Saint-Raymond, Du Moulin et Sartigan, sont représentés dans les séries chronologiques des figure 20, figure 22, figure 24 et figure 26 respectivement, montrant la température de l'air et de l'eau, les niveaux d'eau, le débit et l'état de la glace de surface en amont et en aval de la SRG. De plus, les observations recueillies pour chacun de ces sites à l'hiver 2021-2022 sont présentées ci-après.

Allard

Lors de la formation de la glace, certains débris (par exemple des billots de bois) ont été arrêtés en amont des ouvertures de la SRG et ont, de ce fait, été piégés dans la couverture de glace qui se formait en amont de la structure. Au cours de la dernière semaine de novembre 2021, la température de l'air a commencé à diminuer et est descendue à -13 °C le 29 novembre 2021 (figure 20a).

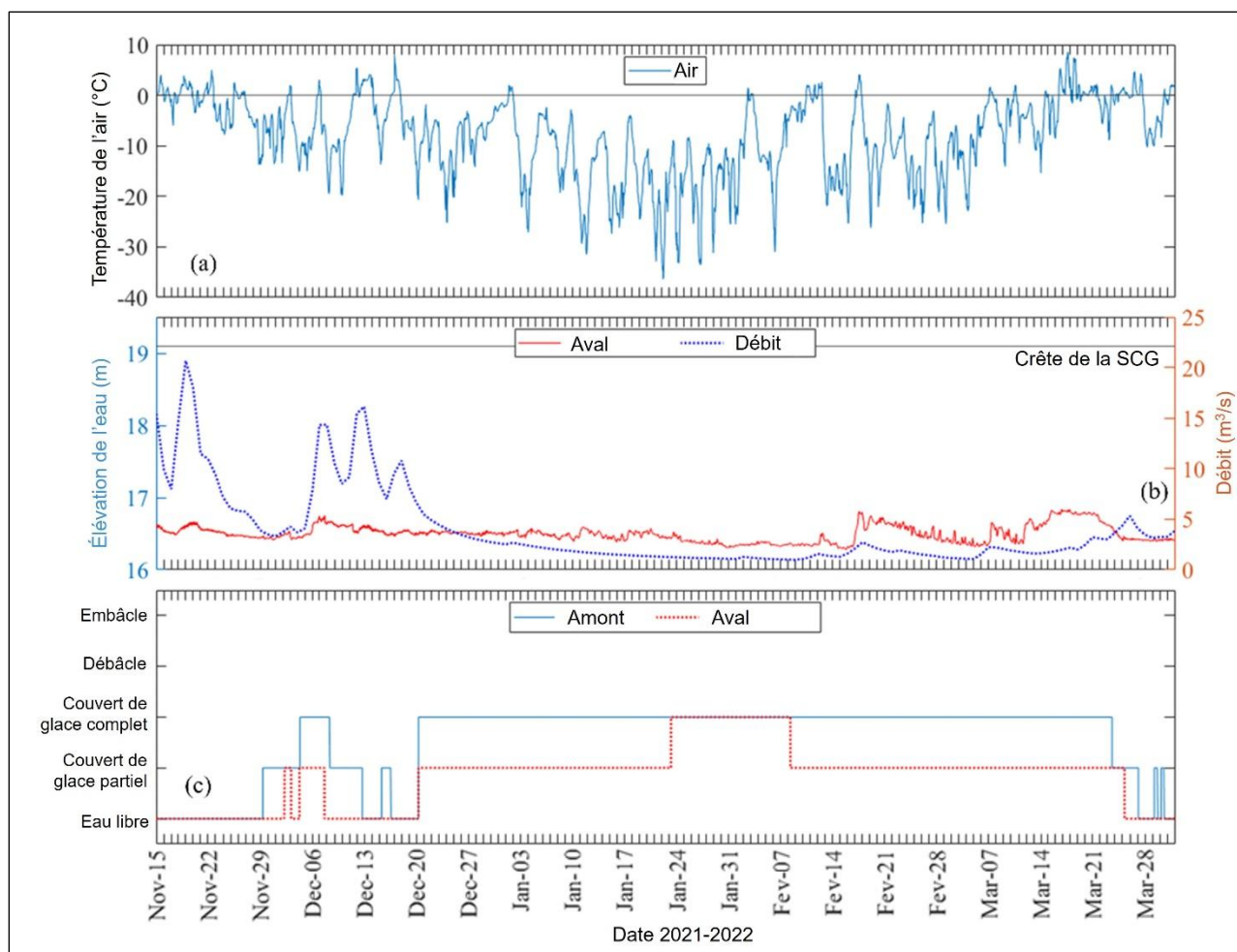


Figure 20. Résultat du site Allard (a) température de l'air (b) niveau d'eau et débit et (c) condition de glace à la surface, en amont et en aval.

En date du 29 novembre 2021, une couverture de glace partielle s'est formée en amont de la SRG, à un débit de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$. En aval de la SRG, de la glace s'est formée sur les berges (glace de rive) et du frasil a été observé dans la section de la rivière qui était encore en eau libre. En raison du faible débit, l'eau en amont de la SRG est demeurée très calme formant une couche de glace à faible hauteur d'eau. Aucune glace en crêpe n'a été observée pendant l'englacement. Une couverture de glace complète s'est stabilisée le 4 décembre 2021, comme le montre la figure 21a.

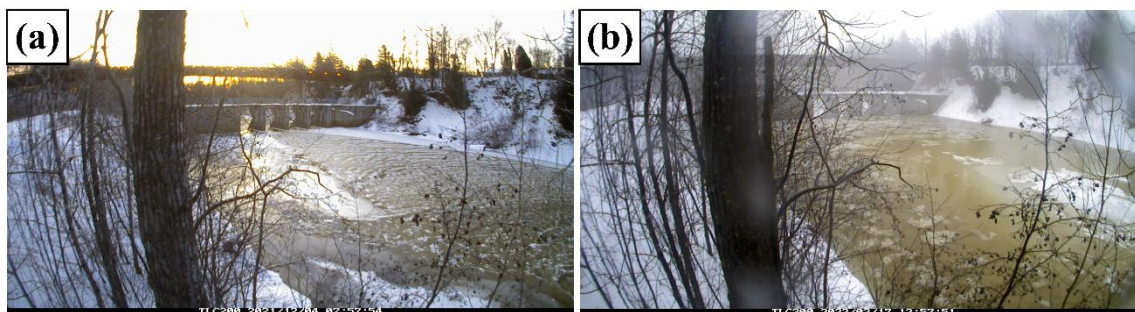


Figure 21. Vue amont (vers l'aval) de la SRG Allard (a) couvert de glace total le 4 décembre 2021 et (b) émergence du couvert de glace le 17 février 2022.

Entre le 4 et le 7 décembre 2021, le débit a augmenté rapidement passant de 3,68 m³/s à 14,32 m³/s. La couverture de glace initialement stabilisée à une faible hauteur d'eau aux pieds de la SRG a ainsi été submergée par l'augmentation du débit. L'eau située au-dessus de la couverture de glace initiale a ensuite gelé et a contribué à épaissir le couvert de glace. Ce phénomène est un processus semblable à la formation d'auefs, où la couche de glace est composée de plusieurs strates créées à partir de la congélation d'écoulements successifs d'eau.

Après quelques jours de températures de l'air positives et des pics de débits, la zone en amont de la SRG est retombée en eau libre le 12 décembre 2021. Le 20 décembre 2021, le débit a diminué à 6,6 m³/s alors que la température de l'air a chuté à -20°C pendant la nuit. Ceci a entraîné la formation d'une couverture de glace complète et stable en amont de la SRG jusqu'à la débâcle du 23 mars 2022.

À l'aval de la SRG, une couverture de glace complète s'est formée le 23 janvier 2022 et a fondu de manière thermique après deux semaines, soit le 8 février 2022. Le 17 février 2022, une pluie d'une moyenne de 1,15 mm en 24 heures est tombée, alors que la température de l'air a été positive pendant 14 heures, atteignant un pic de 4,1°C. Ceci a entraîné une augmentation du débit de 1,6 m³/s à 2,09 m³/s et une augmentation significative de la hauteur d'eau de 0,5 m (figure 20b).

Comme pour l'événement du 7 décembre 2021, l'augmentation rapide du débit le 17 février 2022 a entraîné la submersion de la couverture de glace stable en amont de la SRG (figure 21b). La température de l'air est ensuite descendue en dessous de 0°C (après 22h le 17 février 2022) et l'eau a gelé sur place, accroissant l'épaisseur de la couche de glace depuis la surface. Le même phénomène s'est reproduit lorsqu'un événement de précipitations totalisant 28,7 mm a été enregistré entre le 6 et le 7 mars 2022. Le débit a alors augmenté de 1,54 m³/s à 2,24 m³/s, et la température de l'air est passée de -6,7°C à 1,7°C. Ces événements ont entraîné, le 7 mars 2022, une augmentation de la hauteur d'eau en aval de 0,31 m. La couverture de glace a été submergée, puis l'eau a gelé, entraînant un épaississement du couvert de glace en raison de la température de l'air négative dans les dernières heures du 7 mars 2022.

La débâcle s'est produite le 27 mars 2022, après plusieurs jours consécutifs de température de l'air au-dessus de 0°C, avec un pic de 4,3°C. En amont, la glace de rive a rapidement fondu, et des chenaux se sont ouverts dans le cours d'eau. Sur une durée totale d'environ 3,5 jours, la majorité de la glace avait fondu sur place ou avait été emportée par les eaux avec un débit de 3,24 m³/s. Aucun embâcle n'a été observé en amont de la SRG Allard durant l'hiver 2021-2022.

Saint Raymond

À partir du 21 novembre 2021, les températures de l'eau et de l'air ont entamé leur descente. La température de l'eau a connu sa première surfusion le 23 novembre 2021 et la glace de rive a alors commencé à se former en amont et en aval de la SRG (figure 22).

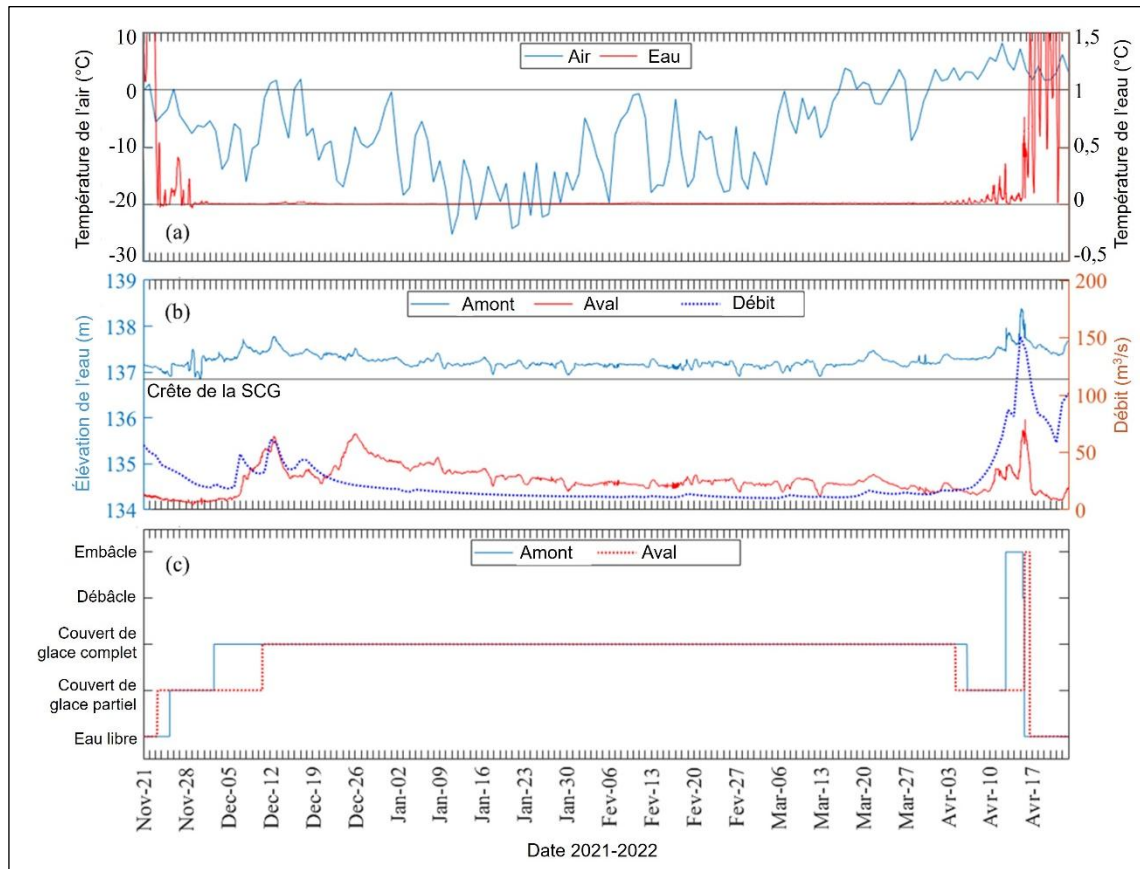


Figure 22. Résultat du site Saint-Raymond (a) température de l'air et de l'eau (b) niveau d'eau et débit et (c) condition de glace à la surface, en amont et en aval.

Entre le 24 et le 28 novembre 2021, la température moyenne de l'air est restée inférieure à 0°C avec une moyenne de -5°C. Par conséquent, l'eau a connu plusieurs événements de surfusion et du frasil a été observé en amont de la SRG. Ce site est en effet propice à la formation de frasil. Toutefois, la capacité du frasil à être transporté l'amène à se loger sous le couvert de glace à l'aval et à créer des barrages suspendus qui obstruent l'écoulement, dans ce cas-ci dans le centre-ville de Saint-Raymond (Vergeynst et collab. 2015, 2017).

Il a été observé qu'au cours de la saison 2021-2022, le frasil a contribué à la croissance de la glace de rive en amont et en aval de la SRG et encouragé la création de ponts de glace. Ce processus initial de formation de couvert de glace se produit lorsque la glace de rive envahit suffisamment le chenal pour arrêter le transport de glace de surface créée en amont (figure 22a). Le 2 décembre 2021, la surface d'eau libre en amont s'est, petit à petit, rétrécie et l'eau qui s'écoulait lentement a gelé sur place, formant une couverture de glace complète. Le 10 décembre 2021, en aval, un couvert de glace total s'est stabilisé alors que la dernière portion du chenal a gelé à environ 100 mètres en aval de la SRG. La couverture de glace est demeurée intacte tant que la température moyenne de l'air est restée inférieure à 0°C, et ce, jusqu'au début du mois d'avril 2022.

La débâcle a débuté le 1er avril 2022, avec des températures de l'air positives stables et une température de l'eau qui a commencé à fluctuer au-dessus de 0°C. Ainsi, entre le 3 et le 6 avril 2022, la couverture de glace a entamé sa fonte dans la section centrale et la rivière s'est partiellement ouverte en amont et en aval de la SRG. Ceci a entraîné une augmentation progressive de la température de l'eau, atteignant un pic de 0,356 °C le 12 avril 2022. À la suite d'une augmentation constante du débit, un train de glace descendant la rivière s'est immobilisé en amont de la SRG le 12 avril 2022. L'accumulation de glace s'est maintenue pendant 68,5 heures en amont de la SRG et s'est consolidée sur place (figure 23b).

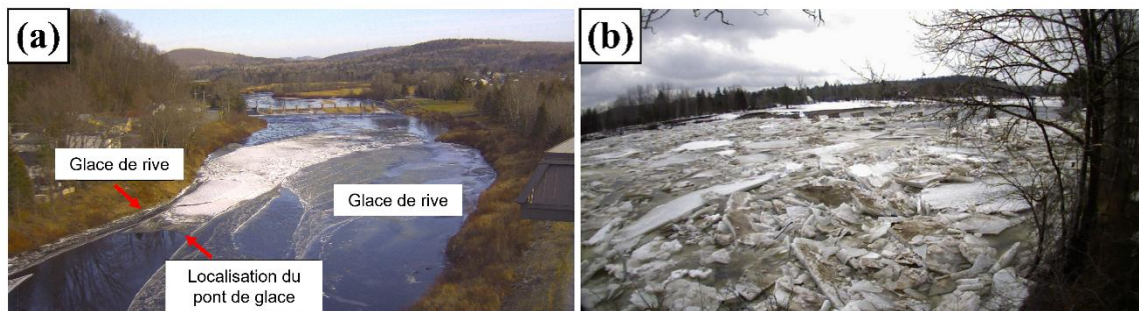


Figure 23. Vue amont (vers l'aval) de la SRG Saint-Raymond (a) croissance de la glace de rive et création d'un pont de glace le 25 novembre 2021 et (b) embâcle de glace le 15 avril 2022.

Le 14 avril 2022, un événement pluvieux de 13,8 mm s'est produit, permettant à l'embâcle en amont de la SRG Saint-Raymond de se libérer le 15 avril 2022. Il a fallu environ 4 heures pour que l'embâcle se dégage en entier de la SRG. Les morceaux de glace libérés se sont ensuite accumulés contre la couverture de glace partielle en aval de la SRG le 15 avril 2022 à 15h, créant un autre embâcle en aval. Cet embâcle s'est libéré le lendemain, soit le 16 avril 2022 à 13 h.

Du Moulin

Au début du mois de décembre 2021, la température de l'air a descendu en dessous de 0°C au site Du Moulin et la glace de rive a commencé à former un couvert de glace partiel le 5 décembre 2021 le long d'une petite île près de la rive droite en amont de la SRG (figure 24).

Cette île entraîne une réduction de la vitesse de l'eau entre l'île elle-même et la rive droite, où la plateforme submersible en amont a été déployée. Une couverture de glace s'est ainsi formée à cet endroit quelques jours avant que le premier événement de surfusion de l'eau ne soit enregistré en amont de la SRG le 7 décembre 2021.

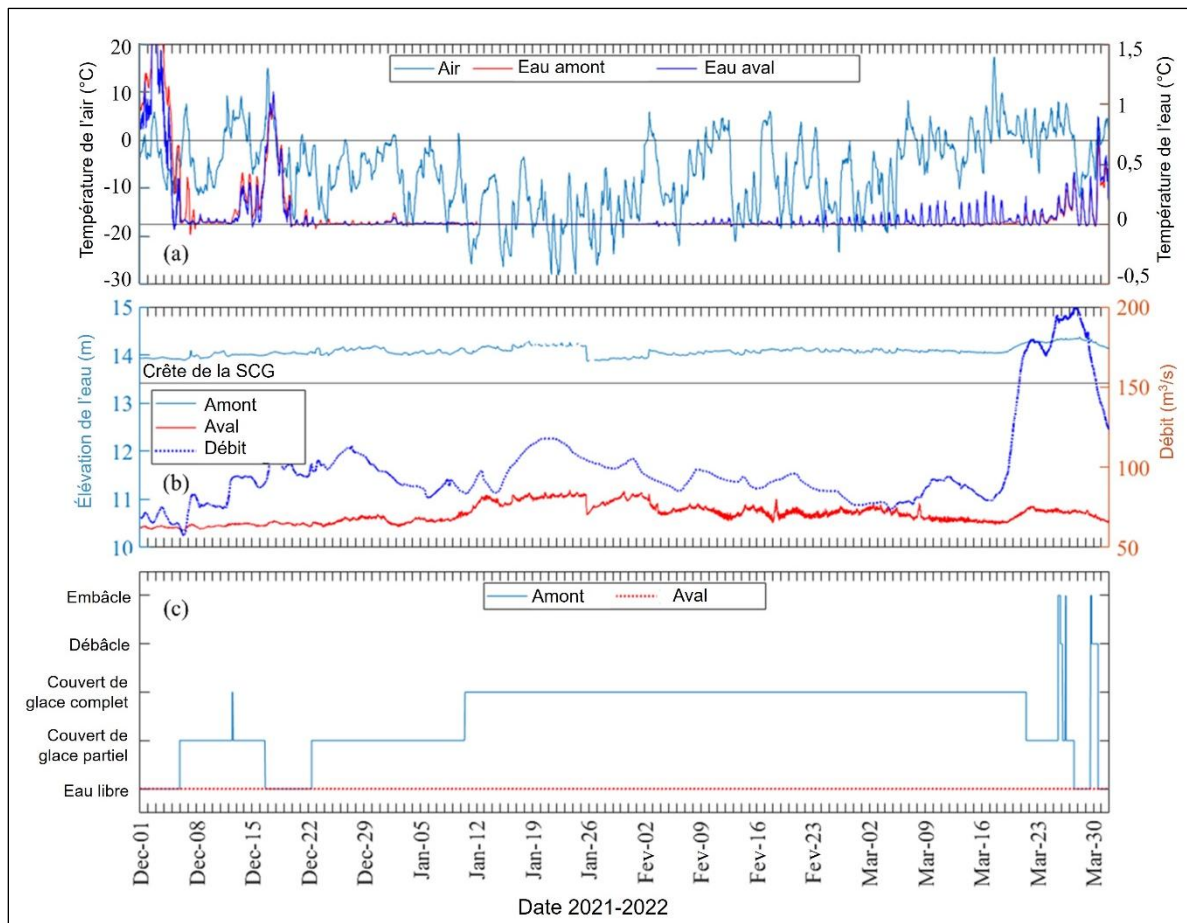


Figure 24. Résultats du site Du Moulin (a) température de l'air et de l'eau (b) niveau d'eau et débit et (c) condition de glace à la surface, en amont et en aval. Le débit

traversant la SRG est estimé à 33 % du débit de la station des Mille-Îles située en amont (043201).

Entre le 7 et le 12 décembre 2021, en présence d'une température de l'air de -10°C en moyenne, du frasil traversant le site a été observé (figure 25a). Au cours de cette période, la glace de rive en amont de la SRG s'est épaissie, ce qui a réduit la capacité de transport de la glace dans la rivière, engendré l'accumulation du frasil sur les piles de la SRG et finalement formé une couverture de glace complète, mais temporaire, le 12 décembre 2021. Entre le 12 et le 22 décembre 2021, la température de l'air est restée positive et a atteint un pic de 15°C le 16 décembre 2021. La température de l'eau a quant à elle atteint un pic de $1,05^{\circ}\text{C}$ le 17 décembre 2021. Cette vague de chaleur a entraîné la fonte complète de la couverture de glace en amont de la SRG le 17 décembre 2021. Par la suite, la température de l'air a diminué progressivement pour atteindre un minimum de -15°C le 22 décembre 2021.

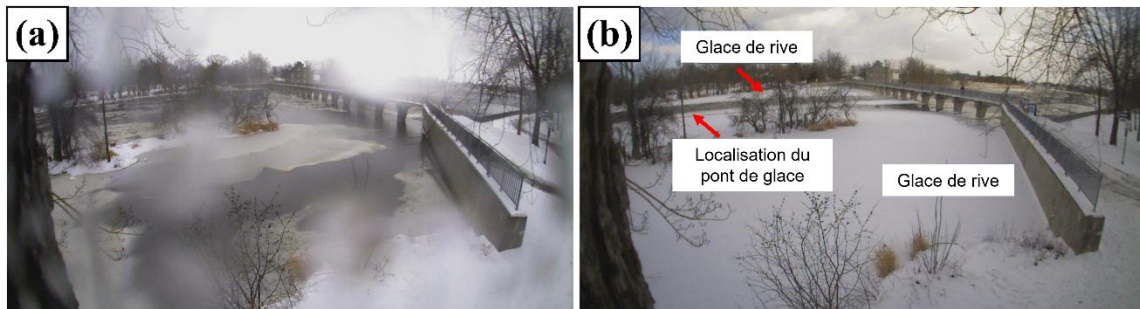


Figure 25. Vue amont de la SRG Du Moulin (courant de gauche à droite) (a) mouvement de frasil le 10 décembre 2021 (b) glace de rives et pont de glace le 10 janvier 2022.

De multiples événements de surfusion de l'eau ont pu alors être enregistrés, de la glace de rives s'est formée le long des berges et des mouvements de frasil ont été observés près de la SRG. Le 10 janvier 2022, la capacité de mouvement du frasil dans la rivière a diminué jusqu'à ce qu'il se stabilise aux piles de la SRG formant alors une couverture de glace complète (figure 25b). La couverture de glace est restée stable jusqu'à la troisième semaine du mois de mars 2022 alors que la température de l'air est demeurée majoritairement négative. En aval de la SRG, la rivière est restée ouverte durant toute la saison en raison de la forte pente de la rivière. Par conséquent, la température de l'eau en aval a fluctué davantage qu'en amont, en réponse aux changements de la température de l'air (figure 24).

La débâcle a commencé le 17 mars 2022 à 13h30 avec un pic de température de l'air de 17°C . Des chenaux dans la glace se sont ouverts au milieu de la rivière. Le 21 mars 2022, seule une couverture de glace partielle subsistait entre la rive droite et la petite île en amont de la SRG. Les jours suivants, trois accumulations de glace ont été observées en amont de la SRG les 25, 26 et 29 mars 2022 (figure 24). Ces embâcles sont demeurés en amont de la SRG entre 1,5 et 5,5 heures et ont ensuite été libérés en raison d'un affaiblissement thermique ou d'un délogement mécanique dû à l'augmentation du débit (de $80\text{ m}^3/\text{s}$ le 16 mars 2022 à $200\text{ m}^3/\text{s}$ le 27 mars 2022). La température de l'eau a quant à elle fluctué au-dessus de 0°C .

Sartigan

La température de l'air est descendue progressivement en dessous de 0°C à partir de la nuit du 15 novembre 2021 et de la glace de rive a commencé à se former à partir du 21 novembre 2021. Le couvert de glace s'est formé complètement le 24 novembre 2021 à un débit enregistré de 17,4 m³/s. Bien que la caméra ait cessé de fonctionner du 4 décembre 2021 au 24 février 2022, les visites régulières sur le terrain et l'imagerie satellite ont confirmé qu'une couverture de glace complète et stable est restée en amont de la SRG jusqu'au 27 mars 2022.

Il est important de noter que depuis le début de la période d'observation jusqu'à la première semaine de décembre, les opérateurs du barrage ont occasionnellement ouvert les vannes pour des travaux de maintenance. Ceci explique que les niveaux d'eau en amont de la SRG sont demeurés occasionnellement en dessous de l'élévation de la crête du barrage et que la plateforme submersible en amont ait été fréquemment hors de l'eau. Par conséquent, la température de l'eau enregistrée pendant cette période n'est pas représentative des conditions réelles sur le terrain (figure 26).

En aval de la SRG, une couverture de glace partielle s'est formée à plusieurs reprises entre le 27 novembre 2021 et le 12 décembre 2021 en réponse à une température de l'air plus froide, et s'est ensuite libérée à la suite de l'augmentation du débit. Un couvert de glace complet et stable a ensuite été observé du 27 décembre 2021 au 18 février 2022, date à laquelle les vannes ont été ouvertes et que le débit est passé d'un minimum hivernal de 6,8 m³/s à un maximum de 103,5 m³/s, induisant la rupture du couvert de glace. Une couverture de glace temporaire s'est ensuite formée brièvement (pendant 12 heures) le 1er mars 2022 à la suite de températures de l'air plus froides (figure 26).

La débâcle s'est produite entre le 16 et le 20 mars 2022. La température de l'air a monté progressivement au-dessus de 0°C pour atteindre un pic de 16,6°C le 17 mars 2022. Au cours de cette période, le couvert de glace s'est déplacé verticalement, avec une fluctuation de plus de 2 m, en réponse à la variation du débit (entre 58,5 m³/s et 259 m³/s). Ceci a entraîné la formation d'une fissure dans la glace et le détachement de la glace de rive, comme la montre la figure 27a.

Du 27 mars 2022 au 2 avril 2022, la glace de rive et la couverture de glace près des piles de la SRG ont fondu, et par conséquent le couvert de glace en amont de la SRG s'est déplacé librement. Pendant cette période, la température de l'eau a atteint 0,035°C et le débit est passé de 79,5 m³/s à 182,4 m³/s. Ceci a entraîné la fracture de la glace, en plus petits morceaux, en raison de son affaiblissement thermique et mécanique. Du 2 au 9 avril 2022, plusieurs trains de glace ont été observés s'accumulant momentanément en amont de la SRG sans aucun temps d'arrêt important. La figure 27b montre un embâcle temporaire en amont de la SRG le 4 avril 2022.

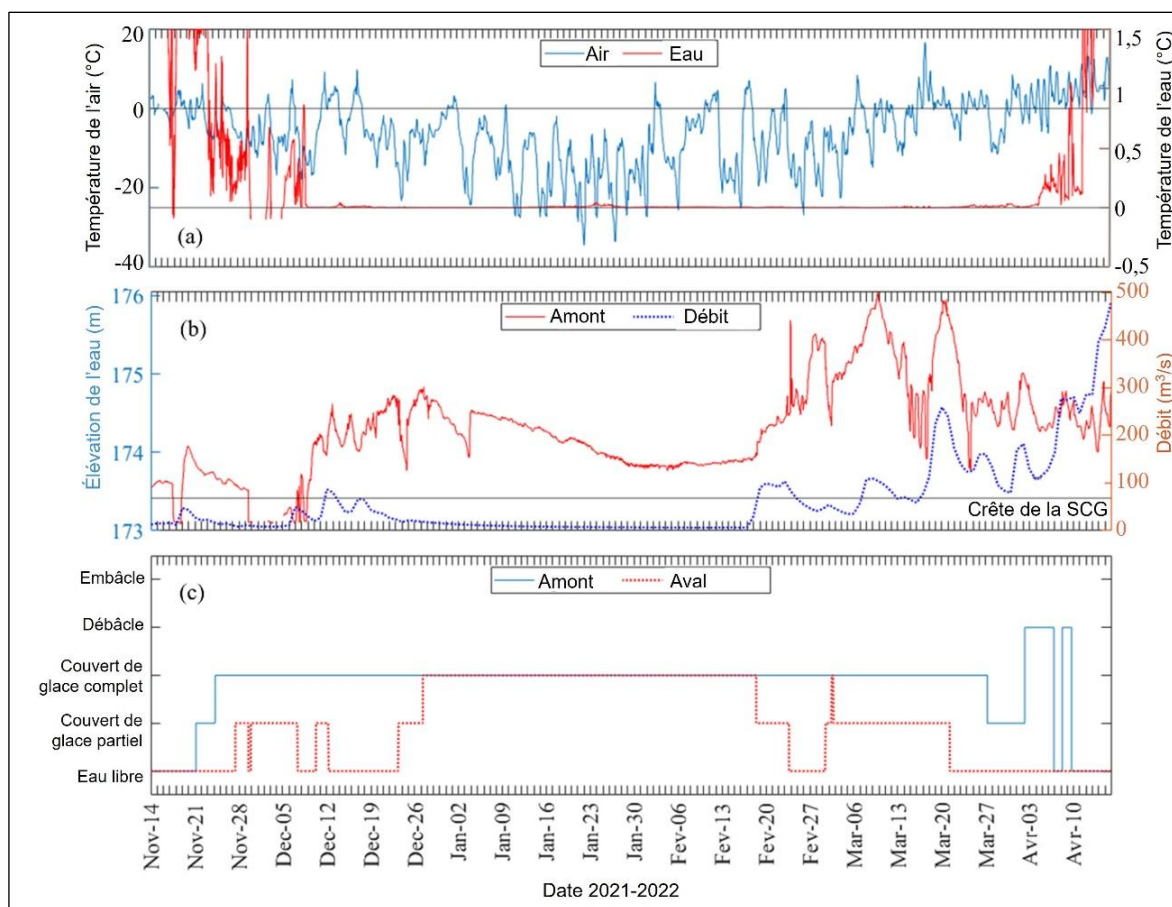


Figure 26. Résultats du site Sartigan (a) température de l'eau et de l'air (b) niveau d'eau et débit et (c) condition de glace à la surface, en amont et en aval.

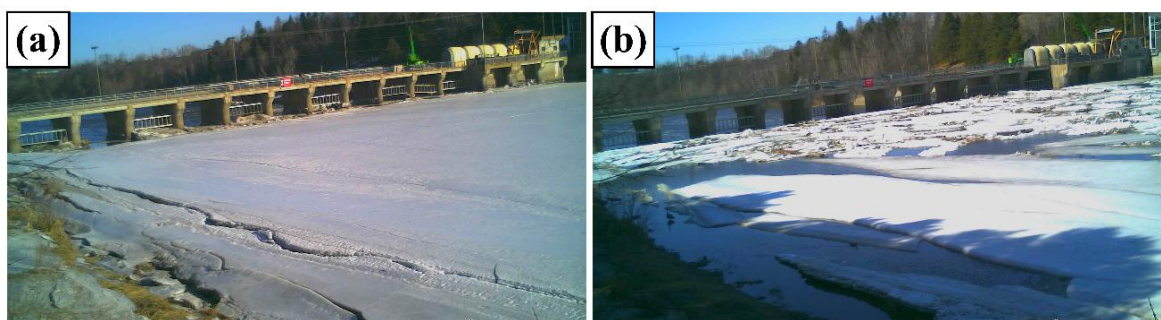


Figure 27. Vue amont (vers l'aval) de la SRG Sartigan (a) apparition des crevasses et détachement du couvert de glace des piles le 23 mars 2022 (b) passage d'un train de glace le 4 mars 2022.

5.2.1.2 Discussion sur les résultats 2021-2022

Cette section présente une discussion approfondie des événements d'embâcles qui se sont formés en amont des SRG pendant la débâcle. L'objectif est de mieux comprendre le rôle des déclencheurs mécaniques et/ou thermiques sur la libération des embâcles.

Caractéristiques des embâcles observés

Le tableau 5 résume les caractéristiques des embâcles observées en amont de chaque SRG pendant l'hiver 2021-2022. Les SRG Allard et Sartigan ne sont pas présentées dans ce tableau en raison de l'absence d'accumulation de glace retenue en amont de leur structure.

Tableau 5. Caractéristiques des embâcles des SRG à l'étude à l'hiver 2021-2022

Caractéristiques		Sites			
		Du Moulin			Saint-Raymond
Événement		1	2	3	1
Température de l'air (°C)		2,7	7,4	-1	7,2
Météo		Nuageux	Nuageux	Nuageux	Ensoleillé
Formation de l'embâcle	Date (AAAA-MM-JJ)	2022-03-25	2022-03-26	2022-03-29	2022-04-12
	Heure	15h30	16h	16h	15h
	Température de l'eau (°C)	0,183	0,144	0,308	0,250
	Profondeur de l'eau (m)	0,81	0,77	0,71	1,27
	Débit (m³/s)	193,7*	196*	170,4*	64,17
	Nombre de Froud (Fr)	0,68	0,74	0,73	0,14
Libération de l'embâcle	Date (AAAA-MM-JJ)	2022-03-25	2022-03-26	2022-03-29	2022-04-15
	Heure	21h	14h30	19h	11h30
	Température de l'eau (°C)	0,098	0,217	0,900	0,210
	Profondeur de l'eau (m)	0,77	0,78	0,78	1,98
	Débit (m³/s)	193,7*	195,3*	170,4*	150,8
	Nombre de Froud (Fr)	0,73	0,72	0,63	0,17
Rapport entre la libération et la formation (Fr)		1,1	1,0	0,9	1,2
Temps de maintien (h)		5,5	1,5	3,0	68,5
Durée de libération de l'embâcle (h)		6,0	0,5	19,5	4,0
Déclencheur de libération		Mécanique	Thermique	Thermique	Mécanique

*Les débits traversant la SRG sont estimés à 33 % du débit de la station des Mille-Îles située en amont (043201).

Différents paramètres ont été extraits pour chaque événement d'embâcle, notamment les conditions météorologiques, les paramètres de formation et de libération de l'embâcle (profondeur d'eau, débit, température de l'eau et nombre de Froud), le temps de maintien (durée de la présence de l'embâcle en amont de l'ouvrage) et la durée de libération.

L'équation (7) a été utilisée pour calculer le nombre de Froude (Fr).

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gd}} \quad (7)$$

où u est la vitesse d'écoulement moyenne locale, g est la gravité et d est la hauteur d'eau mesurée en amont de la SRG. La vitesse moyenne locale u a été estimée à l'aide de l'équation (8) comme suit :

$$u = \frac{Q}{W \times d} \quad (8)$$

où Q est le débit rapporté et W est la largeur du déversoir.

Formation d'embâcles et déclencheurs de libération

a. Saint-Raymond

L'embâcle s'est formé en amont de la SRG Saint-Raymond le 12 avril 2022 à 15h, avec une hauteur d'eau initiale de 1,27 m qui a monté à 1,73 m à 16h15, avant de redescendre à 1,5 m à 16h30. La hauteur d'eau a continué de diminuer progressivement avant d'atteindre 1,37 m le 14 avril 2022 à 17h15. Le 14 avril à 19h, à la suite d'une pluie totale de 13,8 mm et à l'arrivée de trains de glace supplémentaires, la hauteur d'eau a subitement augmenté à 1,6 m, puis à 23h45 à 2,01 m. Le 15 avril 2022 à minuit, la hauteur d'eau a atteint 2,13 m et l'embâcle s'est consolidé avant d'être finalement libéré à 11h45. Immédiatement après la libération, la profondeur de l'eau s'est rétablie à 1,6 m à 14h15. Le rapport entre la libération et la formation Fr était de 1,2 et la durée de maintien de l'embâcle a été estimée à 68,5 heures. La température de l'eau était d'environ 0,25°C le 12 avril 2022 à 15h avant la formation de l'embâcle. Une fois l'embâcle formé, la température de l'eau a diminué à 0,07°C le 13 avril 2022 et a fluctué autour de ce niveau jusqu'au 15 avril 2022. Cette même journée, de 7h30 à 12h30 (5 heures), la température de l'eau a augmenté constamment avant d'atteindre 0,21°C au moment de la libération de l'embâcle. La température de l'air a elle aussi augmenté entre le 14 et le 15 avril 2022, passant de 3,4°C à 7,15°C.

D'après les observations ci-dessus, l'embâcle s'est libéré en amont de la SRG lorsque le niveau d'eau a augmenté de 50 % et que le Fr a augmenté de 20 % par rapport au début de l'embâcle. Ceci implique que le débit a dû devenir très grand afin de libérer cet embâcle. La faible différence entre la température de l'eau au début et à la fin de l'embâcle (0,04 °C) n'a pas semblé affaiblir l'accumulation de glace ou déclencher la libération. Par conséquent, il est conclu que la libération de l'embâcle sur ce site s'est produite de façon mécanique.

b. Du Moulin

Trois embâcles se sont formés en amont de la SRG Du Moulin pendant la saison de la débâcle. Le premier embâcle s'est formé le 25 mars 2022 et a duré près de 5,5 heures. L'arrivée de la glace s'est produite en réponse à une augmentation importante du débit, passant de 83 m³/s à près de 200 m³/s. Au cours de cet événement, les blocs de glace se sont accumulés en amont de la SRG à partir de 15h30 et se sont consolidés durant 1,5 heure. Ils sont restés intacts durant 4 heures (soit de 17h à 21h), puis ont commencé à se libérer au cours des 6 heures suivantes (soit entre 21h le 25 mars et 3h le 26 mars 2022). Lors de la formation de l'embâcle, la profondeur de l'eau était d'environ 0,81 m, puis a diminué à 0,77 m lors de la libération. Le rapport entre la libération et la formation Fr était de 1,1 durant cet événement. La température de l'eau a quant à elle diminué de 0,085°C, soit de 0,183°C à 0,098°C entre la formation et la libération de l'embâcle. Ces observations suggèrent un dégagement mécanique de l'embâcle en raison de la résistance élevée du flux.

Le deuxième embâcle s'est produit le 26 mars 2022, a été retenu par la SRG pendant 1,5 heure et libéré en 30 minutes. La température de l'eau est passée de 0,144°C pendant la formation à 0,217°C pendant la débâcle. Les morceaux de glace ne se sont pas consolidés, car la température de l'air était d'environ 7,4°C. La profondeur d'eau et le débit sont demeurés pratiquement inchangés entre la formation et la libération de l'embâcle (rapport Fr de 1), ce qui suggère que la libération a été déclenchée par un effet thermique des températures plus élevées de l'eau et de l'air.

Enfin, le troisième embâcle a eu lieu le 29 mars 2022. Il a été retenu par la SRG durant 3 heures, mais il a fallu 19,5 heures pour le libérer complètement. La raison est que la température de l'air a diminué en dessous de 0°C (atteignant un pic de -12°C) du 27 mars 2022 à 16h30 au 30 mars 2022 à 10h30. Par conséquent, les morceaux de l'embâcle se sont consolidés, mais ceci n'a pas été suffisant pour qu'ils soient maintenus en amont de la SRG. Au début de l'embâcle, la température de l'eau était de 0,308 °C et a diminué à 0°C avant d'augmenter à nouveau à 0,9°C, peu de temps avant le dégagement de l'embâcle. La profondeur de l'eau a légèrement augmenté, passant de 0,71 m à 0,78 m, tandis que le rapport Fr était de 0,9. Comme le nombre de Froude a diminué entre la formation et la libération, et que la température de l'eau a augmenté pendant la libération, il semblerait que la libération soit due à un affaiblissement thermique de la glace.

Temps de maintien des embâcles

Le temps de maintien de l'accumulation de glace est un paramètre clé dans l'évaluation de la performance d'une SRG. Un temps de rétention plus long permettrait à la glace en aval de perdre sa force et/ou de se libérer avant l'arrivée des coulées de glace en amont. Lever et Gooch (2007) ont montré que le temps de maintien d'une accumulation de glace dépend du débit, des espaces entre les piles, de l'épaisseur des floes, de la force de la glace et du taux de variation du niveau d'eau (amplitude des vagues).

Dans la présente étude, le temps de maintien a varié de quelques heures (1,5 heure à 5,5 heures) à la SRG Du Moulin, à plusieurs jours (68,5 heures) à la SRG Saint-Raymond. À la SRG Du Moulin, le temps de maintien lors d'une libération déclenchée par un affaiblissement mécanique (5,5 heures) a été deux fois plus important que le temps de

maintien lors d'une libération déclenchée par un affaiblissement thermique (2,3 heures en moyenne). Ceci montre que l'apport de chaleur, dû à une eau plus chaude et aux températures plus élevées, affaiblit considérablement la glace et déclenche une libération plus rapide des embâcles. Dans des conditions plus froides, la traînée du flux doit dépasser la résistance de l'accumulation afin de déclencher la libération, ce qui pourrait augmenter le temps de maintien. Ceci est également vrai pour la libération mécanique de l'accumulation en amont de la SRG Saint-Raymond qui a été maintenue en place pendant 68,5 heures. Ces observations soulignent le rôle de la résistance de la glace sur le temps de maintien.

Par ailleurs, bien que l'écart entre les piles soit généralement associé à une variation du temps de maintien, la SRG affichant le temps de maintien le plus long, soit 68,5 heures au site Saint-Raymond, correspond paradoxalement au site présentant la plus grande distance entre les piles (7,6 m en comparaison à 6 m au site Du Moulin). En ce sens, le temps de retenue observé à Sartigan était pratiquement nul alors que l'espacement de ses piles est presque identique au site Du Moulin. Ceci démontre que la performance de la SRG devrait être évaluée dans un contexte plus large, incluant les séquences de débâcle dans les tronçons en amont, mais aussi les facteurs morphologiques affectant les caractéristiques de la glace.

Davantage de résultats de la campagne de terrain 2021–2022 sont discutés dans Pourshahbaz et collab. (2023b). Les lecteurs intéressés sont invités à s'y référer pour plus de détails

5.2.2 Résultats 2022-2023

Cette partie de l'étude se concentre sur la SRG Sartigan durant la campagne de terrain 2022–2023. Des données ont également été recueillies sur la SRG Saint-Raymond, mais elles ne sont pas présentées ici, car elles constituent un ensemble de données complémentaires, offrant une solution de rechange en cas de lacunes dans les relevés effectués à Sartigan.

5.2.2.1 Synthèse des événements de mobilisation de la glace

L'analyse des séquences d'images combinées et reconstituées a permis de recenser un total de 18 événements de mobilisation de la glace lors de la débâcle de 2023 (tableau 6). Parmi ces 18 événements, 11 correspondaient à des événements de type ATR, avec un temps de rétention moyen de 87 minutes. Le temps de rétention moyen par jour pour l'ensemble des événements de mobilisation correspondait à 168 minutes, 44,4 minutes et 69 minutes pour les 11, 12 et 13 avril, respectivement. L'événement ATR avec le temps de rétention le plus long, soit 344 minutes, s'est produit le premier jour de la débâcle, le 11 avril, tandis que le plus court, soit 3,25 minutes, a eu lieu le lendemain, le 12 avril. La rétention a donc été plus efficace au début de la débâcle, au moment où la couverture de glace était encore uniforme et moins fragmentée.

Les sept événements de type STR ont eu une durée moyenne de 55,7 minutes, durant lesquels les blocs de glace se sont déplacés librement à travers la structure. L'événement le plus long, à la fin de la débâcle le 13 avril, a duré 312 minutes, en raison de l'évacuation

des glaces résiduelles s'écoulant librement depuis l'amont en eau libre. L'événement le plus court a duré seulement 0,32 minute le 12 avril. Les durées moyennes des événements STR pour les 11, 12 et 13 avril ont été respectivement de 9,3 minutes, 16,7 minutes et 5,2 heures.

Tableau 6. Événements de mobilisation de la glace détectés lors de la débâcle.

Date	N°	Nom	Heure de début	Heure de fin	Durée totale (minutes)	Temps de rétention (minutes)
11-avr-23	1	ATR1	6 h 00 min 03 s	11 h 44 min 19 s	344	344
	2	STR1	12 h 31 min 39 s	12 h 39 min 19 s	8	0
	3	STR2	12 h 48 min 29 s	12 h 57 min 04 s	9	0
	4	ATR2	12 h 57 min 34 s	13 h 25 min 09 s	28	19
	5	ATR3	13 h 27 min 04 s	15 h 47 min 29 s	140	140
	6	STR3	16 h 10 min 49 s	16 h 22 min 29 s	12	0
12-avr-23	7	STR4	9 h 53 min 45 s	9 h 54 min 04 s	0,32	0
	8	ATR4	11 h 59 min 49 s	12 h 04 min 39 s	5	3
	9	ATR5	12 h 05 min 04 s	12 h 48 min 59 s	44	39
	10	ATR6	12 h 49 min 04 s	15 h 02 min 49 s	134	133
	11	ATR7	15 h 34 min 34 s	15 h 43 min 44 s	9	5
	12	STR5	16 h 44 min 44 s	17 h 14 min 39 s	30	0
	13	STR6	17 h 16 min 09 s	17 h 36 min 04 s	20	0
13-avr-23	14	ATR8	6 h 00 min 03 s	6 h 52 min 29 s	52	50
	15	STR7	6 h 52 min 34 s	12 h 04 min 34 s	312	0
	16	ATR9	12 h 04 min 39 s	13 h 17 min 34 s	73	54
	17	ATR10	13 h 58 min 36 s	17 h 11 min 24 s	193	153
	18	ATR11	17 h 40 min 26 s	17 h 59 min 06 s	19	19

5.2.2.2 Concentration de la glace

L'évolution de la concentration de la glace sur le plan d'eau surveillé pendant la débâcle entre 6 h et 18 h est présentée à la figure 28a. Cette évolution se caractérise par des fluctuations continues, résultant de la libération successive de blocs de glace. Le 11 avril et le 13 avril ont montré un patron similaire où la concentration de la glace était particulièrement élevée en début de journée, soit près de 80 %, alors qu'elle était proche de 0 % en fin de journée. En revanche, le 12 avril, la concentration de la glace est demeurée élevée toute la journée, sans descendre en dessous de 55 %.

Le 11 avril, la concentration de la glace a chuté à près de 0 % à 18 h, car elle était principalement composée de la « première glace », c'est-à-dire la glace située près du déversoir de la SRG et de la rive gauche (rive naturelle, où la glace était plus mince). La glace à proximité du déversoir a été fragilisée par les variations dynamiques du niveau d'eau, causées par l'obstruction des ouvertures, ainsi que par l'érosion due aux vitesses élevées induites par l'effet du déversoir. Par conséquent, cette première partie de la couverture de glace, située à proximité de la SRG, s'est détachée facilement à la fin du

premier jour de débâcle, laissant la surface de l'eau surveillée totalement libre de glace. La partie arrière de la couverture de glace, située hors du champ de vision du SCJ, est cependant demeurée en place.

Le 13 avril 2023 a marqué le dernier jour de la débâcle, avec la disparition de la « dernière glace », soit l'évacuation des blocs de glace résiduels. Cela explique la chute de la concentration de glace à 0 % à la fin de cette journée, à 18 h.

La figure 28b présente la distribution de la concentration de la glace et montre que les valeurs faibles et élevées de concentration ont été presque équitablement réparties le premier jour de la débâcle, le 11 avril. Les 12 et 13 avril, la distribution est asymétrique, avec des pics de concentration compris entre 80 % et 85 %. Cependant, cette asymétrie est plus marquée le 12 avril, où aucune valeur faible (entre 1 % et 50 %) n'a été enregistrée. En moyenne, la majorité des valeurs de concentration de la glace se situe entre 55 % et 95 %.

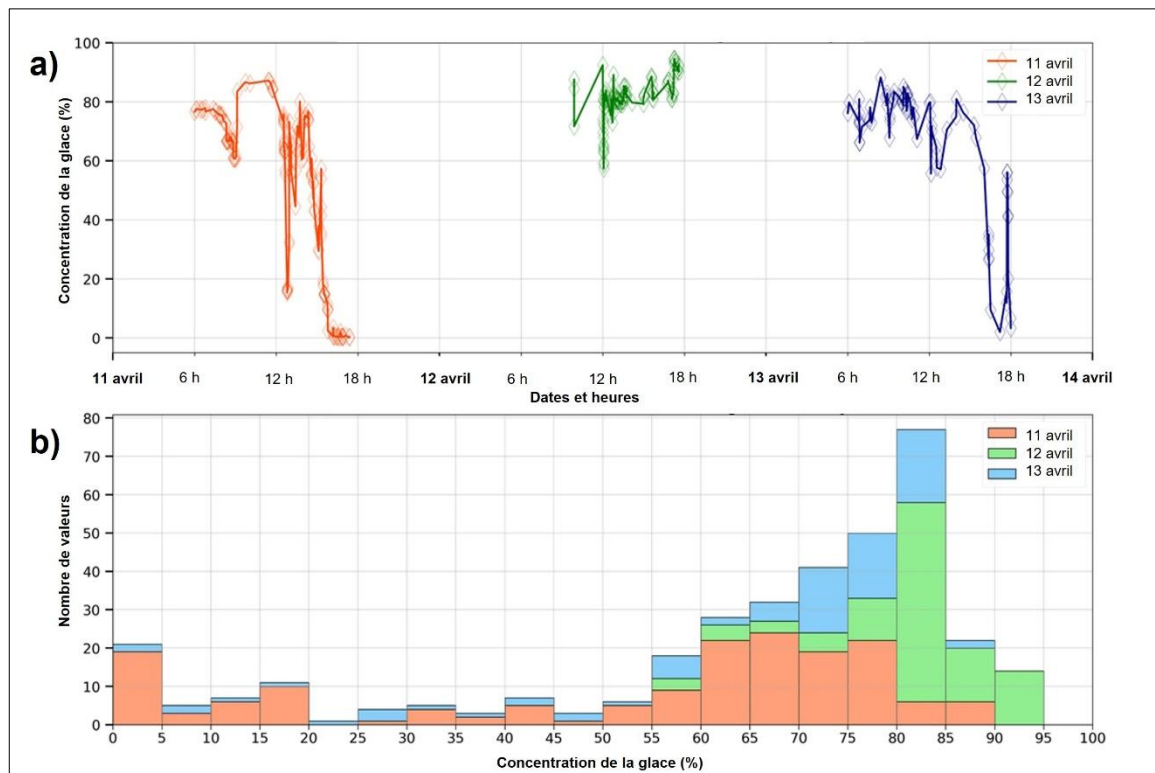


Figure 28. (a) Évolution temporelle et (b) distribution empilée de la concentration de glace durant la débâcle de 2023. À noter que les caméras n'enregistraient que de 6 h à 18 h. Ainsi, aucune valeur de concentration de la glace n'a été enregistrée durant la nuit.

Les statistiques de concentration de la glace, présentées au dans l'ensemble, la débâcle est caractérisée par une concentration moyenne de la glace de 64,26 % et un écart-type de 24,93 %, avec des valeurs minimale et maximale respectives de 0,19 % et 94,61 %.

Le tableau 7, confirme les types d'asymétrie observés à la figure 28b, avec des moyennes de 52,7 %, 81,3 % et 65,3 % respectivement pour les 11, 12 et 13 avril. L'écart-type le

plus faible a été enregistré le 12 avril, avec une valeur de 7,62 %, soit trois fois plus faible que ceux du 11 avril et du 13 avril, reflétant ainsi la constance observée à la figure 28a au cours de cette journée.

Dans l'ensemble, la débâcle est caractérisée par une concentration moyenne de la glace de 64,26 % et un écart-type de 24,93 %, avec des valeurs minimale et maximale respectives de 0,19 % et 94,61 %.

Tableau 7. Statistiques de concentration de la glace durant la débâcle 2023.

Date/Période	Moyenne (%)	Médiane (%)	Écart-type (%)	Minimum (%)	Maximum (%)
11 avril 2023	52,71	63,92	27,24	0,19	87,20
12 avril 2023	81,30	81,39	7,62	57,42	94,61
13 avril 2023	65,30	74,15	21,68	1,99	88,29
Débâcle	64,26	73,70	24,93	0,19	94,61

5.2.2.3 Vitesse de déplacement de la glace

L'évolution de la vitesse de déplacement des blocs de glace pendant la débâcle, lors des événements ATR et STR, est présentée à la figure 29a. Il est évident de constater que la concentration de la glace dans le plan d'eau influence de manière notable la vitesse de déplacement des blocs de glace. Par exemple, pour le 11 avril et le 13 avril, la vitesse a augmenté progressivement pour atteindre sa valeur maximale en fin de journée, ce qui coïncide avec la chute de la concentration de la glace à près de 0 % (figure 28a). En revanche, le 12 avril, la vitesse est restée relativement constante, reflétant également que la concentration de la glace est demeurée stable (élevée).

En ce qui concerne la distribution des vitesses de déplacement (figure 29b), elle se caractérise par une asymétrie vers la gauche à chaque jour de débâcle, ainsi que pour l'ensemble de la période de débâcle, avec un pic de 16 valeurs entre 0,33 m/s et 0,357 m/s. Cela signifie que la vitesse de déplacement des blocs de glace était moins variable au début de la débâcle qu'à la fin.

L'évolution de la vitesse de consolidation des blocs de glace, exclusivement lors des événements ATR, est présentée à la figure 30a. Cette évolution dans le temps est plutôt aléatoire, dépendant de la localisation du bloc, de son état de compactage et de la proximité des blocs dans l'accumulation lors des événements ATR. Sa distribution pendant la débâcle s'étend entre 0,001 m/s et 0,058 m/s, mais montre une légère asymétrie vers la gauche (petit pic de 4 valeurs entre 0,010 m/s et 0,012 m/s), en raison des distributions du 11 avril et du 13 avril, également asymétriques vers la gauche (figure 30b). La distribution du 12 avril est presque normale, avec un pic de 2 valeurs dans l'intervalle médian de 0,024 m/s à 0,026 m/s.

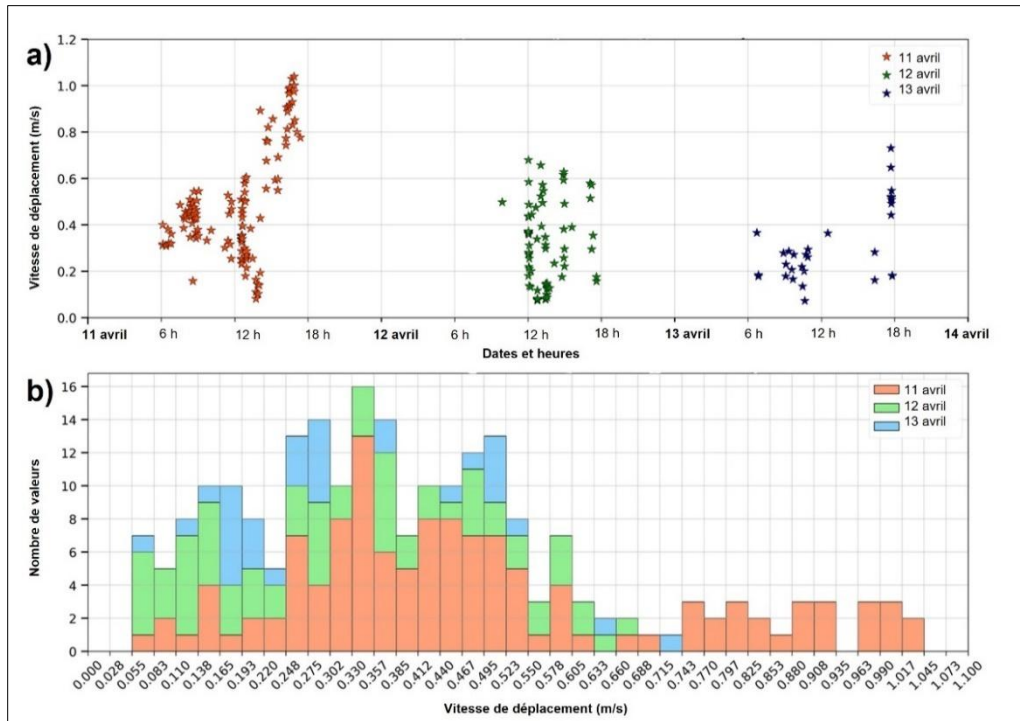


Figure 29. (a) Évolution temporelle et (b) distribution empilée de la vitesse de déplacement de la glace durant la débâcle de 2023.

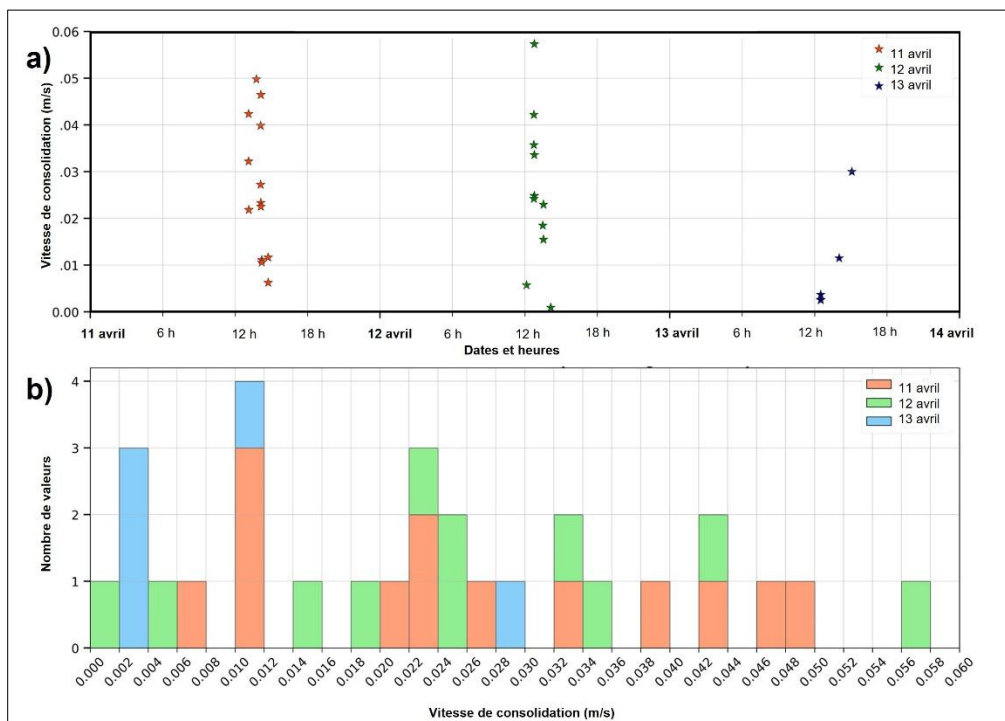


Figure 30. (a) Évolution temporelle et (b) distribution empilée de la vitesse de consolidation de la glace durant la débâcle de 2023.

Les vitesses de déplacement et de consolidation des blocs de glace sont présentées au tableau 8. En moyenne, la vitesse de consolidation a été 20 fois plus faible que la vitesse de déplacement, et cette tendance s'est maintenue tant à l'échelle quotidienne que pour l'ensemble de la débâcle. Les écarts-types sont presque deux fois inférieurs aux valeurs moyennes correspondantes, reflétant une certaine régularité dans les mesures. La vitesse de déplacement moyenne a été de 0,410 m/s, avec des valeurs minimale et maximale de 0,072 m/s et 1,040 m/s. De son côté, la vitesse de consolidation a atteint en moyenne 0,023 m/s, avec des valeurs variant entre 0,0009 m/s et 0,0573 m/s.

Tableau 8. Vitesse de déplacement et de consolidation des blocs de glace durant la débâcle 2023.

Type de vitesse	Date/Période	Moyenne (m/s)	Médiane (m/s)	Écart-type (m/s)	Minimum (m/s)	Maximum (m/s)
Déplacement	11 avril	0,485	0,434	0,238	0,082	1,040
	12 avril	0,317	0,297	0,174	0,074	0,680
	13 avril	0,319	0,276	0,161	0,072	0,731
	Débâcle	0,410	0,368	0,226	0,072	1,040
Consolidation	11 avril	0,0266	0,0234	0,0141	0,0062	0,0498
	12 avril	0,0256	0,0242	0,0154	0,0009	0,0573
	13 avril	0,0100	0,0037	0,0105	0,0025	0,0300
	Débâcle	0,0233	0,0230	0,0153	0,0009	0,0573

5.2.2.4 Longueur des blocs de glace

L'évolution de la longueur des blocs de glace observée avec le SCJ durant la débâcle est illustrée à la figure 31a. Une diminution progressive du nombre de blocs de plus de 2 m est facilement observable d'une journée à l'autre. Leur nombre est passé de 42 (21 %) le 11 avril à 22 (8 %) le 12 avril, à 16 (9 %) le 13 avril. Cette tendance indique une réduction de la longueur des blocs au fil de la débâcle, sous l'effet de la hausse des températures et de la fragmentation due aux multiples collisions dans le cours d'eau. Ainsi, les blocs observés le 12 et le 13 avril ont eu plus de temps pour fondre ou se fragmenter avant d'atteindre la structure.

L'histogramme de distribution des longueurs, présenté à la figure 31b, révèle une asymétrie vers la gauche pour chaque journée, ainsi que pour l'ensemble de la débâcle, avec un pic de 178 blocs mesurant entre 0,28 m et 0,55 m.

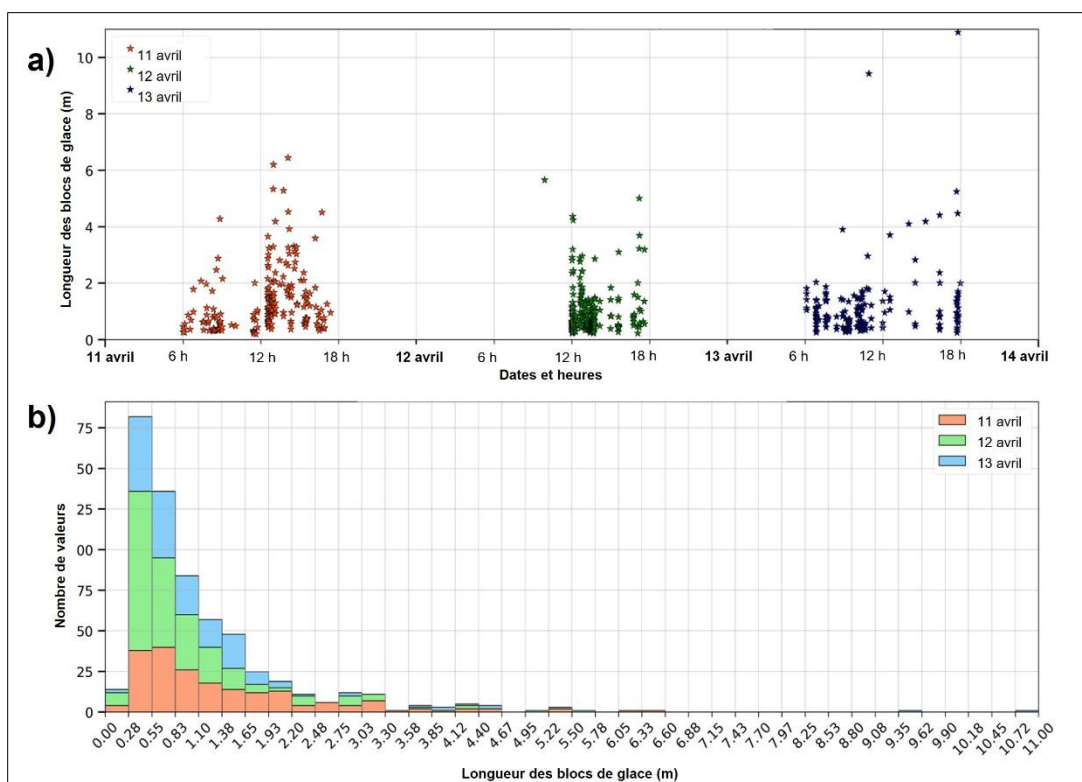


Figure 31. (a) Évolution temporelle et (b) distribution empilée de la longueur des blocs de glace durant la débâcle de 2023.

Toutefois, les statistiques de longueur des blocs de glace, présentées dans le tableau 9, indiquent que la taille des blocs est, en moyenne, proche de 1 m pour chaque journée et pour l'ensemble de la débâcle, de même que l'écart-type correspondant. En résumé, lors de cette débâcle, la longueur moyenne des blocs était de 1,13 m, avec une valeur minimale de 0,20 m et une valeur maximale de 10,89 m.

Tableau 9. Longueur des blocs de glace durant la débâcle de 2023.

Date/Période	Moyenne (m)	Médiane (m)	Écart-type (m)	Minimum (m)	Maximum (m)
11 avril 2023	1,38	0,99	1,14	0,20	6,45
12 avril 2023	0,93	0,64	0,82	0,23	5,66
13 avril 2023	1,16	0,82	1,28	0,25	10,89
Débâcle	1,13	0,79	1,08	0,20	10,89

Davantage de résultats de la campagne de terrain 2022–2023 sont discutés dans Benin et collab. (2024). Les lecteurs intéressés sont invités à s'y référer pour plus de détails.

5.3 Volet 3 : Modélisation numérique

La modélisation numérique vise à évaluer les approches existantes afin d'analyser leur précision, leur efficacité et leur capacité à simuler les interactions entre les vagues et la glace. Pour ce faire, une étude comparative a été menée sur trois méthodes CFD : DEM-MPS (développée par MPARS), DEM-SPH (développée par DualSPHysics) et DEM-FVM (développée par FLOW-3D HYDRO).

Les deux premières, DEM-MPS et DEM-SPH, sont des approches entièrement lagrangiennes et en accès libre (« open source »), tandis que la troisième, DEM-FVM, est intégrée au logiciel propriétaire FLOW-3D HYDRO. Toutes les méthodes ont été calibrées et validées à partir de données expérimentales issues de scénarios simplifiés, comme décrit dans la section précédente.

5.3.1 Performances de calcul

Le coût de calcul représente un défi important pour les modèles avec et sans maillage étudiés dans la présente étude. Ainsi, des modélisations avec et sans maillage ont été effectuées sur différentes machines afin de comparer leurs caractéristiques et le temps de calcul nécessaire à une simulation. Ces informations sont présentées au tableau 10.

Il a été observé que les performances de FLOW-3D HYDRO sont limitées par les restrictions spécifiées dans la licence fournie et par le nombre de cœurs de l'unité centrale de traitement ou « Central Processing Unit (CPU) » utilisés, soit le composant principal d'un ordinateur responsable de l'exécution des instructions des programmes.

Tableau 10. Caractéristiques des machines utilisées et temps de calcul pour les modélisations avec et sans maillage effectuées.

Caractéristiques	Méthode numérique			
	DEM-FVM		DEM-MPS	DEM-SPH
	Avec maillage		Sans maillage	Sans maillage
Programme	FLOW-3D HYDRO		MPARS	DualSPHysics
Cas	4 et 9 blocs	25 blocs	4 et 9 blocs	25 blocs
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-10700 @ 2.90GHz		Intel(R) Xeon (R) E5 v2 @ 2.80 GHz	Intel(R) Core(TM) i7 @ 3.60GHz
CPU cores	8		20	8
GPU	S.O. (FLOW-3D HYDRO n'utilise pas le GPU)		S.O. (d'après Amaro et collab., 2021)	NVIDIA GeForce GT 730
CUDA cores	S.O. (d'après Amaro et collab., 2021)			384
Nombre de cellules/particules	1 450 000	1 780 000	1 500 000	1 797 790
Temps (s)	3		3	3
Temps total (h)	28	57,2	30 - 60	23,5

5.3.2 Comparaisons qualitatives

Les résultats obtenus en laboratoire et à l'aide de simulations numériques avec le modèle DEM-MPS d'Amaro et collab. (2021) pour les scénarios à quatre et neuf blocs et avec le modèle de Billy et collab. (2023) pour le scénario de 25 blocs, et le modèle FLOW-3D HYDRO ont été comparés qualitativement (Pourshahbaz et collab., 2023a; 2024). Ces comparaisons ont porté sur le scénario de rupture de barrage avec quatre, neuf et 25 blocs en condition de lit sec (niveau d'eau en aval égal à zéro).

Des expériences en laboratoire ont été réalisées dans un chenal rectiligne, basées sur les travaux de Billy et collab. (2023). Ces essais ont utilisé 160 blocs sous différentes conditions d'écoulement (nombre de Froude) en présence d'une SRG et avec divers matériaux (glace réelle et polypropylène) afin d'évaluer les performances du modèle FLOW-3D HYDRO dans des conditions complexes.

Le modèle FLOW-3D HYDRO est devenu instable et n'a pas convergé. Bien que le logiciel annonce une capacité de gestion allant jusqu'à 500 objets mobiles et immobiles (FLOW-3D® Version 12.0 Users Manual, 2018), un ralentissement marqué de la plateforme graphique est apparu dès l'introduction de plus de 50 blocs. Par ailleurs, même si les formes peuvent être définies dans le logiciel ou importées via des fichiers (.stl), chaque bloc doit être paramétré individuellement pour bénéficier des six degrés de liberté (6-DOF), ce qui alourdit considérablement le processus. En raison du caractère propriétaire du logiciel, il n'a pas été possible d'identifier précisément la cause de ces instabilités.

Plusieurs facteurs pourraient contribuer à ces instabilités, notamment les effets d'advection-diffusion, la turbulence, la nature chaotique des interactions entre les blocs et les SRG, ainsi que le couplage de l'algorithme de la phase solide avec la phase fluide. Il est recommandé de mener des recherches supplémentaires pour approfondir ces expériences en laboratoire dans des chenaux plus longs, afin de mieux cerner les défis numériques associés (Pourshahbaz et collab., 2024)

Quatre blocs

La figure 32 montre des arrêts sur images, à différents moments, des simulations numériques et des résultats d'expériences en laboratoire de la rupture du barrage avec quatre blocs en condition de lit sec. Chaque sous-figure est composée de trois images représentant l'expérience en laboratoire en haut, les résultats du modèle DEM-MPS d'Amaro et collab. (2021) au milieu, et les résultats du modèle FLOW-3D HYDRO en bas. La vue de dessus des blocs et la position de la vanne sont également représentées dans la première sous-figure.

Dans ce scénario, à la suite de l'ouverture de la porte, la vague s'est propagée de manière fluide jusqu'au mur situé en aval. À l'instar des résultats obtenus avec le modèle DEM-MPS, le modèle FLOW-3D HYDRO a reproduit la propagation de la vague de façon légèrement accélérée. Autour de $t=0,8$ seconde, une vague de retour s'est formée, entraînant une simulation accélérée du déplacement des blocs A1 et B1 dans les deux modèles numériques par rapport à ce qui a été observé en laboratoire. Vers $t=1,6$ s, la direction de la vague s'est inversée, poussant les blocs en direction amont avant qu'ils ne

heurtent le mur. Passé $t=2$ s, les blocs ont commencé leur mouvement vers l'aval et le flux d'eau a ralenti.

Les simulations numériques, tant FLOW-3D HYDRO que DEM-MPS, ont reproduit adéquatement le positionnement des blocs observé en laboratoire, malgré certaines divergences. Ces différences pourraient résulter du positionnement initial des blocs dans l'expérience de laboratoire ou de la nature chaotique du phénomène au fil du temps, qui incluent des éléments tels que les vagues déferlantes et les jets plongeants.

Le modèle FLOW-3D HYDRO s'est montré cependant plus précis que le modèle DEM-MPS en ce qui concerne la position des blocs après $t=1,2$ s, lorsque comparé aux expériences en laboratoire.

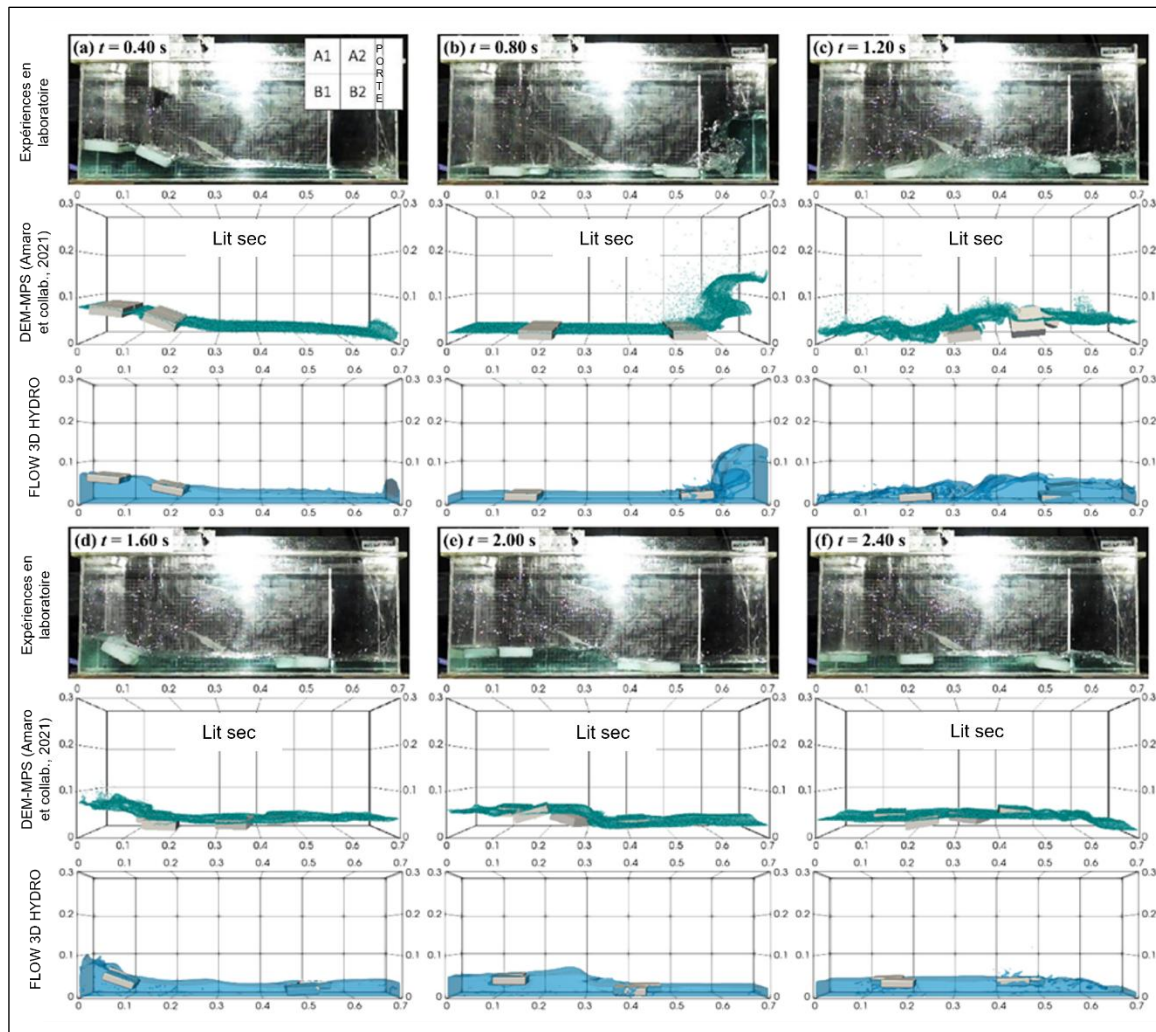


Figure 32. Arrêt sur image de l'expérience en laboratoire et des simulations numériques de la rupture du barrage avec quatre blocs en condition de lit sec à différents intervalles de temps : $t = 0,4$ s, $0,8$ s, $1,2$ s, $1,6$ s, 2 s, et $2,4$ s. Chaque sous-figue est composée de trois images : la 1^{re} les expériences en laboratoire, la 2^e les résultats DEM-MPS d'Amaro et collab. (2021), et la 3^e les résultats de FLOW-3D HYDRO.

Neuf blocs

La figure 33 présente les observations d'un scénario de rupture de barrage avec neuf blocs en condition sèche de la même manière qu'à la figure 21 pour le scénario avec quatre blocs. Dans ce scénario, les deux modèles numériques ont montré une bonne concordance avec l'expérience de laboratoire. Cependant, après $t=1,2$ s, lorsque la vague est venue s'échouer, la perturbation de la surface de l'eau et le mouvement des blocs sont devenus plus prononcés, en particulier pour les blocs situés plus près de l'aval.

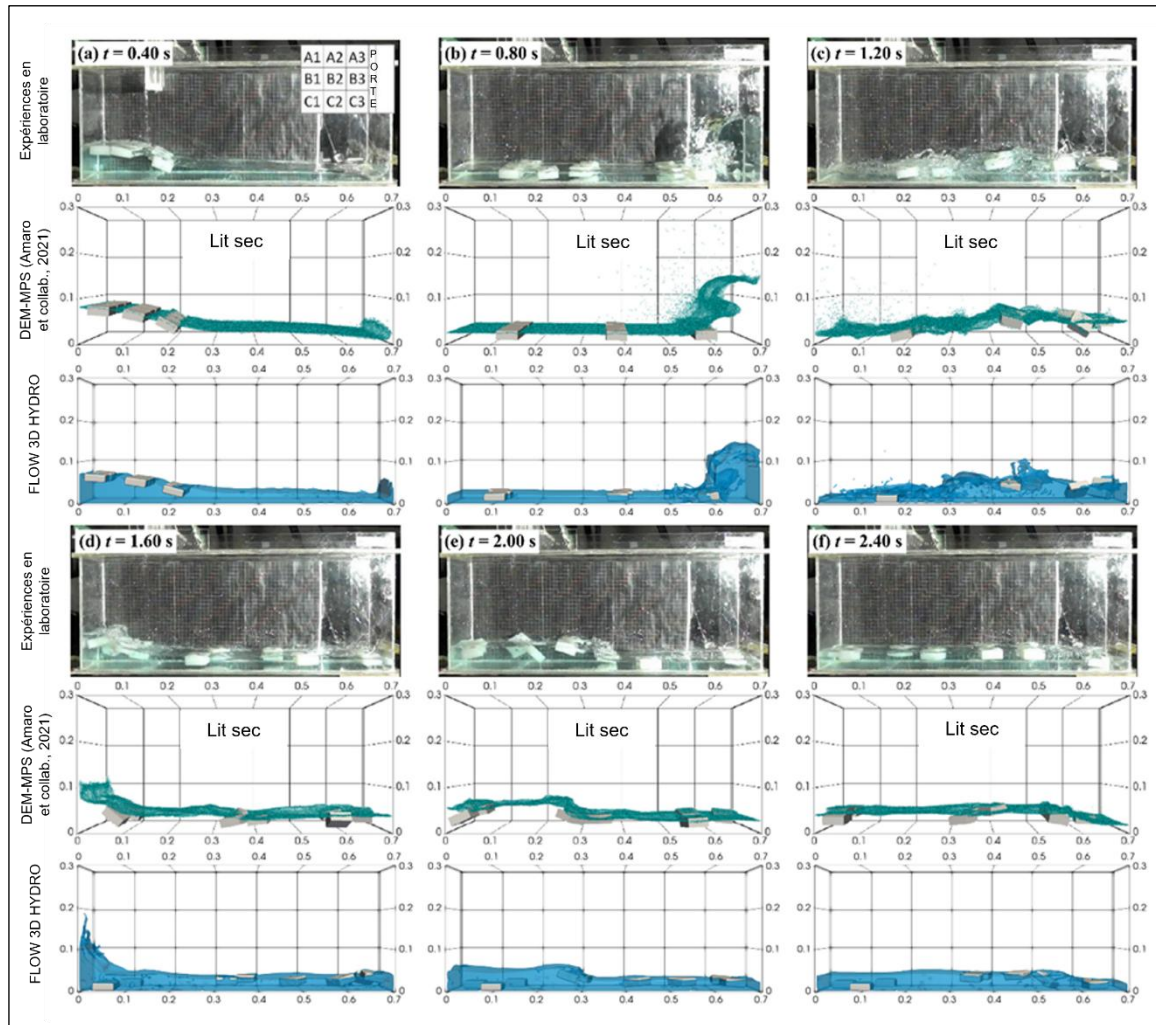


Figure 33. Arrêt sur image de l'expérience en laboratoire et des simulations numériques de la rupture du barrage avec neuf blocs dans des conditions de lit sec à différents intervalles de temps : $t = 0,4$ s, $0,8$ s, $1,2$ s, $1,6$ s, 2 s, et $2,4$ s. Chaque sous-figure est composée de trois images : la 1^{re} représente les expériences en laboratoire, la 2^e les résultats DEM-MPS d'Amaro et collab. (2021), et la 3^e les résultats de FLOW-3D HYDRO.

Par contre, un problème a été observé avec le modèle FLOW-3D HYDRO. En effet, après $t=1,6$ s, la dernière série de blocs (A1, B1 et C1) est venue se coller au fond du réservoir. Cette situation pourrait résulter de plusieurs éléments, comme un maillage imparfait dans cette zone précise, la position initiale des blocs dans la simulation et la nature chaotique inhérente au phénomène de rupture de barrage. Malgré le problème précédemment cité, les résultats du modèle FLOW-3D HYDRO ont montré une concordance acceptable dans le positionnement des autres blocs.

Dans l'ensemble, les simulations effectuées avec les deux modèles numériques ont montré une bonne concordance avec les observations obtenues en laboratoire pour ce qui est des profils de vagues et du positionnement des blocs.

25 blocs

La figure 34 présente des arrêts sur image d'expériences en laboratoire et des résultats de simulations numériques de la rupture du barrage avec 25 blocs avec des piles cylindriques. Chaque sous-figure se compose de trois images représentant l'expérience en laboratoire en haut, les résultats du modèle DEM-SPH de Billy et collab. (2023) au milieu, et les résultats du modèle FLOW-3D HYDRO en bas.

Dans ce scénario, après l'ouverture de la porte, une vague de rupture de barrage s'est formée et a transporté les blocs de glace vers l'aval jusqu'à la rencontre de la SRG. Les profils de vagues expérimentaux et numériques et les positions des blocs ont montré une bonne concordance globale avec quelques divergences. En effet, la propagation de l'onde numérique a été légèrement plus rapide que l'onde expérimentale en raison de la vitesse constante d'ouverture de la porte dans les modèles, alors que les expériences ont montré des variations causées par la friction entre la porte et les parois latérales du réservoir. Le renversement des blocs causé par la friction avec la porte, observé dans les expériences, n'a pas été entièrement reproduit dans les résultats numériques. Le mouvement de la dernière rangée de blocs (blocs 5, 10, 15, 20, 25) a été simulé avec précision par le modèle FLOW-3D HYDRO, mais a montré un mouvement très lent dans les simulations DEM-SPH.

Les arrêts sur images à $t=1,2$ s et $t=1,5$ s montrent la vague réfléchiée après avoir heurté le mur aval du réservoir (figure 34 (d) et (e)). Dans les résultats expérimentaux, l'intensité de cette vague a été légèrement supérieure à celle du modèle DEM-SPH, tandis que le modèle FLOW-3D HYDRO a montré une meilleure concordance. Des éclaboussures de vagues résultant de la vague réfléchiée frappant les piles en aval ont été observées dans les expériences et dans le modèle FLOW-3D HYDRO, mais pas dans le modèle numérique DEM-SPH. Dans les derniers arrêts sur image à $t=2$ s (figure 34 (f)), l'onde réfléchiée frappant la paroi du réservoir en amont a été simulée avec moins d'intensité dans le modèle DEM-SPH par rapport aux expériences, tandis que le modèle FLOW-3D HYDRO a montré une meilleure concordance.

Cette divergence dans les résultats des modèles DEM-SPH peut être attribuée au post-traitement de la surface dans DualSPHysics, qui exclut les particules uniques ou les zones de particules de faible densité, souvent présentes dans les éclaboussures (Billy et collab., 2023). Le modèle FLOW-3D HYDRO simule mieux le profil de surface parce qu'il n'a pas

de post-traitement de surface comme DualSPHysics. Il utilise plutôt la méthode Split Lagrangian (également connue sous le nom de TruVOF) pour le volume d'advection.

Dans le modèle FLOW-3D HYDRO, un coefficient de 0,01 a été utilisé dans les modèles numériques pour convertir les petites gouttes de particules de fluide en objets lagrangiens. Une valeur de fraction fluide inférieure à 0,01 dans une cellule et ses voisins immédiats permettait le déclenchement d'une conversion. Ces objets pouvaient redevenir des particules de fluide lorsqu'ils entraient en collision avec le composant solide ou qu'ils pénétraient dans le fluide principal. C'est ainsi l'une des raisons pour lesquelles le modèle FLOW-3D HYDRO a nécessité plus de temps de calcul que les méthodes sans maillage examinées dans le présent document.

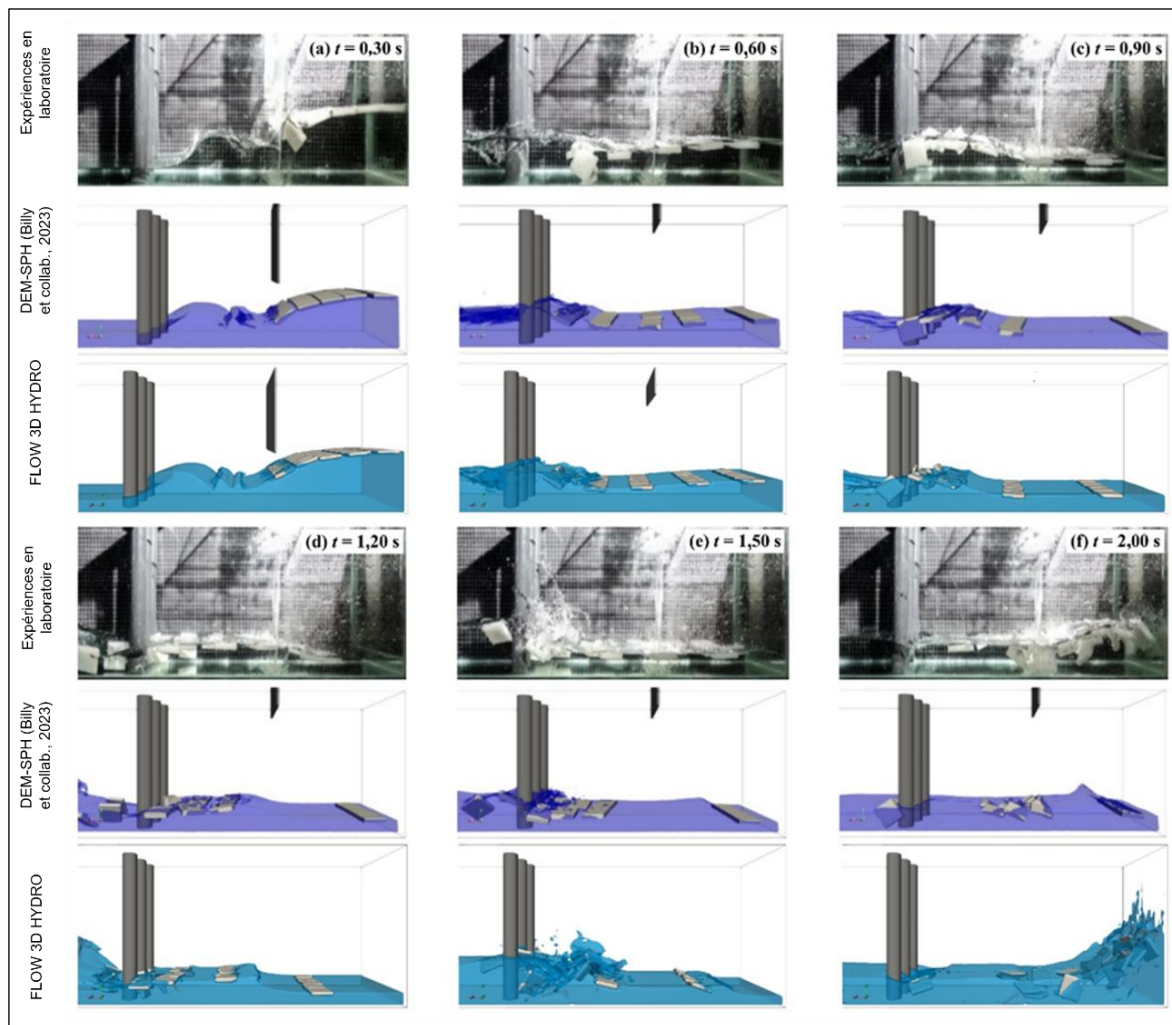


Figure 34. Arrêt sur image de l'expérience en laboratoire et des simulations numériques de la rupture du barrage avec 25 blocs avec des piles cylindriques à différents intervalles de temps : $t = 0,3 \text{ s}$, $0,6 \text{ s}$, $0,9 \text{ s}$, $1,2 \text{ s}$, $1,5 \text{ s}$ et 2 s . Chaque sous-figure est composée de trois images : la 1^{re} montre les expériences en laboratoire, la 2^e les résultats DEM-SPH de Billy et collab. (2023), et la 3^e les résultats de FLOW-3D HYDRO.

5.3.3 Comparaisons quantitatives

Les résultats obtenus en laboratoire et à l'aide des modèles numériques avec et sans maillage ont été comparés avec une approche quantitative. Ces comparaisons ont porté sur le scénario de rupture de barrage avec quatre, neuf et 25 blocs en condition de lit sec.

Quatre blocs

La figure 35 illustre les mouvements longitudinaux et verticaux des blocs dans l'expérience en laboratoire et les simulations numériques pour quatre blocs. Les résultats sont présentés pour les blocs B1 et B2. Chaque expérience de laboratoire a été répétée trois fois et leurs résultats sont étiquetés EXP 1, EXP 2 et EXP 3.

Dans ce scénario, la trajectoire initiale du bloc B1 obtenue numériquement a suivi initialement la tendance expérimentale. Cependant, le bloc a finalement été transporté vers l'aval à une vitesse plus rapide dans les résultats numériques que dans les expériences en laboratoire.

La distance maximale atteinte par le bloc B1 à $t=1,2$ s a été surestimée à la fois dans les simulations DEM-MPS et FLOW-3D HYDRO, avec des écarts de 0,3 m et 0,23 m, respectivement, par rapport à la distance expérimentale qui était d'environ 0,18 m. Cet écart peut s'expliquer par les difficultés rencontrées par les simulations numériques telles que la mise en place de la disposition initiale des blocs dans des positions régulières et également espacées et les variations dans le processus d'ouverture de la porte.

Après $t=1,2$ s, le bloc B1 a été transporté par le front d'onde réfléchi, entraînant des écarts plus importants dans les simulations DEM-MPS par rapport aux observations expérimentales. Cependant, les résultats obtenus avec FLOW-3D HYDRO ont été plus en adéquation avec les expériences de laboratoire jusqu'à $t=2$ s et ont continué à reproduire fidèlement la dynamique observée jusqu'à $t=3$ s.

Les divergences, qui ont également été observées entre les séries expérimentales, étaient attendues en raison de la nature chaotique du phénomène de rupture du barrage à ce stade, y compris les éclaboussures intenses avec le mélange air-eau causé par la chute du jet vertical ascendant sur le fluide sous-jacent. Les comportements chaotiques dans les processus de déferlement tels que le déferlement des vagues et la profondeur de pénétration du jet plongeant ont été précédemment documentés (Wei et collab. 2018).

En ce qui concerne les mouvements longitudinaux du bloc B2, les deux simulations numériques ont reproduit fidèlement les résultats expérimentaux jusqu'à $t=1$ s, et par la suite, le mouvement calculé a suivi la même tendance que les expériences. Les mouvements verticaux des blocs B1 et B2 (Z-B1 et Z-B2) ont correctement été prédits par les deux simulations numériques, ce qui indique que la force de flottabilité a bien été prise en compte par les modèles numériques. Cependant, une divergence a été observée dans le mouvement vertical du bloc B2 dans les résultats de FLOW-3D HYDRO entre $t= 0,8$ s et 2 s, pouvant être attribuable à un maillage plus grossier.

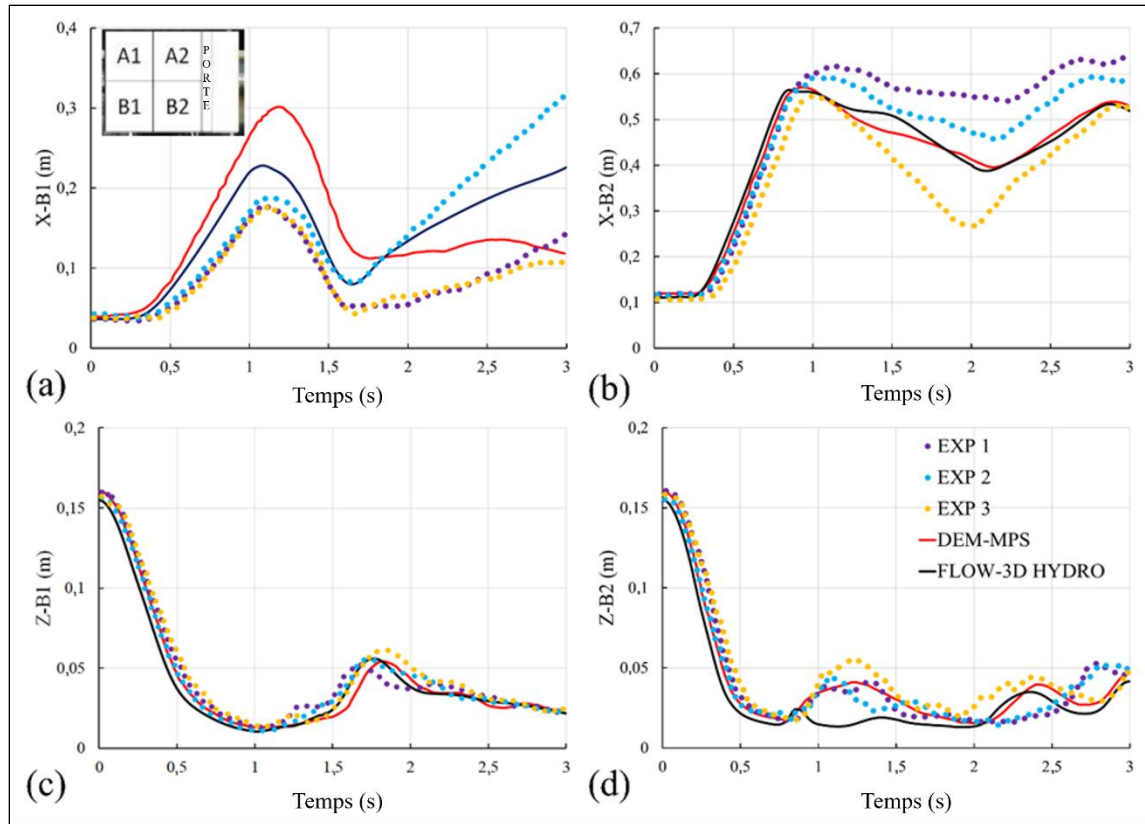


Figure 35. Simulation à quatre blocs : graphiques des résultats expérimentaux (lignes pointillées) et numériques (ligne continue) comparant le mouvement le long des axes x et z pour les blocs B1 en (a) et (c) et B2 en (b) et (d).

Neuf blocs

La figure 36 illustre les mouvements longitudinaux et verticaux des blocs dans l'expérience en laboratoire et les simulations numériques pour neuf blocs. Les résultats sont présentés pour les trois blocs C1, C2 et C3. Chaque expérience de laboratoire a été répétée trois fois et leurs résultats sont étiquetés EXP 1, EXP 2 et EXP 3.

Dans ce scénario, le déplacement maximal du bloc C1 a varié de manière importante dans les expériences, allant de 0,08 à 0,22 m, ce qui indique sa sensibilité aux perturbations expérimentales initiales. Le modèle DEM-MPS, en adéquation avec la troisième expérience, a surestimé les résultats de la première et de la deuxième expérience jusqu'à environ $t=1,7$ s. Par la suite, tandis que les expériences ont montré que le bloc C1 frappait le mur, entraînait en collision avec d'autres blocs et était transporté vers l'aval, les simulations numériques ont révélé que le bloc ne frappait que le mur et était transporté vers l'aval à une vitesse très lente, restant presque dans la même position.

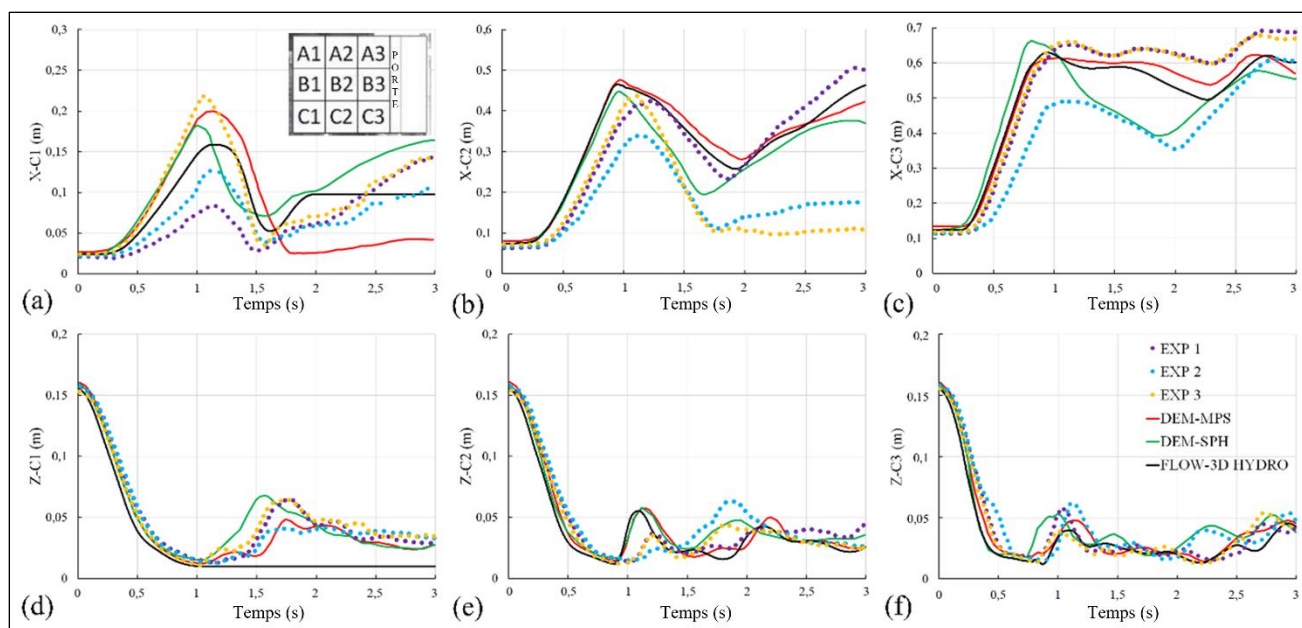


Figure 36. Simulation à neuf blocs : graphiques des résultats expérimentaux (lignes pointillées) et numériques (ligne continue) comparant le mouvement le long des axes x et z pour les blocs C1 en (a) et (d), C2 en (b) et (e), et C3 en (c) et (f).

Pour le modèle FLOW-3D HYDRO, le mouvement longitudinal a bien correspondu aux expériences de laboratoire jusqu'à $t=1,7$ s. Cependant, à $t=1,95$ s, quand le bloc C1 s'est collé au fond du réservoir et que la vague s'est calmée, le mouvement est devenu constant. La figure 36 (d) montre que le bloc C1 s'est collé au fond du réservoir dès $t=1$ s, et que le mouvement vertical est resté constant. Les divergences observées dans les résultats pourraient résulter d'un mauvais maillage, de la nature chaotique des phénomènes et du positionnement initial des blocs. De plus, le modèle DEM-SPH a commencé à surestimer le mouvement longitudinal à partir de $t=1,5$ s. Concernant le bloc C2, d'après les résultats expérimentaux, il a été transporté vers l'aval, atteignant un déplacement longitudinal maximal entre 0,33 m et 0,43 m autour de $t=1,2$ s, avant de se déplacer vers l'amont jusqu'à environ $t=1,8$ s.

Les simulations du mouvement du bloc C2 ont montré une bonne adéquation avec la deuxième expérience en laboratoire (EXP 2), avec le modèle FLOW-3D HYDRO affichant de meilleurs résultats par rapport au modèle DEM-SPH qui, lui, a sous-estimé ces résultats. Concernant le mouvement du bloc C3, jusqu'à $t=0,9$ s, les modèles FLOW-3D HYDRO et DEM-MPS ont reproduit fidèlement le mouvement en accord avec les résultats expérimentaux pour EXP 1 et EXP 3, mais ont surestimé ceux de EXP 2. Ensuite, le mouvement simulé s'est mieux aligné sur les résultats de EXP 1 et EXP 3. À l'inverse, le modèle DEM-SPH a surestimé les mouvements jusqu'à $t=0,9$ s avant de présenter une meilleure concordance avec la deuxième expérience (EXP 2).

Les tendances générales des mouvements verticaux calculés par les trois modèles numériques concordent bien avec les observations expérimentales, à l'exception du modèle FLOW-3D HYDRO pour le mouvement du bloc C1, comme mentionné précédemment. Toutefois, comme il a été observé dans le scénario à quatre blocs, certaines divergences locales subsistent.

25 blocs

La figure 37 illustre les mouvements longitudinaux et verticaux des blocs à la fois dans l'expérience en laboratoire et dans les simulations numériques pour le cas de 25 blocs.

Le suivi des positions des blocs a révélé une correspondance générale entre les observations expérimentales et les calculs numériques. Cependant, des données expérimentales pour les coordonnées x sont manquantes, attribuables aux restrictions du champ de vision de la caméra qui se limitait à la zone située en amont de la position des blocs. L'absence de ces données suggère que les blocs ont pu dépasser la limite de capture (SRG). L'inversion et l'accumulation des blocs peuvent aussi expliquer pourquoi certaines informations sont manquantes. La nature chaotique du phénomène a entraîné des variations dans les observations d'une expérimentation à l'autre (EXP 1, EXP 2, EXP 3), soulignant la nécessité de répéter les expériences afin de déterminer les tendances fondamentales.

Dans la simulation à 25 blocs, le bloc C6 est resté collé à la SRG dans le modèle FLOW-3D HYDRO (figure 37 (a)), alors que cela s'est produit avec les blocs C16 dans le modèle DEM-MPS (figure 37 (c)). Les deux modèles ont surestimé le mouvement dans la direction x des blocs C6 et C16 (figure 37 (a et c)), alors que le modèle FLOW-3D HYDRO a présenté de meilleurs résultats en ce qui concerne la simulation du comportement des blocs.

Davantage de résultats sur les simulations numériques sont discutés dans Pourshahbaz et collab. (2023a; 2024). Les lecteurs intéressés sont invités à s'y référer pour plus de détails.

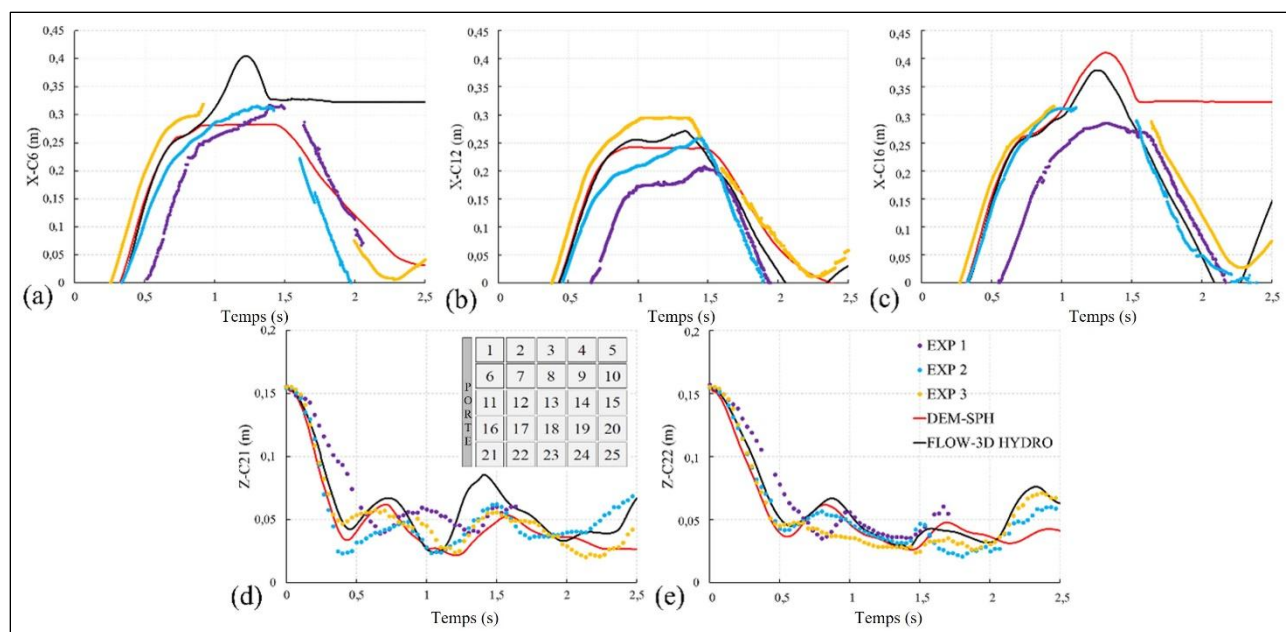


Figure 37. Simulation à 25 blocs : graphique des résultats expérimentaux (lignes pointillées) et numériques (ligne continue) comparant le mouvement le long de l'axe x (blocs 6, 12, 16 en (a), (b) et (c) et de l'axe z (blocs 21, 22 en (d) et (e)).

6 Conclusions

Cette étude a permis d'évaluer l'efficacité des SRG dans l'atténuation des inondations causées par les embâcles de glace à travers une approche multidisciplinaire, combinant une revue de littérature, des campagnes de terrain et des modélisations numériques. Voici les principales conclusions de l'étude pour chacune des méthodes analysées.

6.1 Revue de littérature

La recherche documentaire a permis de dégager les conclusions suivantes :

- Une part substantielle des recherches effectuées sur les SRG se trouve dans la littérature grise, notamment les actes de conférences, les rapports techniques et les manuels;
- Les études sont concentrées principalement aux États-Unis et au Canada et il existe un besoin de recherches internationales pour comprendre les variations régionales;
- Sur les cinq types de SRG, les piles sont les plus étudiées (34 %) en raison de leur rentabilité, bien que leur applicabilité soit limitée dans les zones développées;
- Les études historiques et de terrain sont essentielles pour évaluer la performance à long terme des SRG, mais elles sont limitées par des lacunes dans les données et une sous-déclaration des événements, affectant la fiabilité des conclusions;
- Les expériences en laboratoire sont utiles pour optimiser les conceptions, mais les effets d'échelle et les coûts élevés restent des défis et limitent souvent la portée et la fréquence des expériences;
- La modélisation numérique est dominante, représentant 42 % des études, avec une prédominance des modèles unidimensionnels et bidimensionnels et avec une transition vers des modèles tridimensionnels plus complexes.

6.2 Collecte de données sur le terrain

Afin d'évaluer l'efficacité des SRG existantes et d'en optimiser leur conception, cinq sites ont été instrumentés à l'hiver 2021-2022, soit les sites Du-Berger, Allard, Saint-Raymond, Du Moulin et Sartigan. Les résultats de cette campagne ont montré que :

- La formation de la couverture de glace en amont des SRG a pu être initiée en raison du frasil provenant de l'amont (SRG Saint-Raymond et SRG Du Moulin), ou par l'expansion de la glace de rives (SRG Allard);
- Une diminution du débit a permis la formation d'un couvert de glace partiel en amont de la SRG Allard. Ce couvert s'est stabilisé, mais des pics de débit ont submergé la glace, épaississant le couvert par regel de l'eau en surface, avant qu'il ne fonde sur place lors d'une débâcle thermique;

- La SRG Saint-Raymond a retenu l'accumulation de glace pendant 68,5 heures et l'embâcle s'est libéré en raison d'une augmentation du débit par une libération mécanique. Ceci a été mis en évidence dans le ratio de libération/formation Fr de 1,2;
- À la SRG Du Moulin, le temps de maintien a été plus long (5,5 heures) pour les embâcles qui se sont libérés mécaniquement (ratio de Fr de 1,1), et plus court (2,3 heures en moyenne) pour les embâcles qui se sont libérés thermiquement (ratio de Fr de 1,0 et 0,9). Ceci met en évidence l'effet de la résistance de la glace sur le temps de maintien;
- Bien que l'espacement des piles à la SRG Sartigan soit presque le même que celui de la SRG Du Moulin, les trains de glace ne se sont pas arrêtés en amont de la SRG Sartigan (temps de maintien pratiquement nul). Ceci amène une réflexion quant à l'optimisation des espacements entre les piles.

La collecte de données sur le terrain réalisée à l'hiver 2022-2023 s'est principalement concentrée sur la SRG Sartigan, bien que des données aient également été recueillies à la SRG Saint-Raymond. Les résultats de cette campagne ont montré que :

- La SRG a retenu les blocs de glace dans 61 % des cas, avec un temps de rétention moyen d'environ 87 minutes;
- La concentration de la glace en amont de la SRG est généralement demeurée supérieure à 50 %, avec une valeur moyenne de 64,26 %;
- Les blocs de glace en amont de la SRG se sont déplacés à une vitesse de 0,410 m/s et consolidés à une vitesse de 0,023 m/s;
- La longueur moyenne des blocs de glace était d'environ 1,13 m, soit six fois plus petite que l'ouverture de la SRG.

6.3 Modélisation numérique

Des modèles numériques avec maillage (FLOW-3D HYDRO) et sans maillage (MPARS, DualSPHysics) ont été évalués pour leur capacité à simuler les interactions entre les vagues et la glace. Leurs performances ont été comparées à des expériences en laboratoire.

Voici les principales conclusions tirées de l'analyse :

- Les modèles sans maillage sont flexibles et adaptés aux conditions complexes, avec une meilleure utilisation des ressources grâce à l'accélération GPU. Toutefois, leur configuration est plus complexe;
- FLOW-3D HYDRO offre une interface conviviale et une grande polyvalence pour les problèmes hydrauliques. Cependant, il est limité par le nombre de cœurs de processeur disponibles sous licence et son exclusivité CPU, ce qui entraîne une consommation de ressources plus élevée;

- FLOW-3D HYDRO a reproduit avec précision les trajectoires des blocs dans des scénarios simples (RMSE de 0,0418 à 0,0527 pour 4 et 9 blocs). Pour 25 blocs, la précision était meilleure pour la glace réelle (RMSE de 0,0441) que pour la glace artificielle (RMSE de 0,0753), soulignant l'importance des propriétés des matériaux;
- FLOW-3D HYDRO n'a pas convergé dans des scénarios complexes, comme l'accumulation de blocs derrière une SRG. Cette instabilité pourrait être liée à la nature chaotique du phénomène, aux limites du modèle de collision et au couplage entre phases solide et fluide, nécessitant des recherches supplémentaires.

Les résultats obtenus confirment l'importance des SRG dans l'atténuation des embâcles de glace et mettent en évidence les forces et limites des différentes méthodes d'analyse. La complémentarité entre les études sur le terrain, les essais en laboratoire et la modélisation numérique permet d'optimiser la conception et l'efficacité de ces structures. Toutefois, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre l'interaction entre les blocs de glace et les SRG dans des conditions complexes, ainsi que pour améliorer la précision des outils de simulation.

Références

- Amaro, R.A., Mellado-Cusicahua, A., Shakibaeinia, A. et Cheng, L.-Y. (2021). A fully Lagrangian DEM-MPS mesh-free model for ice-wave dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 186: 103266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103266>.
- Axelsson, K.D. (1991). Israel River Ice Control Structure. Fifteenth Annual Conference of the Association of State Floodplain Managers. Denver, Colorado, USA.
- Axelsson, K.D., Foltyn, E.P. (Edward P.), Zabilansky, L.J., Lever, J.H., Perham, R.E., et Gooch, G.E. (1990). Salmon River ice jam control studies: interim report. This Digital Resource was created from scans of the Print Resource. Special Report, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire, USA.
- Belore H.S., Burrell B.C. et Beltaos S. (1990). Ice jam mitigation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(5): 675-685.
- Benin, W.J., Ghobrial, T., Pourshahbaz, H. et Pierre, A. (2024). Characterization of Ice Retention during Breakup Upstream of an Ice Control Structure Using a Juxtaposed Camera System. *Proceedings of the 27th IAHR International Symposium on Ice*, Gdańsk, Poland (p. 9-13).
- Billy, C., Shakibaeinia, A. et Ghobrial, T. (2024). Fully lagrangian mesh-free modelling of river ice interaction with control structures. *River Flow 2022* (p. 634-638). CRC Press.
- Billy, C., Shakibaeinia, A. et Ghobrial, T. (2023). Three-dimensional fully-Lagrangian DEM-SPH modeling of river ice interaction with control structures. *Cold Regions Science and Technology*, 214, p.103939.
- Billy, C., Shakibaeinia, A., Jandaghian, M., Taha, W., Lokhmanets, I., Carbonneau, A.S. et Larouche, M.-E. (2022). Three-dimensional fully Lagrangian continuum-discrete modeling of river ice jam formation. *26th IAHR International Symposium on Ice*. Montreal, Canada.
- Burrell, B.C. et Ghobrial, T. (2024). Preface to the special issue on river ice and infrastructure. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 51(2): i–iv. NRC Research Press. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0457>.
- Calkins, D.J. (1991). Longitudinal floating structures - new concepts in river ice control. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(6): 933-939. NRC Research Press. DOI: <https://doi.org/10.1139/I91-115>.
- Calkins, D.J. (1984). Cold facts of ice jams-case studies of mitigation methods. Eighth Annual conference of the Association of State Floodplain Managers. Portland, Maine, USA.
- Carr M., Vuyovich C.M. et Tuthill A.M. (2017). Benefit analysis of ice control structures in oil city, Pennsylvania. *Journal of Cold Regions Engineering*, 31(2): 05016003. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000120](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000120).

- Carr, M., Tuthill, A.M. et Vuyovich, C.M. (2011). Dam Removal Ice Hydraulic Analysis and Ice Control Alternatives. Proceedings of the 16th Workshop on River Ice, Winnipeg, MB, Canada, 18 au 22 septembre.
- Carr, M., Vuyovich, C.M. et Tuthill, A.M. (2010). Evaluating the Cost Benefits of the Oil City Ice Control Structure. 20th IAHR International Symposium on Ice. Lahti, Finland.
- Deck, D. et Gooch, G. (1981). Ice Jam Problems at Oil City, Pennsylvania. Special Report, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire, USA.
- Flow Science, Inc. (2018). FLOW-3D® Version 12.0 Users Manual. Santa Fe, NM, USA.
- Giovando, J., Engel, C., Vandevort, D. et Chow, C. (2023). Summary of ice jams and mitigation techniques in Alaska. Special Report, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire, USA.
- Gooch, G.E. et Deck, D. (1990). Model study of the Cazenovia Creek ice control structure. United States. Army. Corps of Engineers. Buffalo District. Special Report, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire, USA.
- Heinz Center (2002). Dam Removal: Science and Decision Making. H. John Heinz III Center for Science, Economics and the Environment., Washington, D.C.
- Hicks, F.E. (2016). An Introduction to River Ice Engineering: For Civil Engineers and Geoscientists. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Huang, F. et Shen, H.T. (2024). Dam removal effect on the lower St. Regis River ice-jam floods. Canadian Journal of Civil Engineering, 51(2): 215–227. NRC Research Press. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0040>.
- Huang, F. et Shen, H.T. (2022). Breakup Ice Jam Floods in the Lower St. Regis River. 26th IAHR International Symposium on Ice. Montréal, Québec, Canada.
- Kolerski, T. et Shen, H.T. (2024). A numerical model study on Grasse River ice-control structures. Canadian Journal of Civil Engineering, 51(2): 140–150. NRC Research Press. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0047>.
- Kolerski, T., Shen, H.T. et Liu, L. (2008). DynaRICE Modeling to Assess the Performance of an Ice Control Structure on the Lower Grasse River. Proceedings of the 19th IAHR International Symposium on Ice, Vancouver, BC, Canada, 6 au 11 juillet.
- Lafleur, C., Nolin, S., Pelletier, P. et Babineau, L. (2021). Understanding, Monitoring and Preventing Ice-Jam Flooding on an Urban River in the Quebec City Area, Proceedings of the 21st Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 29 août au 1er septembre 2021
- Lever J.H. et Gooch G. (2007). Assessing the performance of a sloped-block ice-control structure. Journal of Cold Regions Engineering, 21(1): 19-39. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2007\)21:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2007)21:1(19)).

- Lever, J.H. et Gooch, G. (2005) Performance of a Sloped-Block Ice-Control Structure in Hardwick, VT. Proceedings of the 13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Hanover, NH, USA, 15 au 16 septembre, p. 7.
- Lever J.H. et Daly S.F. (2003). Upstream effects of Cazenovia Creek ice-control structure. Journal of Cold Regions Engineering, 17(1): 3-17. DOI : [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2003\)17:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2003)17:1(3)).
- Lever, J.H. et Daly, S.F. (2001). Maximum Waterlevels Upstream of an Ice-Control Structure. In 11th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Ottawa, Ontario, Canada.
- Lever, J.H. et Gooch, G. (2001). Design of Cazenovia Creek Ice Control Structure. Journal of Cold Regions Engineering. 15(2): 103-124. DOI : [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2001\)15:2\(103\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2001)15:2(103)).
- Lever, J.H., Gooch, G. et Daly, S.F. (2000). Cazenovia Creek Ice-Control Structure: Special Report, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire, USA.
- Lever, J.H. et Gooch, G. (1999) Cazenovia Creek Ice Control Structure: A Comparison of Two Concepts. Proceedings of the 10th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Winnipeg, MB, Canada, 8 au 11 juin.
- Lever, J.H. et Gooch, G. (1998). Model and Field Performance of a Sloped Block Ice Control Structure. 14th International Symposium on Ice. Potsdam, New York, USA.
- Lever, J.H., Gooch, G., Tuthill, A. et Clark, C. (1997). Low-Cost Ice-Control Structure. Journal of Cold Regions Engineering, 11(3): 198-220. American Society of Civil Engineers. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(1997\)11:3\(198\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(1997)11:3(198)).
- Morse, B., Francoeur, J., Delcourt, H. et Leclerc, M. (2006). Ice control structures using piers, booms and nets, Cold Regions Science and Technology, 45 (2): 59-75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.02.003>
- Morse, B., Francoeur, J., Delcourt, H. et Leclerc, M. (2003). Ice Control Structures using steel nets. 12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Edmonton, Alberta.
- National Academies Press. (1992). Restoration of Aquatic Ecosystems: Science, Technology, and Public Policy. National Academies Press, Washington, D.C.
- Nolin S., Pelletier P. et Groux F. (2017). Modelling the impacts of dam rehabilitation on river ice jam: a case study on the Matane River, QC, Canada. Proceedings of 19th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Whitehorse, Yukon, Canada, 9 au 12 juillet 2017.
- Perham R.E. (1983). Ice sheet retention structures. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH. CRREL Report 83-30. December 1983.
- Pourshahbaz, H., Ghobrial, T. et Shakibaeinia, A. (2024). Evaluation of a Coupled CFD and Multi-Body Motion Model for Ice-Structure Interaction Simulation. Water, 16(17): 2454.

- Pourshahbaz, H., Ghobrial, T. et Shakibaeinia, A. (2023a). Evaluating a CFD model for three-dimensional simulation of ice structure interaction. Proceedings of the 22nd Workshop on the Hydraulics of Ice-Covered Rivers, Canmore, Alberta, Canada, 9-12 juillet 2023.
- Pourshahbaz, H., Ghobrial, T. et Shakibaeinia, A. (2023b). Field monitoring of river ice processes in the vicinity of ice control structures in the province of Quebec, Canada. Canadian Journal of Civil Engineering, 51(2): 200-214.
- Purnell, D., Dabboor, M., Matte, P., Peters, D., Anctil, F., Ghobrial T. et Pierre A. (2024). Observations of river ice breakup using GNSS-IR and SAR. IEEE Transaction of Geoscience and remote Sensing. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3380554>.
- Tremblay P.R. et Thibault D. (1980). Analysis of hydraulic and ice conditions at Terrebonne in relation with winter and spring floods. Proceedings of 1st Workshop on Hydraulics of River Ice, Burlington, Ontario, 23-24 septembre 1980. Canada Centre for Inland Waters.
- Turcotte, B. et Morse, B. (2015). Ice-induced flooding mitigation at St. Raymond, QC, Canada. 18th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Québec (Québec) Canada.
- Turcotte, B. et Morse, B. (2013). Ice jam mitigation at the St. Félicien Zoo. 17th Workshop on River Ice. Edmonton, Alberta, Canada.
- Tuthill, A.M., Ashton, G.D. et Quadrini, J. (2008a). Physical Modeling of Ice Retention at a Small Hydroelectric Dam on the Grasse River. 19th IAHR International Symposium on Ice. Vancouver, British Columbia, Canada.
- Tuthill, A.M., Ashton, G.D., Hendershot, P. et Quadrini, J. (2008b). Grasse River Ice Control Structure, Physical Model Study. 19th IAHR International Symposium on Ice. Vancouver, British Columbia, Canada.
- Tuthill, A.M. et Lever, J.H. (2006). Design of Breakup Ice Control Structures: Special Report, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire, USA.
- Tuthill, A.M., Liu, L. et Shen, H.T. (2005). Breakup Ice Control Structure with In-Channel Relief Flow. 13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Hanover, New Hampshire, USA.
- Tuthill A.M. (1998). Structural ice control: a review. Journal of Cold Regions Engineering, 12(2): 33-51. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(1998\)12:2\(33\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(1998)12:2(33)).
- Tuthill A.M. (1995). Structural ice control: review of existing methods. N.H. Special Report 95-18. Juillet. Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), Hanover.
- Shen, H.T. (2010). Mathematical modeling of river ice processes. Cold Regions Science and Technology, 62(1): 3-13. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.02.007>.

- Stothart, C.D. et Croteau, J. (1965). Montreal Ice Control Structure. In Eastern Snow Conference. Hanover, New Hampshire, USA.
- Vergeynst J., Morse B. et Turcotte B. (2017). Quantifying frazil production, transport and deposition in a gravel-bed river: case study of the St. Raymond hanging dam. *Cold Regions Science and Technology*, 141: 109-121.
- Vergeynst J., Morse B. et Turcotte B. (2015). The nature and structure of a hanging dam in a gravel-bed river. *Proceedings of 18th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*, 18-20 August 2015. Quebec City, QC. p. 22.
- Verta, O.-M. et Pohjamo, T. (2015). The Principle and Design of Cascade of Ice-Control Structures for Small River – Case Study River Uskelanjoki. *18th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*. Québec (Québec) Canada. p. 11.
- Vuyovich, C.M. et White, K.D. (2008). Evaluating the Impact of Dam Removal on Break-up Jams. *19th IAHR International Symposium on Ice*. Vancouver, British Columbia, Canada.
- Vuyovich, C.M. et White, K.D. (2007). Evaluation of Dam Decommissioning in an Ice-Affected River: Case Study. *Special Report, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire, USA*.
- Vuyovich, C.M. et White, K.D. (2006). Assessment of the Effectiveness of the Israel River Ice Control Structure, Lancaster, NH. *Special Report, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire, USA*.
- Vuyovich C.M., White K.D. et Tuthill A.M. (2006). Assessing the effectiveness of an ice control structure. *Proceedings of 13th International Conference on Cold Regions Engineering*. American Society of Civil Engineers, Orono, ME. p. 1-11.
- Wei, Z., Li, C., Dalrymple, R.A., Derakhti, M. et Katz, J. (2018). Chaos in breaking waves. *Coastal Engineering*, 140: 272-291. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.08.001>.
- White, K.D. et Moore, J.N. (2002). Impacts of Dam Removal on Riverine Ice Regime. *Journal of Cold Regions Engineering*, 16(1): 2–16. American Society of Civil Engineers. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2002\)16:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2002)16:1(2)).
- Zufelt, J.E. (2005a). Modeling Ice Jams using HEC-RAS: The Three Creeks Project. *13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*. Hanover, New Hampshire, USA.
- Zufelt, J.E. (2005b). Ice Control Structure Design. *World Water and Environmental Resources Congress 2005*. American Society of Civil Engineers, Anchorage, Alaska, United States. p. 1-11.