



INONDATION CAUSÉE PAR LA RIVIÈRE DU GOUFFRE LE 1^{ER} MAI 2023

PORTRAIT DES ALÉAS EN CAUSE

COMITÉ EXPERT INTERMINISTÉRIEL
EN SOUTIEN AU RÉTABLISSEMENT
ET À LA PRISE DE DÉCISION EN
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

Ce document a été réalisé par le ministère de la Sécurité publique, le ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, le ministère de l'Environnement, de la Lutte aux changements climatiques, de la Faune et des Parcs et le ministère des Transports et de la Mobilité durable.

Une version électronique de ce document est disponible en ligne.

ISBN : 978-2-550-96155-0 (PDF)

Dépôt légal – 2023

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Tous droits réservés. La reproduction de ce document par quelque procédé que ce soit et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation des Publications du Québec.

© Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2023

Table des matières

Liste des figures	V
Liste des tableaux	IX
Liste des annexes	X
1. Mise en contexte	1
2. Comité expert interministériel en soutien au rétablissement et à la prise de décision en aménagement du territoire	2
3. Description du bassin versant.....	5
3.1. Bassin versant de la rivière du Gouffre	5
3.2. Contexte physiographique régional.....	7
3.3. Contexte stratigraphique de la vallée de la rivière du Gouffre	8
4. Événement météorologique	9
4.1. Apport en eau de la fonte du couvert de neige au sol	10
4.2. Apport en pluie'	11
5. Hydrologie	14
5.1. Récurrence	14
5.2. Rapidité de la crue	15
6. Barrages (ouvrages de retenue).....	15
7. Ouvrage de protection contre les inondations – MSP	16
8. Zone touchée par les aléas / Aléas ayant touché le territoire	18
8.1. Zone touchée	18
8.2. Mouvement de terrain.....	18
8.2.1. État de la situation à la suite des événements du 1 ^{er} mai 2023.....	20
8.3. Inondation, érosion, dépôt, déplacement de cours d'eau	32
8.3.1. État de la situation à la suite des événements du 1 ^{er} mai 2023.....	37
8.3.2. Adéquation de l'événement avec les zones de faible courant et de grand courant.....	39

9. Secteurs d'intérêt particulier	40
9.1. Centre-ville de Baie-Saint-Paul	40
9.1.1. Secteur de la rue Ménard	43
9.1.2. Secteur de la confluence du Bras du Nord-Ouest	44
9.2. Camping Le Genévrier	46
9.3. Saint-Urbain : confluence des rivières Le Petit Bras et Le Gros Bras.....	52
9.4. Saint-Urbain : L'intersection de la rue Sainte-Anne et du rang Saint-Jean-Baptiste	59
9.5. Saint-Urbain : Secteur du rang Saint-Georges.....	60
10. Références	62
Annexes.....	63

Liste des figures

Figure 1. Carte de situation des municipalités de Baie-Saint-Paul et de Saint-Urbain	1
Figure 2. Le bassin versant de la rivière du Gouffre couvre 997 km ² , dont plus de 74 % est sous couvert forestier et 23 % en zone agricole. La rivière du Gouffre prend sa source dans le massif des Laurentides et se jette au fleuve à la hauteur de la ville de Baie-Saint-Paul.....	5
Figure 3. Bassin versant de la rivière du Gouffre et de ses principaux affluents.....	6
Figure 4. Relief ombragé obtenu d'un levé Lidar de 2019, montrant les différents niveaux d'encastrement des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras à Saint-Urbain, près de leur embouchure avec la rivière du Gouffre.....	8
Figure 5. Coupes sismiques en ondes de compression et de cisaillement selon les lignes 1000a et 1000b (bleu clair : argile, jaune : sable, jaune pâle : sable fin, orange : gravier, rouge : substratum rocheux).....	9
Figure 6. Évolution de l'équivalent en eau de la neige au sol (mm) mesuré aux stations manuelles et automatiques les plus près du bassin versant de la rivière du Gouffre	11
Figure 7. Équivalent en eau de la neige au sol (mm) mesuré les 22 et 24 avril 2023 aux stations manuelles les plus près du bassin versant de la rivière du Gouffre (ligne noire). La ligne pointillée noire identifie le bassin de la rivière des Mares. Les lignes de contour sont estimées par krigeage, mais il est probable que l'EEN à l'extrême nord du BVG était en réalité plus élevé que cette estimation	11
Figure 8. Pluie horaire et cumulée (mm) enregistrée du 30 avril au 2 mai 2023 aux stations automatiques La-Galette, Charlevoix (MRC) et Saint-Aimé-des-Lacs	13
Figure 9. Cumul de pluie (mm) mesuré du 30 avril au 2 mai 2023 aux stations automatiques et avec observateur les plus près du bassin versant de la rivière du Gouffre (ligne noire). La ligne pointillée noire délimite le bassin de la rivière des Mares. Les lignes de contour sont estimées par krigeage, mais le cumul de pluie à l'extrême nord du BVG était en réalité très probablement plus élevé que cette estimation	13
Figure 10. Localisation de la station 051305, à Saint-Urbain. Le trait en rose représente la limite inférieure du bassin versant considérée à la station. L'eau s'écoulant au sud de cette limite n'est donc pas prise en compte dans l'hydrogramme de la station ainsi que dans l'estimation de récurrence de l'événement.....	14
Figure 11. Hydrogramme de l'événement du 1 ^{er} mai 2023 à la station hydrométrique du MELCCFP 051305 sur la rivière du Gouffre	15
Figure 12. Emplacement approximatif (trait orange) du mur de protection entourant le secteur des rues Saint-Joseph et Leclerc à Baie-Saint-Paul.....	16
Figure 13. Vue d'une portion du mur côté rue Ménard à Baie-Saint-Paul (au centre, le remblai correspond à une réparation d'urgence).....	17
Figure 14. Vue d'une portion du mur côté rue Ménard à Baie-Saint-Paul.....	17
Figure 15. Vue d'une portion du mur côté rue Saint-Joseph à Baie-Saint-Paul.....	17
Figure 16. Vue en perspective d'un glissement de terrain	19

Figure 17. Types de glissements de terrain dans les dépôts meubles	20
Figure 18. Carte de la portion nord de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de Saint-Urbain, indiquant le contour des zones cartographiées et la position des signalements de mouvements de sol avant et après le 1 ^{er} mai 2023	22
Figure 19. Carte de la portion centrale de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de la jonction entre la route 138 et la route 381, indiquant le contour des zones cartographiées et la position des signalements de mouvements de sol avant et après le 1 ^{er} mai 2023	23
Figure 20. Carte de la portion sud de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de Baie-Saint-Paul, indiquant le contour des zones cartographiées et la position des signalements de mouvements de sol avant et après le 1 ^{er} mai 2023	24
Figure 21. Inventaire de l'ensemble des cas d'érosion des berges et de glissements de terrain inventoriés lors de la tournée en hélicoptère du 5 mai 2023, pour la portion nord de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de Saint-Urbain	25
Figure 22. Inventaire de l'ensemble des cas d'érosion des berges et de glissements de terrain inventoriés lors de la tournée en hélicoptère du 5 mai 2023, pour la portion centrale de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de la jonction entre la route 138 et la route 381	26
Figure 23. Inventaire de l'ensemble des cas d'érosion des berges et de glissements de terrain inventoriés lors de la tournée en hélicoptère du 5 mai 2023, pour la portion sud de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de Baie-Saint-Paul	27
Figure 24. Exemple d'érosion sévère dans un talus de moins de 4 mètres de hauteur, devant un chalet en rive gauche le long de la rivière du Gouffre en aval de Saint-Urbain (photo MTMD – 2023-05-05)	28
Figure 25. Exemple d'avulsion de la rivière Le Petit Bras à Saint-Urbain. La ligne pointillée bleue avec la flèche indique la position approximative de la rivière avant le 1 ^{er} mai 2023 (photo MTMD – 2023-05-05)	28
Figure 26. Exemple d'érosion ou de glissements superficiels dans l'argile en rive gauche de la rivière Le Gros Bras à Saint-Urbain en aval du pont de la route 381. À noter que plusieurs glissements superficiels successifs entretenus par l'érosion, qui fut très active le 1 ^{er} mai 2023, semblent s'être produits dans la pente (photo MTMD – 2023-05-05)	29
Figure 27. Exemple d'érosion ou de glissements rotationnels dans des dépôts silto-argileux en rive gauche de la rivière du Gouffre en zone agricole, environ 2,5 km en amont du secteur urbain de Baie-Saint-Paul (photo MTMD – 2023-05-05)	29
Figure 28. Exemple d'érosion ou de glissements superficiels dans des dépôts granulaires en rive gauche de la rivière Le Petit Bras à Saint-Urbain en amont du pont de la route 381. À noter que plusieurs glissements superficiels successifs entretenus par l'érosion, qui fut très active le 1 ^{er} mai 2023, se sont produits dans la pente. La flèche bleue indique un nouveau chenal temporaire que la rivière s'est creusé sur plusieurs mètres de profondeur lors de la crue du 1 ^{er} mai, et qui a été abandonné lors de la décrue (photo MTMD – 2023-05-05)	30
Figure 29. Exemple d'un glissement fortement rétrogressif qui s'est produit au printemps 2013 dans les dépôts silto-argileux en rive gauche de la rivière du Gouffre en zone agricole à Baie-Saint-Paul (photo MTMD – 2013-05-02)	31

Figure 30. Exemple d'un méandre de la rivière du Gouffre où la berge s'est déplacée latéralement de quelques dizaines de mètres depuis 2004, sous l'effet de l'érosion, se rapprochant progressivement du chemin du rang Saint-Laurent, à Baie-Saint-Paul (photo MTMD – 2023-05-05).....	31
Figure 31. Principaux types d'avulsions	32
Figure 32. Exemple de projection des taux de mobilité latérale historique sur 50 ans (M50) produite préliminairement pour la rivière du Gouffre dans le cadre du projet INFO-Crue.....	33
Figure 33. Cônes alluviaux circonscrits (en rouge) préliminairement pour le bassin versant de la rivière du Gouffre.....	34
Figure 34. Plaine alluviale fonctionnelle circonscrite (en rouge) préliminairement pour le bassin versant de la rivière du Gouffre. L'encadré jaune est agrandi à la figure suivante	35
Figure 35. Plaine alluviale fonctionnelle circonscrite (en rouge) préliminairement pour le secteur de l'amont de la confluence de la rivière du Gouffre et de la rivière des Mares jusqu'au pont de la route 138.....	36
Figure 36. Étendue touchée par l'inondation de la rivière du Gouffre lors de l'événement du 1 ^{er} mai 2023 et zones inondables de grand (récurrence 20 ans) et de faible courant (récurrence 100 ans).....	39
Figure 37. Comparaison du tracé de la rivière du Gouffre (centre-ville) en 2018 (a) et après l'événement du 1 ^{er} mai 2023 (b)	40
Figure 38. Représentation des hauteurs d'eau (m) estimées au-dessus du sol dans le secteur du méandre du centre-ville de Baie-Saint-Paul.....	41
Figure 39. Positions historiques des berges de la rivière du Gouffre	42
Figure 40. Profil topographique de la rivière du Gouffre à partir de son embouchure sur le fleuve Saint-Laurent. La municipalité de Saint-Urbain est située dans la zone représentée par un coefficient de pente de 0,3 % et marquée par un adoucissement de la pente du cours d'eau....	43
Figure 41. Localisation de la rupture d'ouvrage de protection	43
Figure 42. Rupture d'ouvrage et accumulation de sédiments fins, rue Ménard	44
Figure 43. Ouvrage de la rue Ménard. Banc d'accumulation en berge convexe. Accumulation de matière ligneuse en berge concave. Peu de mobilité latérale observée	44
Figure 44. Secteur de la confluence des rivières du Gouffre et du Bras du Nord-Ouest. Photo prise le 19 mars 1936 à côté du Moulin Gariépy et du Magasin général et photographie Google Street View du Bras du Nord-Ouest (septembre 2022). Érosion et événement de crue historique	45
Figure 45. Secteur de la confluence des rivières du Gouffre et du Bras du Nord-Ouest. Ouvrage de la rue Saint-Pierre. Vue sur le pincement du méandre. Le talus est d'environ 10 mètres de hauteur (flèche rouge). Secteur inondé lors de l'événement	45
Figure 46. Secteur de la confluence des rivières du Gouffre et du Bras du Nord-Ouest. Ouvrage de la rue Saint-Pierre. Chenal de débordement (flèche rouge) emprunté par le Bras du Nord-Ouest. La rue Clarence-Gagnon a été partiellement érodée. Présence d'un fossé de drainage à quelques mètres à gauche	46

Figure 47. Confluence des rivières du Gouffre et du Bras du Nord-Ouest. Constats faits lors de la visite sur le terrain en 2022 : érosion marquée des deux côtés du pincement; érosion diminuée en période d'étiage, car la base du pincement est en argile; possibilité de taux d'érosion accrus en période de crue, car les strates supérieures sont peu cohésives; effet de bout observé à la fin de l'ouvrage de stabilisation (image de droite)	46
Figure 48. Profil topographique de la rivière des Mares, à partir de sa confluence avec la rivière du Gouffre jusqu'à sa source. Le camping Le Genévrier est situé dans la portion en aval de la rivière, où les trois derniers kilomètres présentent un adoucissement de la pente du cours d'eau, passant d'un coefficient de pente de 3,2 % à 0,88 %	47
Figure 49. Comparaison du tracé de la rivière des Mares avant (2018 à gauche) et après l'événement du 1 ^{er} mai (2023 à droite)	48
Figure 50. Positions historiques des berges de la rivière des Mares. Les années antérieures ont été superposées sur l'année en cours pour mieux représenter la mobilité du cours d'eau et l'élargissement du chenal lors de l'événement du 1 ^{er} mai 2023	48
Figure 51. Avulsion du chenal de la rivière des Mares, camping Le Genévrier. Le chenal s'est déplacé d'environ 85 mètres à cet endroit. La largeur du chenal est passée d'environ 27 mètres à 125 mètres à cet endroit (point 1)	49
Figure 52. Avulsion du chenal de la rivière des Mares, camping Le Genévrier (point 2)	49
Figure 53. Avulsion du chenal de la rivière des Mares, camping Le Genévrier (point 3)	49
Figure 54. Chenal de débordement de la rivière des Mares, camping Le Genévrier (point 4)	50
Figure 55. Localisation des figures ci-dessus.....	50
Figure 56. Changement du style fluvial : linéaire et confiné, signes d'incision du chenal → divagant, bancs alluviaux de sables et de graviers	51
Figure 57. Avulsion du chenal de la rivière des Mares, camping Le Genévrier. Érosion verticale d'environ 60 cm près du pilier, en bas à droite	51
Figure 58. Cônes alluviaux circonscrits préliminairement (en rouge) pour le secteur de la rivière des Mares.....	51
Figure 59. Comparaison de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras avant 2020 (photo du haut) et après l'événement du 1 ^{er} mai 2023 (photo du bas)	53
Figure 60. Positions historiques des berges des rivières Le Petit Bras et Le Gros Bras. Les années antérieures ont été superposées sur l'année en cours pour mieux représenter la mobilité du cours d'eau et l'élargissement du chenal lors de l'événement du 1 ^{er} mai 2023	54
Figure 61. Profil topographique de la rivière Le Gros Bras à partir de sa confluence avec la rivière du Gouffre, jusqu'à sa source. Le secteur du pont privé de la rue du Bras est situé dans une zone d'adoucissement de la pente du cours d'eau, passant d'un coefficient de pente de 3,11 % à 1,08 %	55
Figure 62. Profil topographique de la rivière Le Petit Bras, de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras, jusqu'à sa source au lac du Bras. La confluence des deux rivières est marquée par un adoucissement de la pente du cours d'eau	55

Figure 63. Pont privé de la rue du Bras à Saint-Urbain. Photo oblique du pont avant l'événement, le 24 août 2022, et après l'événement, le 8 mai 2023. Élargissement marqué de la largeur du chenal (au niveau du pont) d'environ 15 mètres avant l'événement et d'environ 45 mètres après	56
Figure 64. Pont privé de la rue du Bras à Saint-Urbain. Photos obliques en direction de l'amont de la rivière avant l'événement (24 août 2022) et après l'événement (8 mai 2023). Changement du style fluvial de linéaire (seuils-mouilles) à divagant. Changement dans le calibre des sédiments du lit : avant, composé de blocs pluridécimétriques à métriques avec peu de sédiments fins; après, composé de blocs décimétriques avec sables et graviers sous forme de plusieurs bancs d'accumulation	56
Figure 65. Secteur de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras. Photo oblique en direction de l'amont de la rivière Le Petit Bras. La hauteur du talus est estimée à environ 20 mètres.....	57
Figure 66. Secteur de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras avant l'événement, le 24 août 2022 (l'écoulement s'effectue de gauche à droite de la photo)	57
Figure 67. Secteur de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras après l'événement, le 8 mai 2023 (l'écoulement s'effectue de gauche à droite de la photo).....	58
Figure 68. Érosion verticale de près de 7 mètres dans un chenal de débordement (à gauche de la maison) du secteur de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras.....	58
Figure 69. Carte des zones inondables pour le secteur de l'intersection de la rue Sainte-Anne et du rang Saint-Jean-Baptiste réalisée à l'aide de l'étude de Déziel et Boucher de 1979. La zone en bleu correspond à la zone de grand courant et en rouge à la zone de faible courant	59
Figure 70. Érosion de l'ancrage du pont à l'intersection de la rue Sainte-Anne et du rang Saint-Jean-Baptiste, à Saint-Urbain	60
Figure 71. Vue aérienne du secteur inondé du rang Saint-Georges le 5 mai 2023	60
Figure 72. Carte des zones inondables pour le secteur du rang Saint-Georges à Saint-Urbain, réalisée à l'aide de l'étude de Déziel et Boucher de 1979	61

Liste des tableaux

Tableau 1. Ministères et rôles au sein du Comité	3
Tableau 2. Composition du Comité	4

Liste des annexes

[Annexe 1 : Typologie des glissements de terrain](#)

[Annexe 2 : Cartographie des plaines inondables – Rivière du Gouffre – Calcul des cotes d'inondation de crues de récurrence 20 ans et 100 ans](#)

[Annexe 3 : Rapport technique – Analyse de la récurrence de la crue du 1^{er} mai 2023 sur la rivière du Gouffre](#)

[Annexe 4 : Cartes de la zone touchée](#)

Réalisation des travaux

Ce document a été réalisé par :

Le ministère de la Sécurité publique (MSP)

Le ministère de l'Environnement, de la Lutte aux contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), et plus spécifiquement des directions suivantes :

- Direction régionale de l'analyse et de l'expertise de la Capitale-Nationale
- Direction principale des prévisions hydriques et de la cartographie
- Direction de l'aménagement et des milieux hydriques
- Direction de la qualité de l'air et du climat
- Direction générale des barrages

Le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD)

Contributeur

A également contribué :

Le ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH)

Pour citation

Comité expert interministériel en soutien au rétablissement et à la prise de décision en aménagement du territoire (COMEXI-RDG). *Inondation causée par la rivière du Gouffre le 1^{er} mai 2023 – Retour d'expérience : portrait des aléas en cause*, Québec, 2023, 133 pages

1. Mise en contexte

Le 1^{er} mai 2023, d'importantes inondations, causées par la rivière du Gouffre et ses tributaires, ont touché le territoire des municipalités de Baie-Saint-Paul et de Saint-Urbain dans la région de Charlevoix (figure 1, pour une définition de la zone touchée, voir la section 8.1).

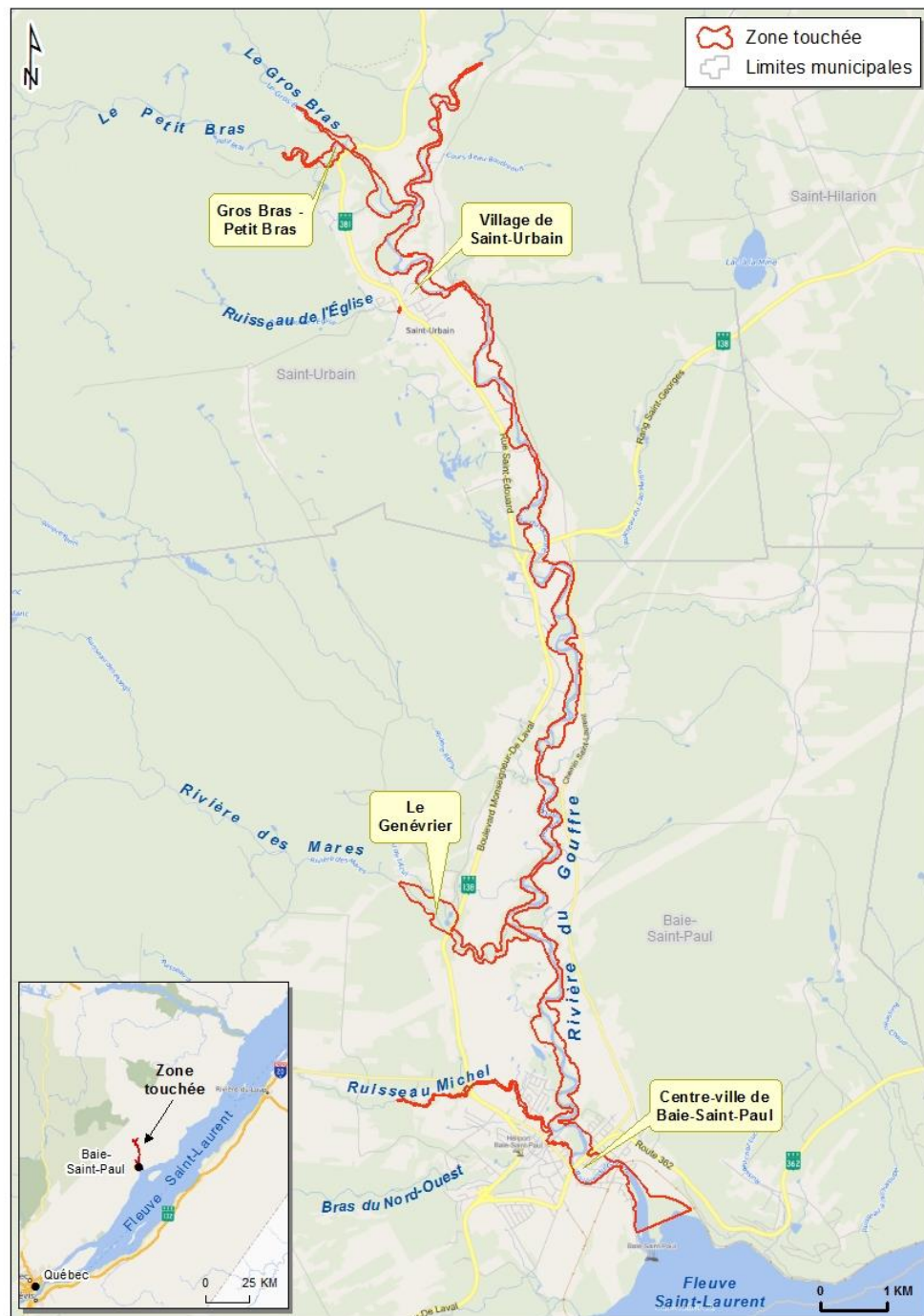


Figure 1. Carte de situation des municipalités de Baie-Saint-Paul et de Saint-Urbain

Ces inondations, accompagnées d'importants phénomènes d'érosion, de dépôts de sédiments et de déplacements de lits de cours d'eau, ont entraîné des dommages conséquents aux bâtiments et aux infrastructures, touchant ainsi la population concernée. Plusieurs glissements de terrain ont aussi été enregistrés.

2. Comité expert interministériel en soutien au rétablissement et à la prise de décision en aménagement du territoire

À la suite de la crue de la rivière du Gouffre et de ses tributaires le 1er mai 2023, le Comité expert interministériel (COMEXI-RDG) a été mis en place afin de soutenir les autorités gouvernementales et municipales dans la prise de décision pour le rétablissement et l'aménagement du territoire. Le mandat de ce comité comprend deux parties :

- Retour d'expérience sur l'événement « inondation du 1er mai 2023 »
 - › Produire un portrait des aléas inondation / avulsion / glissement de terrain (notamment en matière de localisation, d'intensité, de récurrence) qui se sont manifestés lors de la crue. Cet exercice consiste notamment à circonscrire la zone touchée en bordure de la rivière du Gouffre et ses tributaires.
 - › Produire un portrait des conséquences (sujets : population, infrastructures, résidences, bâtiments, activités économiques, activités agricoles, etc.).
- Soutien au rétablissement et à la prise de décision en aménagement du territoire
 - › Formuler des recommandations quant à la pertinence et à la faisabilité de mettre en place des mesures de réduction des risques, telles que la construction et la réparation d'ouvrages, la réalisation de travaux pour retirer ou déplacer des sédiments, la réalisation d'ouvrages de protection des berges contre l'érosion ou les glissements de terrain.
 - › Formuler des recommandations en lien avec l'application des lois et règlements en vigueur relativement aux mesures de rétablissement potentielles telles que la construction de nouvelles rues, la construction et la réparation d'ouvrages, la réalisation de travaux pour retirer ou déplacer des sédiments.
 - › Formuler des recommandations quant aux études à réaliser pour approfondir les problématiques liées aux différents aléas, le cas échéant.

Ce document présente les constats relatifs **au retour d'expérience sur le portrait des aléas**.

Le rôle de chaque ministère participant au Comité est présenté dans le tableau 1.

La composition du Comité est présentée dans le tableau 2.

Tableau 1. Ministères et rôles au sein du Comité

Ministère	Rôle
MAMH	- Assurer la logistique, le suivi des actions et l'élaboration d'un plan d'action qui découle des recommandations du Comité. - Assurer le lien avec les travaux du bureau de projets et les activités du Bureau municipal de rétablissement des inondations. - Assurer la participation des experts requis, à la demande des membres du Comité; au besoin, mandater des experts externes (ex. : chercheurs).
MSP	- Coordonner les travaux scientifiques et techniques du Comité. - Fournir les informations en ce qui a trait au cadre bâti touché. - Partager les informations en lien avec les avis techniques émis relatifs à l'érosion des berges dans le cadre de l'application du programme d'aide financière. - Regrouper les données géomatiques obtenues auprès du Comité et produire, avec le soutien des autres ministères, un portrait géomatique des aléas et des conséquences. - Faire le lien avec le Comité régional de prévention et de rétablissement (CRPR).
MTMD	- Fournir une expertise en mouvements de terrain et en hydraulique fluviale. - Fournir une expertise concernant des ouvrages de protection des berges contre l'érosion ou les glissements de terrain. - Dresser un portrait des enjeux relatifs aux routes et aux ponts du MTMD. - Partager des données acquises et des études/travaux déjà réalisés.
MELCCFP	- Fournir une expertise pour caractériser la manifestation de l'aléa (climatologie, pluviométrie, nivométrie, hydrologie, hydraulique, géomorphologie). - Fournir une expertise concernant des ouvrages de protection ou de retenue des eaux. - Partager des données acquises et des études/travaux déjà réalisés. - Formuler des recommandations en lien avec le régime transitoire de gestion des zones inondables, des rives et du littoral en vigueur depuis le 1^{er} mars 2022. - Formuler des recommandations relatives à la <i>Loi sur la qualité de l'environnement</i> et aux règlements qui en découlent.

Tableau 2. Composition du Comité

Représentant	Direction	Organisation
Laurie Cantin-Towner	Direction de l'adaptation des territoires face aux inondations et aux aléas côtiers	MAMH
Marie-Ève Samson	Direction de l'adaptation des territoires face aux inondations et aux aléas côtiers	MAMH
Josée Desgagné	Direction du soutien à la réduction des risques de sinistres	MSP
Pascal Marceau	Direction du soutien à la réduction des risques de sinistres	MSP
Marie-Noëlle Juneau	Direction du soutien à la réduction des risques de sinistres	MSP
Annie Lagadec	Direction du soutien à la réduction des risques de sinistres	MSP
Mélanie Lambert	Direction du soutien à la réduction des risques de sinistres	MSP
Steeve Hétu	Direction du soutien à la réduction des risques de sinistres	MSP
Simon Chouinard	Direction régionale de l'analyse et de l'expertise de la Capitale-Nationale	MELCCFP
Mélanie Fillion	Direction des projets à la Capitale-Nationale	MTMD
Dominic Vézina	Direction des projets à la Capitale-Nationale	MTMD
Sophie St-Jacques	Direction de l'hydraulique (structures)	MTMD
Philippe-Hubert Roy-Gosselin	Direction de l'hydraulique (structures)	MTMD
Janelle Potvin	Direction de la géotechnique et de la géologie (DGG)	MTMD
Denis Demers	Direction de la géotechnique et de la géologie (DGG)	MTMD
Pascal Locat	Direction de la géotechnique et de la géologie (DGG)	MTMD

3. Description du bassin versant

Un bassin versant est un territoire délimité par une ligne de partage des eaux, c'est-à-dire qu'il est borné par les crêtes des montagnes et les dénivellations du terrain qui déterminent l'écoulement de l'eau vers un cours d'eau ou un plan d'eau. C'est donc un territoire qui draine l'ensemble de ses eaux vers un exutoire commun (rivière, lac, fleuve).

3.1. Bassin versant de la rivière du Gouffre¹

La rivière du Gouffre prend sa source dans le massif des Laurentides, principalement dans le lac des Cœurs situé dans la zec des Martres. Elle se jette dans le fleuve Saint-Laurent, à la hauteur de la ville de Baie-Saint-Paul. Son bassin versant possède une superficie d'environ 997 km² (figure 2), dont plus de 74 % sont sous couvert forestier. La zone agricole identifiée représente 23 % du bassin versant, mais dans les faits l'agriculture réelle n'occupe qu'une portion de la zone qui lui est attribuée. Le milieu urbain couvre environ 1 % du territoire et le reste est occupé par d'autres types d'utilisations, notamment des lacs, des milieux humides et des routes.

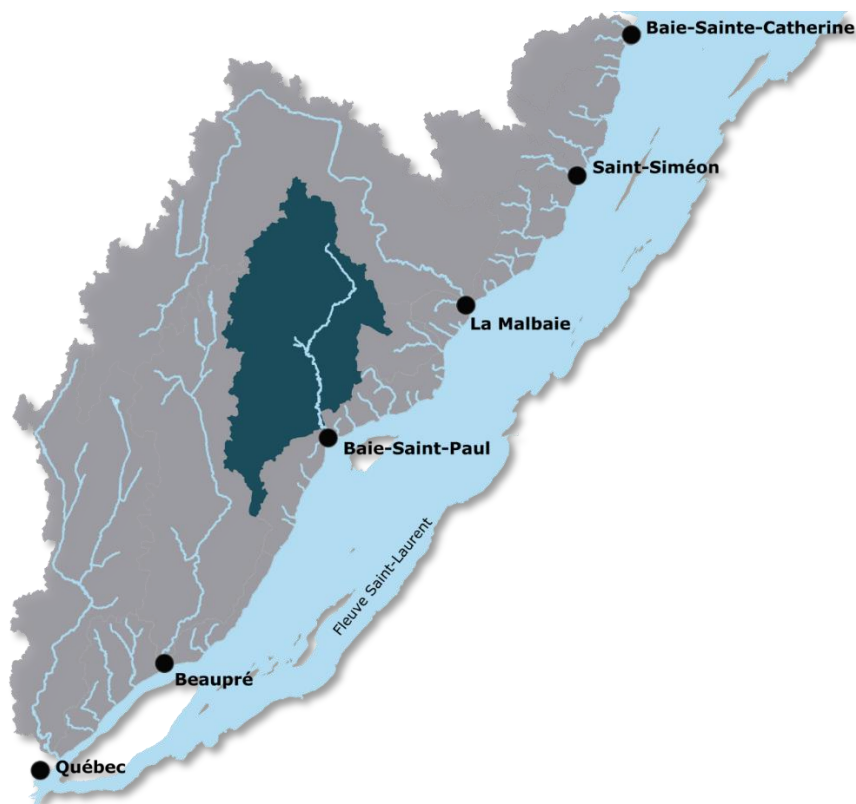


Figure 2. Le bassin versant de la rivière du Gouffre couvre 997 km², dont plus de 74 % sont sous couvert forestier et 23 % en zone agricole. La rivière du Gouffre prend sa source dans le massif des Laurentides et se jette au fleuve à la hauteur de la ville de Baie-Saint-Paul.

¹ [Territoire – OBV Charlevoix Montmorency](#).

Le bassin de la rivière du Gouffre partage ses limites hydrographiques avec : à l'ouest, le bassin versant de la rivière Sainte-Anne du Nord; au nord et au nord-est, avec la rivière Malbaie; à l'est, avec la rivière Jean-Noël; et au sud, avec de petits bassins versants, dont (d'ouest en est) la Petite rivière Saint-François, le ruisseau du Moulin, le ruisseau au Bois-Blanc, le ruisseau à la Chaloupe, la rivière des Boudreault et le ruisseau des Seigneurs.

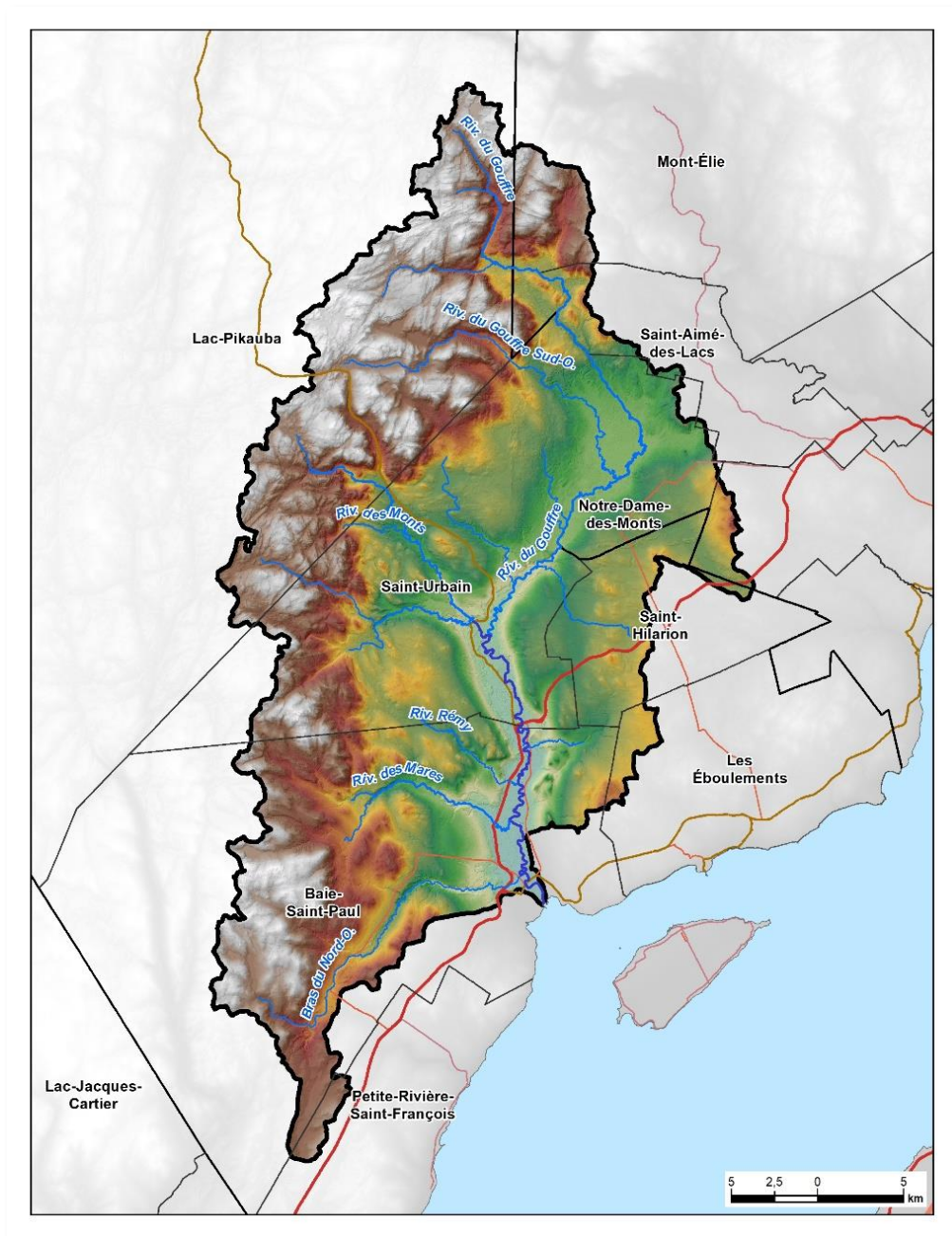


Figure 3. Bassin versant de la rivière du Gouffre et de ses principaux affluents

3.2. Contexte physiographique régional

Les territoires municipaux de Baie-Saint-Paul et de Saint-Urbain couvrent la majeure partie du bassin versant de la rivière du Gouffre. Comme l'indique Chagnon², du point de vue topographique, ce bassin versant peut être subdivisé en trois régions physiographiques différentes (figure 3), soit :

- les basses terres de la vallée de la rivière du Gouffre, qui ont subi l'invasion marine par l'ancienne mer de Goldthwait il y a environ 12 000 ans et qui se situent entre le niveau du fleuve et environ 170 mètres d'altitude;
- les plateaux intermédiaires, qui se situent entre 170 mètres et 500 mètres d'altitude;
- les hauts plateaux montagneux, qui se situent au-delà des 500 mètres d'altitude, avec des sommets pouvant atteindre jusqu'à près de 1 000 mètres d'altitude.

La largeur de la vallée, qui délimite l'unité physiographique des basses terres, est d'environ 2 km à la hauteur du village de Saint-Urbain. Elle se rétrécit à 1 km à la hauteur d'un col entre les montagnes de la Bécasse et des Florent, environ 5 km au sud de Saint-Urbain. Passé ce col, elle s'élargit de nouveau par la suite pour atteindre environ 3 km à la hauteur de la ville de Baie-Saint-Paul. Lors de l'événement du 1^{er} mai 2023, la plupart des désordres rapportés jusqu'à maintenant se sont produits à la hauteur de la vallée des basses terres, là où vit la majorité de la population et où passent les principaux axes routiers.

La rivière du Gouffre prend sa source dans le plateau intermédiaire, autour de l'élévation de 230 mètres près de la ligne de séparation des eaux avec le bassin versant de la rivière Malbaie au nord-est de Saint-Urbain. Elle s'écoule sur environ 30 km vers le sud, en effectuant de nombreux méandres jusqu'à son embouchure sur le fleuve Saint-Laurent à Baie-Saint-Paul. La largeur de l'espace de liberté latéral couvert par les méandres et la rivière est généralement de l'ordre de 300 à 400 mètres de largeur.

De nombreux tributaires, qui drainent les plateaux intermédiaires et montagneux, viennent s'y connecter latéralement, dont les principaux sont les rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras à Saint-Urbain, ainsi que les rivières Rémy, des Mares et Bras du Nord-Ouest à Baie-Saint-Paul. Avec la remontée isostatique au fil des derniers millénaires, ces tributaires latéraux se sont incisés graduellement dans d'épais dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires qui tapissent leur propre vallée, et ont formé plusieurs niveaux de terrasses qui peuvent être observés sur les levés Lidar (figure 4). À leur embouchure sur la vallée de la rivière du Gouffre, lors d'événements comme celui du 1^{er} mai 2023, des cônes d'alluvions se forment par la déposition de sédiments provenant de l'érosion des matériaux glaciaires et fluvio-glaciaires plus en amont le long de ces rivières.

² Chagnon, J.-Y. *Étude des phénomènes d'érosion et des dépôts de surface dans la région de Baie-Saint-Paul – Saint-Urbain, comté de Charlevoix*. Ministère des richesses naturelles du Québec, direction générale des mines, 1969, 40 p. et deux plans en annexe.

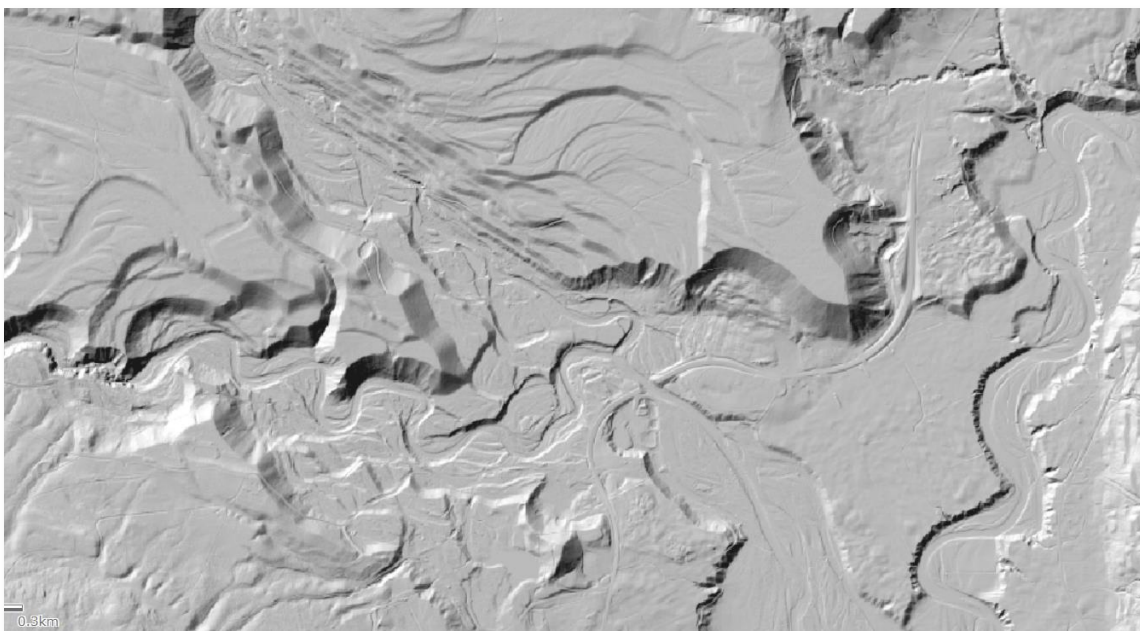


Figure 4. Relief ombragé obtenu d'un levé Lidar de 2019, montrant les différents niveaux d'encastrement des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras à Saint-Urbain, près de leur embouchure avec la rivière du Gouffre

3.3. Contexte stratigraphique de la vallée de la rivière du Gouffre

Basé sur différents types de sondages géophysiques réalisés parallèlement et perpendiculairement à l'axe central de la vallée de la rivière du Gouffre par la Commission géologique du Canada³, le substratum rocheux a été identifié au centre de la vallée à une profondeur allant de 250 à 300 mètres environ (figure 5) par rapport à la surface du terrain près du centre-ville de Baie-Saint-Paul. Une analyse sismostratigraphique s'appuyant sur la description d'unités sédimentaires observées lors d'un forage profond à Baie-Saint-Paul⁴ indique que la vallée du Gouffre est partiellement comblée par des dépôts proglaciaires de retrait (unités *c* et *d* dans la figure 5) et par les dépôts sus-jacents de la mer de Goldthwait (unités *a* et *b* dans la figure 5). Ces unités semblent reposer sur des dépôts plus raides qui sont en contact avec le substratum rocheux (unités *e* et *f* dans la figure 5).

³ Perret, D., et autres. Sismostratigraphie de la partie aval de la vallée de la rivière du Gouffre et du chenal nord de l'île aux Coudres, Arrêt 1.2 dans *Excursion en Charlevoix*, Association québécoise pour l'étude du Quaternaire (AQQUA), 7 et 8 septembre 2012.

⁴ *Idem*.

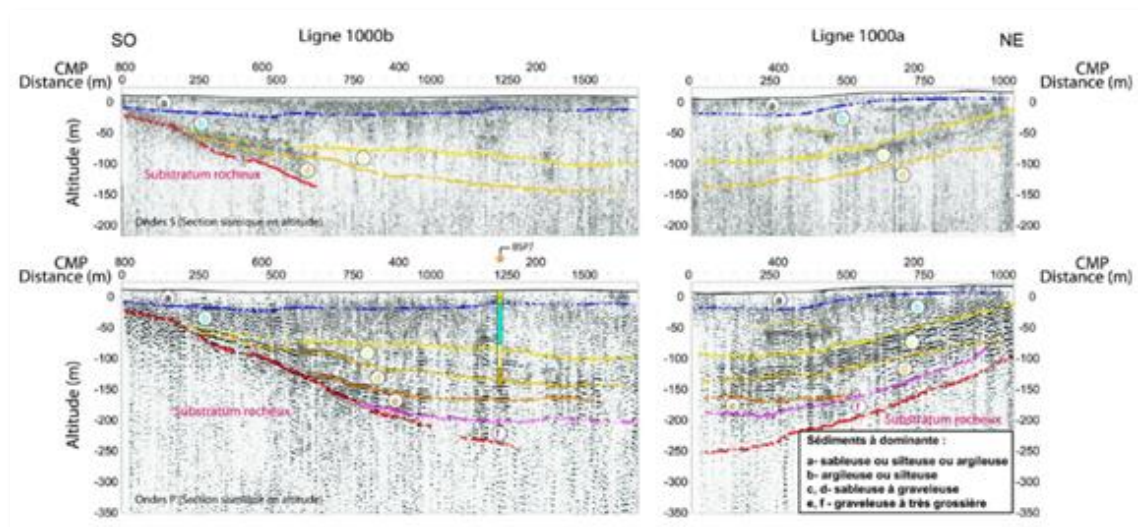


Figure 5. Coupes sismiques en ondes de compression et de cisaillement selon les lignes 1000a et 1000b (bleu clair : argile, jaune : sable, jaune pâle : sable fin, orange : gravier, rouge : substratum rocheux)

Les talus et les berges de la rivière du Gouffre sont principalement situés à l'endroit indiqué par l'unité a de la figure 5, qui englobe principalement des alluvions récentes (sable et gravier) déposées sur les plaines alluviales de la rivière du Gouffre, et des dépôts silto-argileux sur les talus qui dépassent le niveau de ces plaines alluviales. Le sommet des dépôts silto-argileux de l'unité a sont généralement coiffés en surface du terrain par une couche de sable sur quelques mètres d'épaisseur (alluvions anciennes ou dépôts de plage d'origine marine). L'unité a a été perturbée en plusieurs endroits par de grands glissements de terrain qui ont laissé des nappes de débris (colluvions) dont l'épaisseur peut atteindre par endroits une vingtaine de mètres en surface de la vallée. Plusieurs de ces glissements de terrain semblent être associés au fort séisme de 1663, qui a été signalé dans les écrits de l'époque⁵. Plusieurs troncs d'arbres enfouis dans ces débris ont été datés au carbone 14 et montrent une concordance avec le séisme de 1663^{6,7}. Entre Saint-Urbain et Baie-Saint-Paul, les berges de la rivière du Gouffre entaillent ces colluvions d'anciens glissements de terrain sur presque toute sa longueur. Ainsi, les sols constituant les berges dans cette portion de la rivière montrent une importante variabilité latérale dans leur composition, pouvant passer latéralement de l'argile au sable pour en revenir à de l'argile sur une dizaine de mètres de distance.

4. Événement météorologique

Sur le bassin versant de la rivière du Gouffre (BVG), dans Charlevoix, dans les 15 jours précédant l'inondation du 1^{er} mai 2023, le couvert de neige a libéré près de 170 mm d'eau.

⁵ Brooks, G.R. et D. Perret. « A long-term context for the 1663 Charlevoix CE earthquake interpreted from the postglacial landslide record in the Gouffre Valley, Quebec, Canada », *Quaternary Science Reviews*, vol. 309, juin 2023, 108096.

⁶ *Idem*.

⁷ Fillion, L., Quinty, F. et C. Begin. « A chronology of landslide activity in the valley of Rivière du Gouffre, Charlevoix, Quebec », *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 28, 1991, p. 250-256.

Puis à cela se sont ajoutées de fortes pluies du 30 avril au 2 mai : 143 mm en tête de bassin (à La Galette, dont près de 100 mm en 12 heures), 95 mm au cœur (Saint-Urbain) et près de 85 mm aux limites sud-ouest et est (hauteurs du Massif de Charlevoix et de Saint-Aimé-des-Lacs). En quelques heures, une quantité de pluie plus importante que le total normal en mai (81 mm à La Galette et 88 mm à Saint-Urbain) était ainsi tombée. La période de retour de l'événement à La Galette est évaluée à plus de 140 ans, le total de pluie sur deux et trois jours (127 et 142 mm) dépassant l'ancienne marque sur trois jours en avril-mai en 71 ans d'observation (101 mm du 23 au 25 avril 2005). Le total de pluie sur deux jours à Saint-Urbain a été le cinquième plus important observé en avril-mai.

4.1. Apport en eau de la fonte du couvert de neige au sol

Le MELCCFP et ses partenaires mesurent l'équivalent en eau de la neige au sol (EEN) à l'aide de [relevés](#) manuels périodiques aux stations nivométriques⁸ et, plus récemment, avec des instruments automatisés à certaines stations météorologiques automatiques. Bien qu'il n'y ait pas de stations de mesure dans le BVG, quelques-unes se trouvent à son pourtour : la station automatique La-Galette à la tête du BVG et les stations nivométriques La-Galette (colocalisée avec la station automatique), Barrage-Lac-Savane, Rivière-du-Sot et Saint-Hilarion, respectivement au nord, à l'est, au sud et à l'ouest du BVG. La mesure de l'EEN est très importante, car, chaque printemps, plusieurs mois de précipitations de neige fondent en quelques semaines, représentant plus des deux tiers de l'eau causant la crue printanière. L'écart par rapport à la normale, ou anomalie de l'EEN, est le principal indicateur permettant de prévoir l'intensité de la crue printanière, et donc un bon outil de prévention des inondations⁹.

À la tête du BVG (station automatique La-Galette), le couvert de neige contenait à son maximum 327 mm d'eau le 9 avril, 301 mm le 15 avril, 123 mm le 30 avril, tout juste avant le début des pluies, et 79 mm en début de journée le 3 mai, à la suite de ces pluies (figure 6). Les relevés manuels réalisés les 22 et 24 avril (figure 7) sont les plus récents disponibles avant le 30 mai et font état d'équivalents en eau de la neige (EEN) plus élevés qu'à la station automatique (330 mm à Barrage-Lac-Savane, 303 mm à Rivière-du-Sot, 255 mm à La-Galette), sauf à la station Saint-Hilarion avec 196 mm. Ces valeurs d'EEN sont essentiellement dans les normales pour cette période. On ne connaît cependant pas l'EEN au 1^{er} mai à ces stations nivométriques.

On observe aussi sur la figure 7 que c'est en tête du bassin versant de la rivière des Mares que l'EEN était le plus élevé. En se basant sur l'évolution de l'EEN à La-Galette, on peut estimer que le couvert de neige au sol du BVG a libéré environ 170 mm d'eau de fonte dans les 15 jours précédant le début des inondations (294 mm le 15 avril contre 123 mm le 30 avril) et environ 45 mm durant la période de pluie (123 mm le 30 avril contre 79 mm le 2 mai après les pluies).

⁸ [Manuel d'instructions à l'usage des observateurs en nivométrie \(environnement.gouv.qc.ca\)](#).

⁹ [État du couvert de neige au sol \(environnement.gouv.qc.ca\)](#).

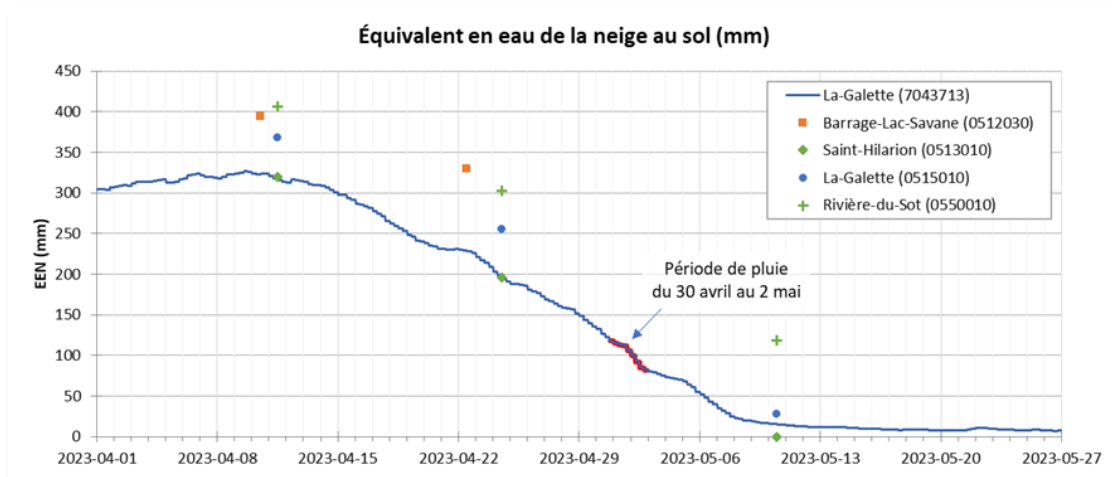


Figure 6. Évolution de l'équivalent en eau de la neige au sol (mm) mesuré aux stations manuelles et automatiques les plus près du bassin versant de la rivière du Gouffre

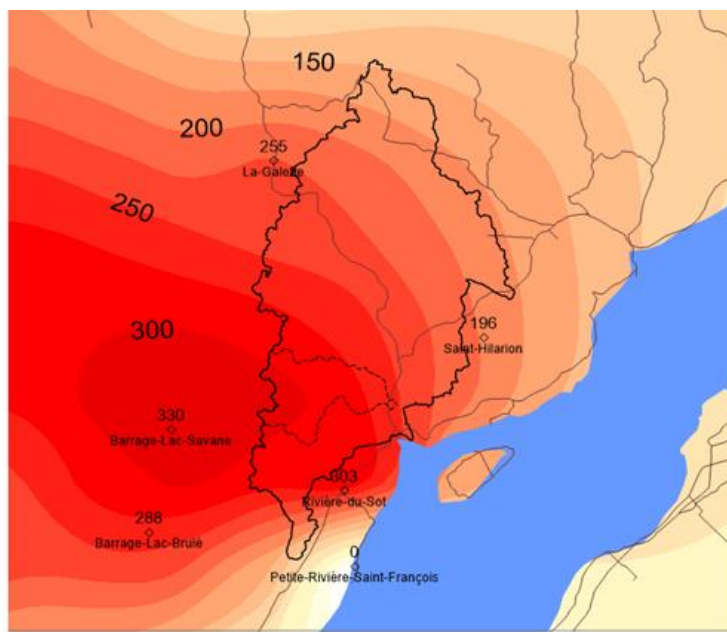


Figure 7. Équivalent en eau de la neige au sol (mm) mesuré les 22 et 24 avril 2023 aux stations manuelles les plus près du bassin versant de la rivière du Gouffre (ligne noire). La ligne pointillée noire identifie le bassin de la rivière des Mares. Les lignes de contour sont estimées par krigeage, mais il est probable que l'EEN à l'extrême nord du BVG était en réalité plus élevé que cette estimation

4.2. Apport en pluie^{10,11}

Le MELCCFP opère sur l'ensemble du territoire québécois un réseau de stations météorologiques automatiques et de stations avec observateur bonifié d'instruments automatiques. D'autres stations automatiques sont opérées par ses partenaires du Réseau météorologique coopératif québécois. Une seule station se trouve dans le BVG, la station avec observateur Saint-Urbain, et trois stations automatiques sont situées à son pourtour :

¹⁰ [Faits saillants climatiques de mai 2023 \(environnement.gouv.qc.ca\)](https://environnement.gouv.qc.ca/).

¹¹ [Données climatiques quotidiennes en ligne \(environnement.gouv.qc.ca\)](https://environnement.gouv.qc.ca/).

La-Galette, opérée par le MELCCFP au nord du BVG; Charlevoix (MRC), opérée par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) au sud-ouest; et Saint-Aimé-des-Lacs, opérée par la SOPFEU à l'est.

C'est à la station La-Galette que les pluies les plus intenses et les plus importantes ont été enregistrées. Les données horaires de cette station montrent qu'il y a eu de faibles pluies durant quelques heures dans la journée du 30 avril, mais que c'est vers 21 h que les pluies plus importantes ont débuté, devenant particulièrement intenses (≥ 10 mm/h) entre 5 h et 10 h le 1^{er} mai et se terminant à 18 h ce jour-là (figure 8). Après une pause de 10 heures, il pleut de nouveau, mais moins intensément, à partir de 4 h le 2 mai jusqu'à la toute fin de la journée. On remarque à la figure 8 qu'aux deux autres stations automatiques, les pluies ont été moins intenses, ont commencé quelques heures plus tôt et ont connu des accalmies durant la nuit et la soirée, alors qu'il pleuvait abondamment à La-Galette.

Ainsi, près de 100 mm de pluie sont tombés en 12 heures à la tête du bassin (La-Galette), pour un total, du 30 avril au 2 mai, de 141,6 mm à cet endroit, de 94,2 mm au cœur du bassin (Saint-Urbain), de 91,6 mm à ses limites sud-ouest (hauteurs du Massif de Charlevoix) et de 82,8 mm à sa limite est (Saint-Aimé-des-Lacs). Le total de pluie normal de mai (81 mm à La-Galette et 88 mm à Saint-Urbain) est ainsi dépassé en quelques heures seulement. La figure 9 présente la carte du cumul de pluie sur le bassin du Gouffre du 30 avril au 2 mai. Les images du radar Mont Apica¹² démontrent la présence d'un effet orographique important sur le plan des précipitations, c'est-à-dire qu'en raison de son soulèvement par la barrière que constitue le massif des Laurentides, la masse d'air humide en provenance du sud a occasionné des précipitations beaucoup plus importantes dans les zones en altitude.

À La-Galette, le total de pluie reçue du 30 avril au 2 mai (141,6 mm) est la plus importante quantité de pluie de trois jours tombée durant les mois d'avril et de mai, en 71 ans de mesure (1939 à 1972 et 1980 à aujourd'hui). En fait, même le total tombé en 24 heures (124,3 mm) est supérieur au deuxième cumul de trois jours le plus important durant les mois d'avril et de mai (101,4 mm du 23 au 25 avril 2005). Concernant la période de retour (calculée avec la méthode de Gumbel à partir des données historiques des mois d'avril et de mai), la pluie de deux jours a une période de retour de 140 ans et plus, et la pluie de trois jours, une période de retour de 155 ans et plus (avec une probabilité de 97,5 % dans les deux cas).

À la station Saint-Urbain, le total de pluie reçue le 30 avril et le 1^{er} mai (87,8 mm) est la cinquième pluie de deux jours la plus importante observée durant les mois d'avril et de mai depuis l'ouverture de la station en juin 1957.

¹² [Images radar du Mont Apica \(climat.meteo.gc.ca/\)](http://climat.meteo.gc.ca/).

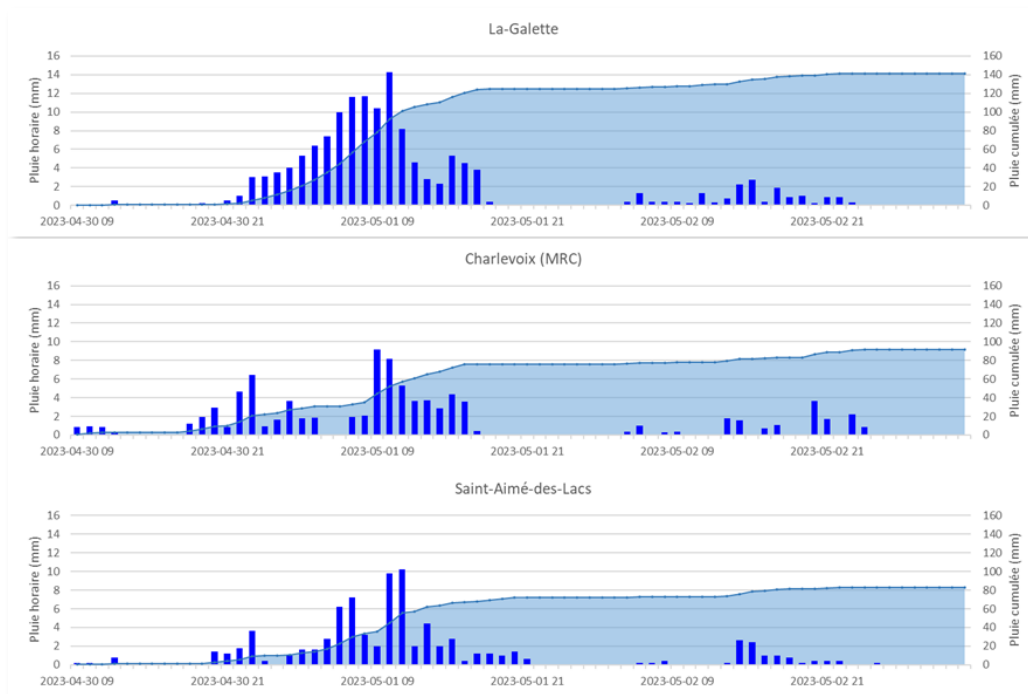


Figure 8. Pluie horaire et cumulée (mm) enregistrée du 30 avril au 2 mai 2023 aux stations automatiques La-Galette, Charlevoix (MRC) et Saint-Aimé-des-Lacs

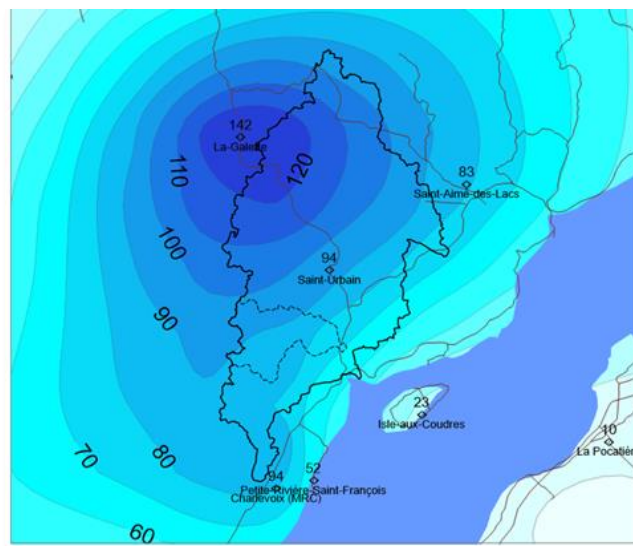


Figure 9. Cumul de pluie (mm) mesuré du 30 avril au 2 mai 2023 aux stations automatiques et avec observateur les plus près du bassin versant de la rivière du Gouffre (ligne noire). La ligne pointillée noire délimite le bassin de la rivière des Mares. Les lignes de contour sont estimées par krigeage, mais le cumul de pluie à l'extrême nord du BVG était en réalité très probablement plus élevé que cette estimation

5. Hydrologie

5.1. Récurrence

Une estimation de la récurrence de la crue du 1^{er} mai 2023 à la rivière du Gouffre a été évaluée à la station 051305. À noter qu'il y a deux difficultés majeures à cette estimation : l'absence d'un long historique et le caractère rapide de la crue, soit de quelques heures. Différentes approches sont mises en place pour contourner ces difficultés et évaluer la sensibilité des estimations aux choix méthodologiques. Les différents résultats permettent d'obtenir l'estimation de la récurrence de la crue 2023, soit 60 ans pour le débit maximal 3 heures et 150 ans pour le débit maximal journalier.

La note technique complète concernant la récurrence de l'événement se trouve à l'annexe 3 du présent document.

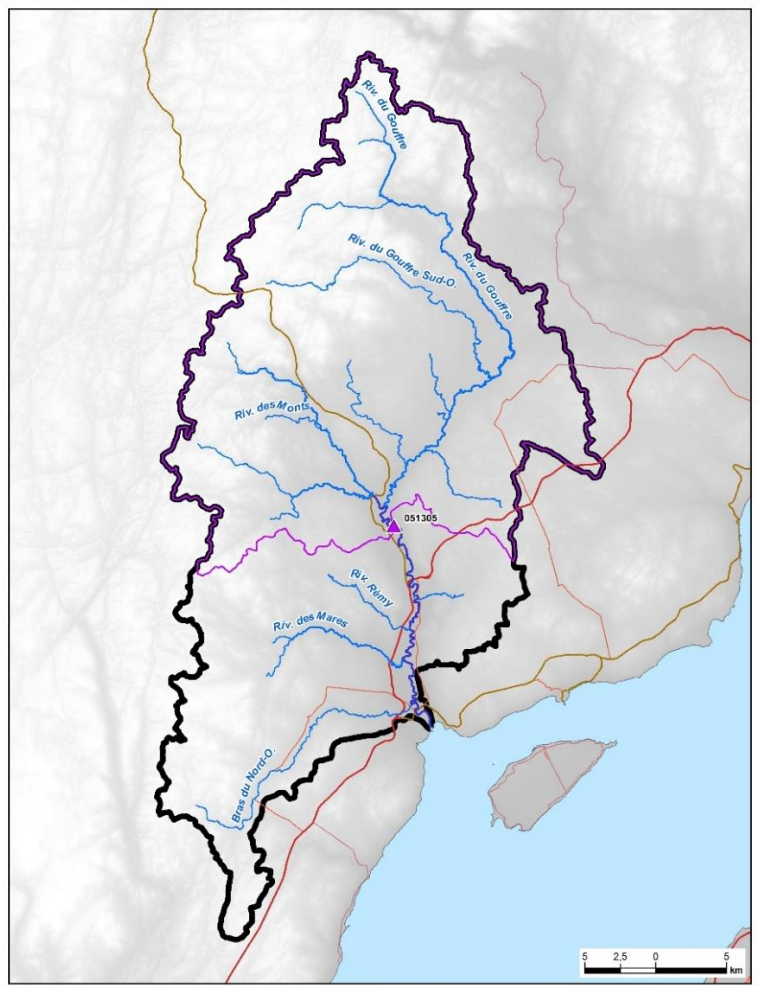


Figure 10. Localisation de la station 051305, à Saint-Urbain. Le trait en rose représente la limite inférieure du bassin versant considérée à la station. L'eau s'écoulant au sud de cette limite n'est donc pas prise en compte dans l'hydrogramme de la station ainsi que dans l'estimation de récurrence de l'événement

5.2. Rapidité de la crue¹³

L'événement du 1^{er} mai 2023 est caractérisé par la rapidité avec laquelle les débits ont augmenté, comme illustré sur l'hydrogramme des débits enregistrés à la station hydrométrique 051305 (figure 10) entre le 29 avril 2023 et le 6 mai 2023 (figure 11). Cet hydrogramme a été tracé avec des données validées *a posteriori* et peut différer des hydrogrammes qui ont été tracés préalablement avec des données préliminaires.

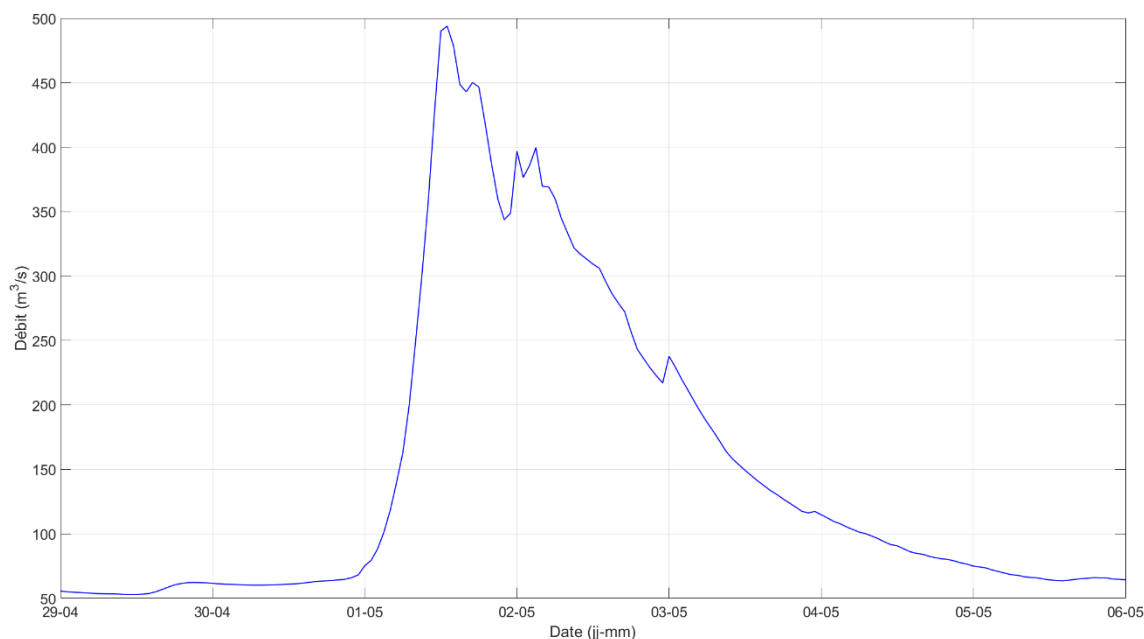


Figure 11. Hydrogramme de l'événement du 1^{er} mai 2023 à la station hydrométrique du MELCCFP 051305 sur la rivière du Gouffre

Le 1^{er} mai 2023, en réponse aux précipitations, le débit est passé de 75 m³/s à 500 m³/s en seulement 12 heures. Le début de la montée des eaux a eu lieu vers 1 h (HNE), et le pic a été atteint vers 12 h 30 (HNE). Selon les observations du ministère de la Sécurité publique (MSP), moins de 4 heures séparent l'atteinte du seuil de surveillance de l'atteinte du seuil d'inondation majeure dans la matinée du 1^{er} mai 2023.

En plus de sa rapidité, cet événement est caractérisé par l'ampleur de l'augmentation du débit, soit une augmentation de près de 600 % d'un débit qui était déjà relativement élevé. En effet, la veille de la crue, le 30 avril 2023, le débit était stable, mais déjà relativement élevé en raison de la crue printanière annuelle qui s'était amorcée vers le 10 avril 2023.

La décrue a débuté en après-midi du 1^{er} mai 2023 et s'est déroulée sur cinq jours. Le 6 mai 2023, les débits étaient revenus à des valeurs semblables à la veille de l'événement le 30 avril 2023.

6. Barrages (ouvrages de retenue)

Selon le répertoire des barrages maintenu par le MELCCFP, dans le bassin versant de la rivière du Gouffre se trouvent 73 barrages. Selon le *Règlement sur la sécurité des barrages*, de ceux-ci, 10 ont un niveau des conséquences minimal.

¹³ [Suivi hydrologique de différentes stations hydrométriques \(environnement.gouv.qc.ca\).](https://environnement.gouv.qc.ca/)

Il n'y a pas de barrage sur la rivière du Gouffre ou sur ses principaux tributaires que sont les rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras. Un barrage de faible contenance est présent sur la rivière des Mares, mais sans effet de laminage des pics de crue.

Il n'a été rapporté au Comité aucune information quant à des ruptures de barrage ayant engendré des dommages.

7. Ouvrage de protection contre les inondations – MSP

À Baie-Saint-Paul, le secteur urbanisé (rue Saint-Joseph et rue Leclerc) dans un méandre de la rivière du Gouffre est entouré par un mur de protection d'environ 1,4 km de long (figure 12).

L'aspect de ce mur varie (voir les exemples des figures 13, 14 et 15). Le 1^{er} mai 2023, ce mur n'a pas empêché l'inondation du secteur.

À noter que l'Organisme de bassin versant Charlevoix-Montmorency a réalisé, dans le cadre du Plan directeur de l'eau de 2014, un portrait et un diagnostic concernant les ouvrages de protection contre l'inondation et l'érosion à partir des informations disponibles¹⁴.



Figure 12. Emplacement approximatif (trait orange) du mur de protection entourant le secteur des rues Saint-Joseph et Leclerc à Baie-Saint-Paul

¹⁴ [Plan directeur de l'eau, chapitre 5.](#)



Figure 13. Vue d'une portion du mur côté rue Ménard à Baie-Saint-Paul (au centre, le remblai correspond à une réparation d'urgence)



Figure 14. Vue d'une portion du mur côté rue Ménard à Baie-Saint-Paul

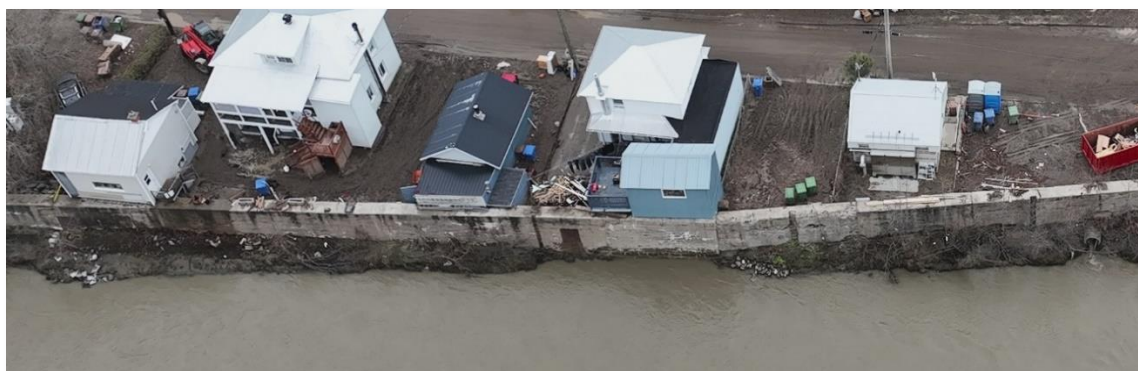


Figure 15. Vue d'une portion du mur côté rue Saint-Joseph à Baie-Saint-Paul

8. Zone touchée par les aléas / Aléas ayant touché le territoire

8.1. Zone touchée

Dans le cadre des travaux du COMEXI-RDG, une estimation de la délimitation de la zone touchée par l'aléa inondation et divers aléas fluviaux (p. ex. : mobilité du cours d'eau, érosion, dépôt de sédiment), lors de la forte crue des rivières du Gouffre, des Mares, Le Gros Bras, Le Petit Bras ainsi que des ruisseaux Michel et de l'Église le 1^{er} mai 2023, a été produite. Les limites de cette zone ont été interprétées par la Direction du soutien à la réduction des risques de sinistres (DSRRS) du MSP. L'interprétation a été réalisée à partir d'images captées avec le drone du MSP le 4 mai 2023, l'orthomosaïque du ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) du 5 mai 2023 et le levé Lidar réalisé par le MTMD le 22 mai 2023. Cette délimitation est représentée sur la carte de la figure 1 du présent rapport, ainsi que de manière détaillée dans les cartes de l'annexe 4.

8.2. Mouvement de terrain

D'après un des documents d'accompagnement associés aux cartes des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain¹⁵, un glissement de terrain peut être défini comme le mouvement vers le bas d'une pente d'une masse de sols le long d'une surface de rupture, qui s'amorce dans un talus sous l'effet de la gravité (figure 16). La surface de rupture est celle le long de laquelle glisse la masse de sols.

Chaque année, des centaines de ces glissements, généralement de faibles superficies, se produisent au Québec¹⁶. Ces glissements surviennent majoritairement dans des sols argileux sur les berges des cours d'eau. Leur manifestation résulte généralement de la combinaison de facteurs aggravants ou déclencheurs, notamment la présence d'érosion, l'inclinaison de la pente, les propriétés géologiques et géotechniques des sols, les conditions d'eau souterraine, etc. Ils surviennent majoritairement au printemps et à l'automne, lorsque les pressions d'eau dans les sols sont élevées, et donc néfastes à la stabilité des talus. Leur distribution dans le temps est irrégulière et leur fréquence peut être augmentée par des événements météorologiques extrêmes, comme ce fut le cas lors des pluies diluviennes de juillet 1996 au Saguenay–Lac-Saint-Jean, où plus de 1 000 glissements de terrain sont survenus en 36 heures.

¹⁵ Gouvernement du Québec. [Glissements de terrain dans les dépôts meubles : types et causes](#), 2017, 10 p.

¹⁶ Poulin Leboeuf, L., D. Demers et M. Allard. *Portrait statistique de la distribution temporelle et spatiale des glissements de terrain au Québec*, Géorisques-VIII, Québec, Canada, 2022.

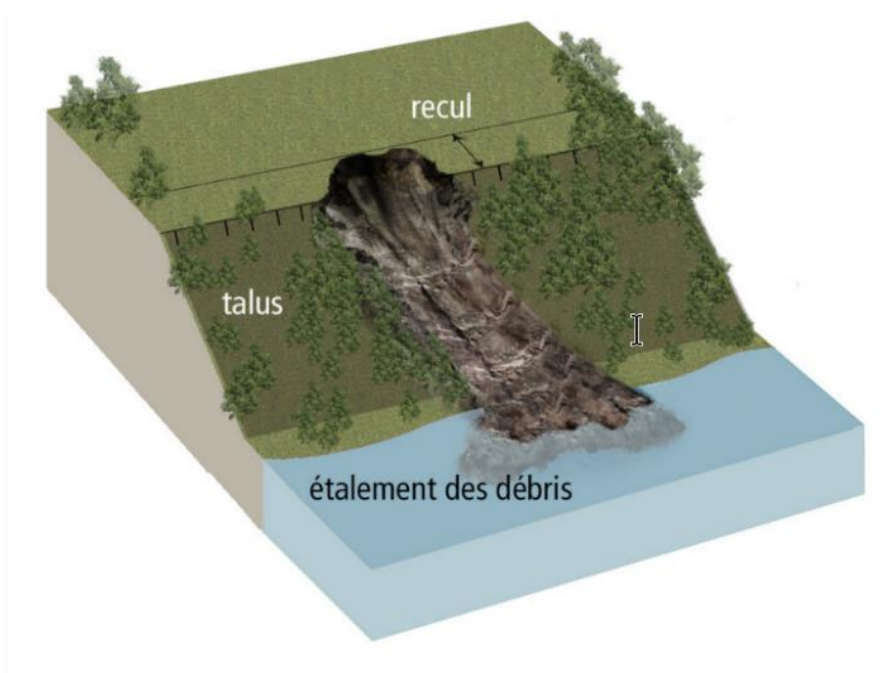


Figure 16. Vue en perspective d'un glissement de terrain

Un glissement de terrain peut constituer une menace à la sécurité des personnes et des biens. Premièrement, le déplacement de la masse de sols dans le talus et le recul provoqué au sommet peuvent emporter les éléments situés sur la portion de terrain en mouvement (figure 16). Deuxièmement, l'impact provoqué par l'étalement de la masse à la base du talus (figure 16), qu'on appelle débris, peut endommager les biens de manière importante et menacer la sécurité des personnes. Selon leur type, les glissements de terrain peuvent présenter des caractéristiques très différentes et atteindre des dimensions variables. Ceux qui surviennent dans les sols argileux sont les plus préoccupants, car ils sont les plus fréquents et peuvent atteindre de très grandes dimensions.

La présente section montre les principaux types de glissements de terrain pouvant se produire dans les dépôts meubles. Ces phénomènes font partie de l'évolution géomorphologique naturelle des terrains en pente constitués de dépôts meubles.

Pour les besoins de la cartographie gouvernementale des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain dans les dépôts meubles, les types de glissements ont été regroupés en deux familles selon les dimensions que peut atteindre leur recul en sommet de talus (figure 17). Les deux grandes familles sont celle des glissements faiblement ou non rétrogressifs, qui englobent principalement les glissements superficiels et les glissements rotationnels, et celle des glissements fortement rétrogressifs, qui englobent principalement les coulées argileuses et les étalements (annexe 1). Les glissements fortement rétrogressifs se produisent seulement dans les sols argileux.

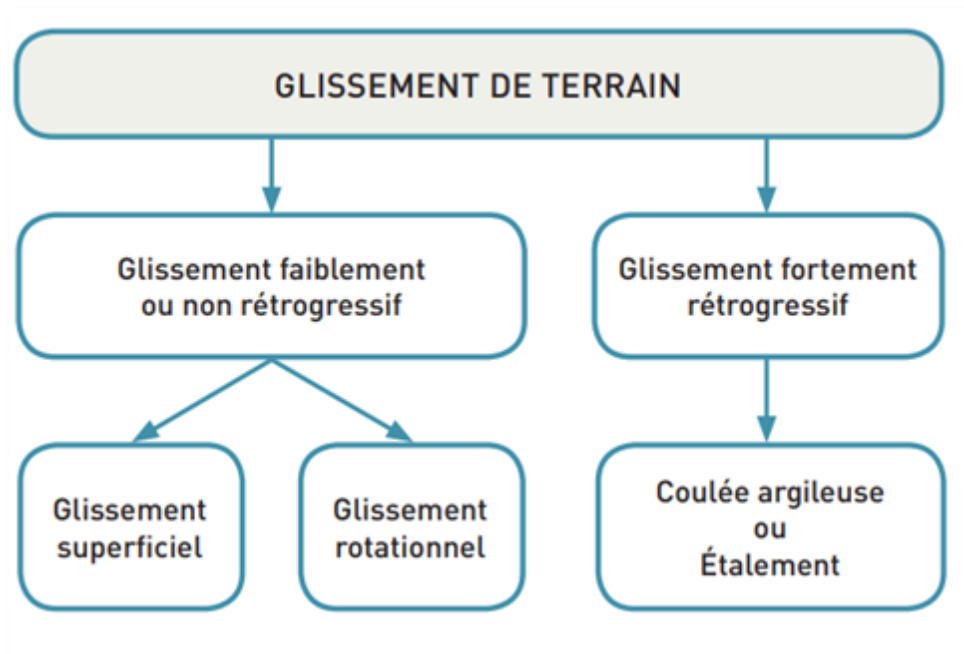


Figure 17. Types de glissements de terrain dans les dépôts meubles

La présentation des principaux types de glissements de terrain pouvant se produire dans les dépôts meubles a été jointe en annexe.

8.2.1. État de la situation à la suite des événements du 1^{er} mai 2023

À la suite des événements du 1^{er} mai 2023 qui ont touché la vallée de la rivière du Gouffre, un total de 29 cas de mouvements de sol ont été signalés au ministère de la Sécurité publique, dont 15 sur le territoire municipal de Baie-Saint-Paul et 14 sur le territoire municipal de Saint-Urbain. Les cartes montrées aux figures 18, 19 et 20 localisent ces signalements. De plus, une tournée en hélicoptère réalisée le 5 mai 2023 a permis de constater que plusieurs autres mouvements de sol n'avaient pas été signalés, puisqu'ils étaient situés en zones boisées ou agricoles, et qu'ils étaient majoritairement de type « glissements superficiels ». De ce fait, ils sont difficilement observables puisqu'ils ne présentent généralement que peu ou pas de recul en sommet des talus.

Un inventaire exhaustif des désordres observés à partir de la tournée en hélicoptère, y compris les glissements de terrain et les zones ayant subi de l'érosion des berges, est présenté aux figures 21 à 23. Les cartes montrées aux figures 18 à 20 montrent que la plupart des signalements localisés à l'intérieur du territoire cartographié se sont produits sur les bandes de contraintes indiquées sur les cartes gouvernementales datant de 2006 pour les zones potentiellement exposées aux glissements de terrain. Cependant, la zone cartographiée au début des années 2000 était principalement limitée aux berges de la rivière du Gouffre. De ce fait, plusieurs signalements, entre autres dans le secteur de la rivière Le Gros Bras (figure 18), apparaissent en dehors du territoire cartographié.

Les mouvements de sols observés peuvent être groupés dans les cinq classes suivantes :

- Érosion régressive de la berge (talus de moins de 4 mètres, peu importe le type de dépôt);
- Avulsion ou tentative d'avulsion (abandon de son lit par la rivière au profit d'un nouveau tracé);
- Érosion ou glissement de terrain superficiel dans les dépôts argileux (talus de plus de 4 mètres);
- Érosion ou glissement rotationnel (talus de plus de 4 mètres);
- Érosion ou glissement de terrain superficiel dans les dépôts granulaires (talus de plus de 4 mètres).

Un exemple de chacune de ces classes est montré respectivement aux figures 24, 25, 26, 27 et 28. À noter qu'aucun glissement de terrain fortement rétrogressif ne s'est produit, mais que le glissement montré à la figure 27 constitue un point d'amorce potentiel pour ce type de glissement. C'est pourquoi un périmètre de sécurité d'une largeur de 100 mètres à l'arrière du sommet du talus a été recommandé à cet endroit. À titre d'exemple, un glissement fortement rétrogressif d'un recul de 60 mètres s'est produit dans le voisinage au printemps 2013 et est montré à la figure 29.

En résumé, la majorité des glissements de terrain dans les sols argileux s'est produite à des endroits peu ou non habités, le plus souvent dans des terrains agricoles. Ceux dans des sols granulaires (sable et gravier) ont provoqué généralement plus de désordres, engendrant des risques pour certains bâtiments et des dommages à des routes, principalement le long des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras à Saint-Urbain. Ailleurs, les principaux problèmes sont dus à l'érosion agressive des berges, notamment où celles-ci étaient relativement basses et constituées de sols granulaires (ex. : le long de la rivière des Mares, notamment au camping Le Genévrier). Les berges de la rivière du Gouffre se sont fortement déplacées latéralement à certains endroits depuis les 15 dernières années, et notamment lors de la crue du 1^{er} mai dernier (figure 30), comme le montrent les levés Lidar effectués en 2004 et celui fait à la suite des événements de ce printemps.

Par ailleurs, si des travaux de nettoyage des débris dans les cours sont jugés essentiels à certains endroits, il faudra s'assurer au préalable que ces travaux ne mettent pas le personnel en danger lorsqu'il est nécessaire de circuler à proximité de pentes (autant en pied ou en sommet) situées dans des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain, car le danger d'autres ruptures peut perdurer plusieurs semaines après les événements. Le cas échéant, il faudra consulter au préalable un ingénieur en géotechnique pour confirmer l'absence de danger avant de circuler dans ces zones.

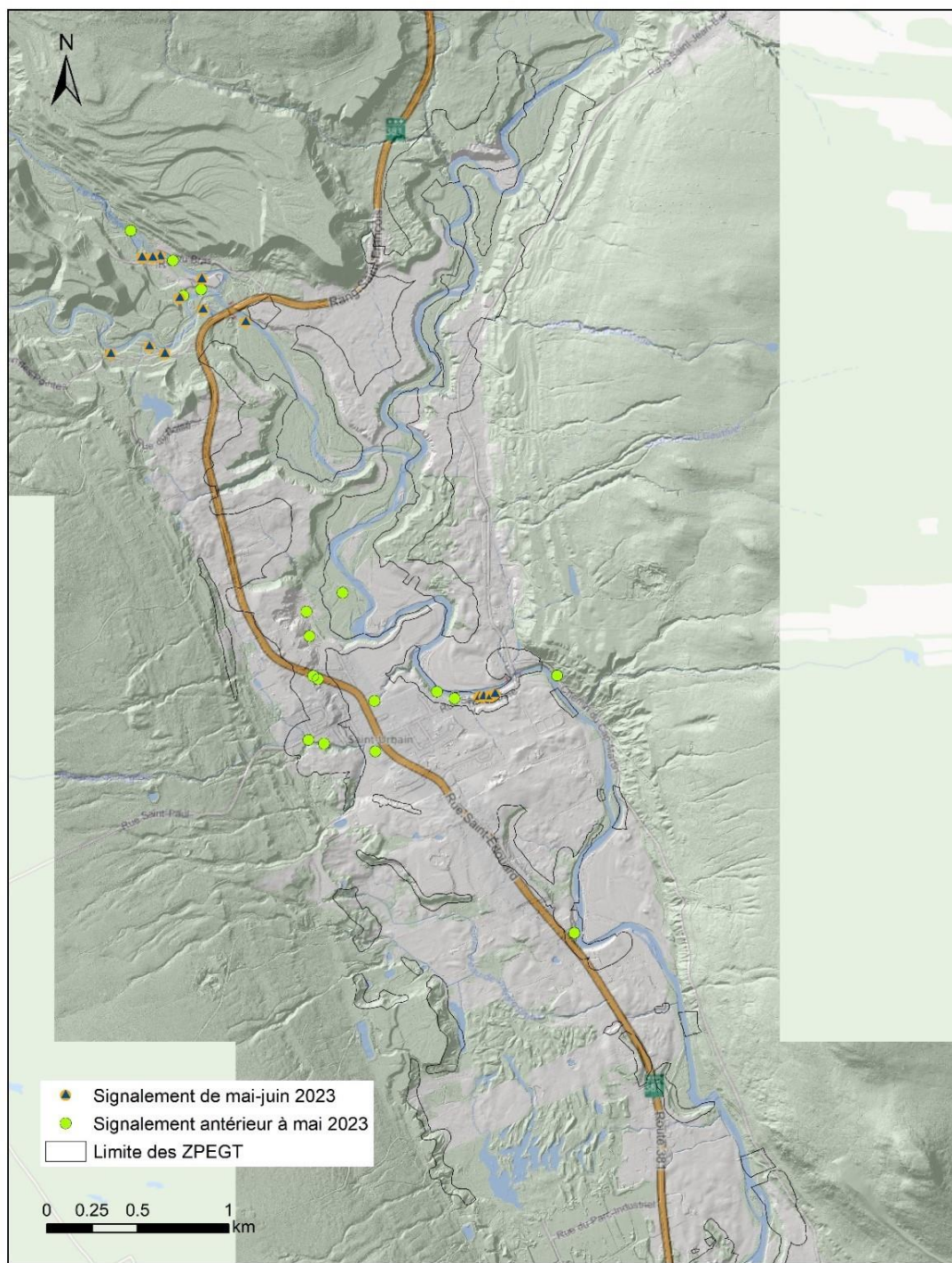


Figure 18. Carte de la portion nord de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de Saint-Urbain, indiquant le contour des zones cartographiées et la position des signalements de mouvements de sol avant et après le 1^{er} mai 2023

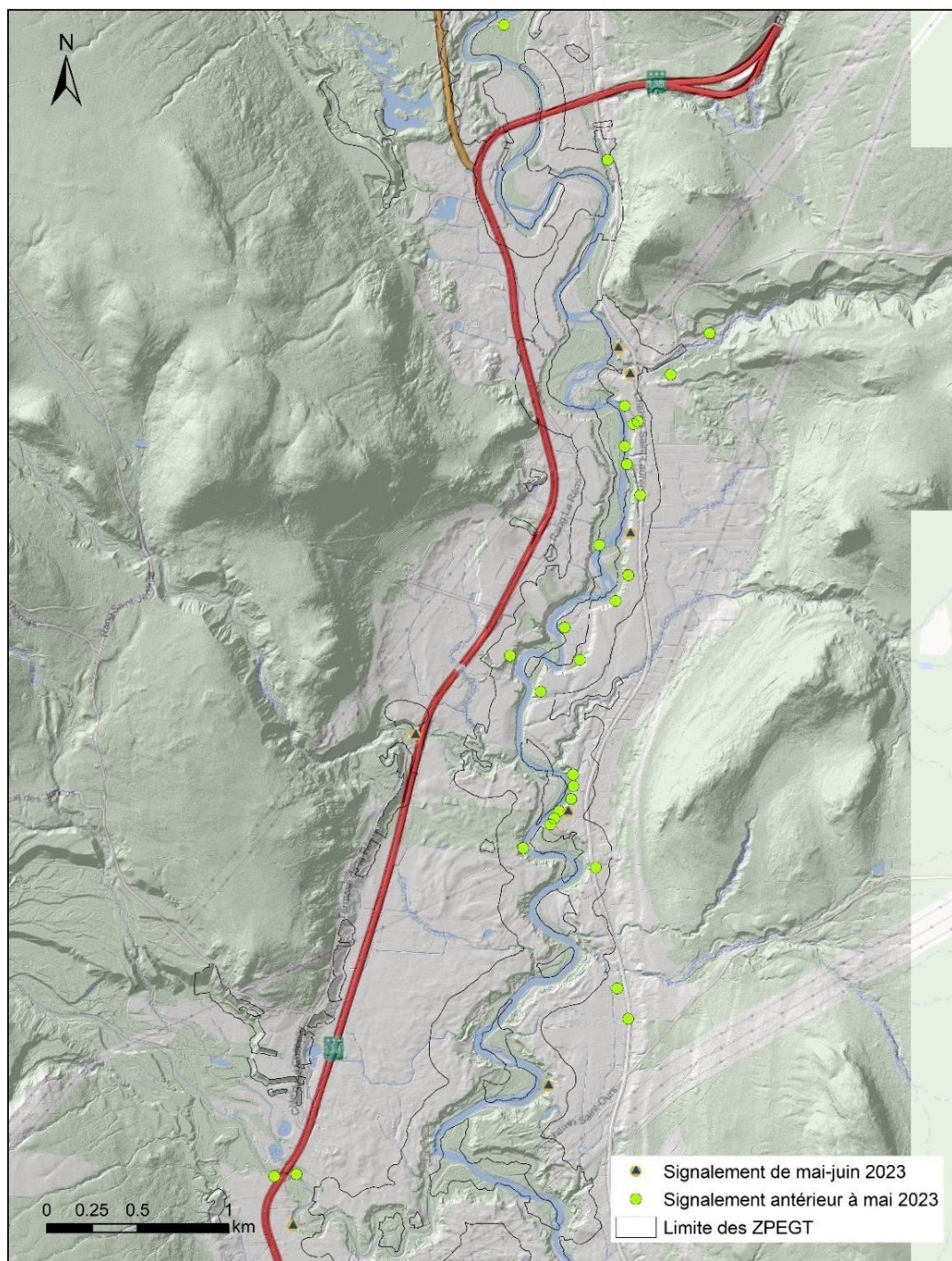


Figure 19. Carte de la portion centrale de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de la jonction entre la route 138 et la route 381, indiquant le contour des zones cartographiées et la position des signalements de mouvements de sol avant et après le 1^{er} mai 2023

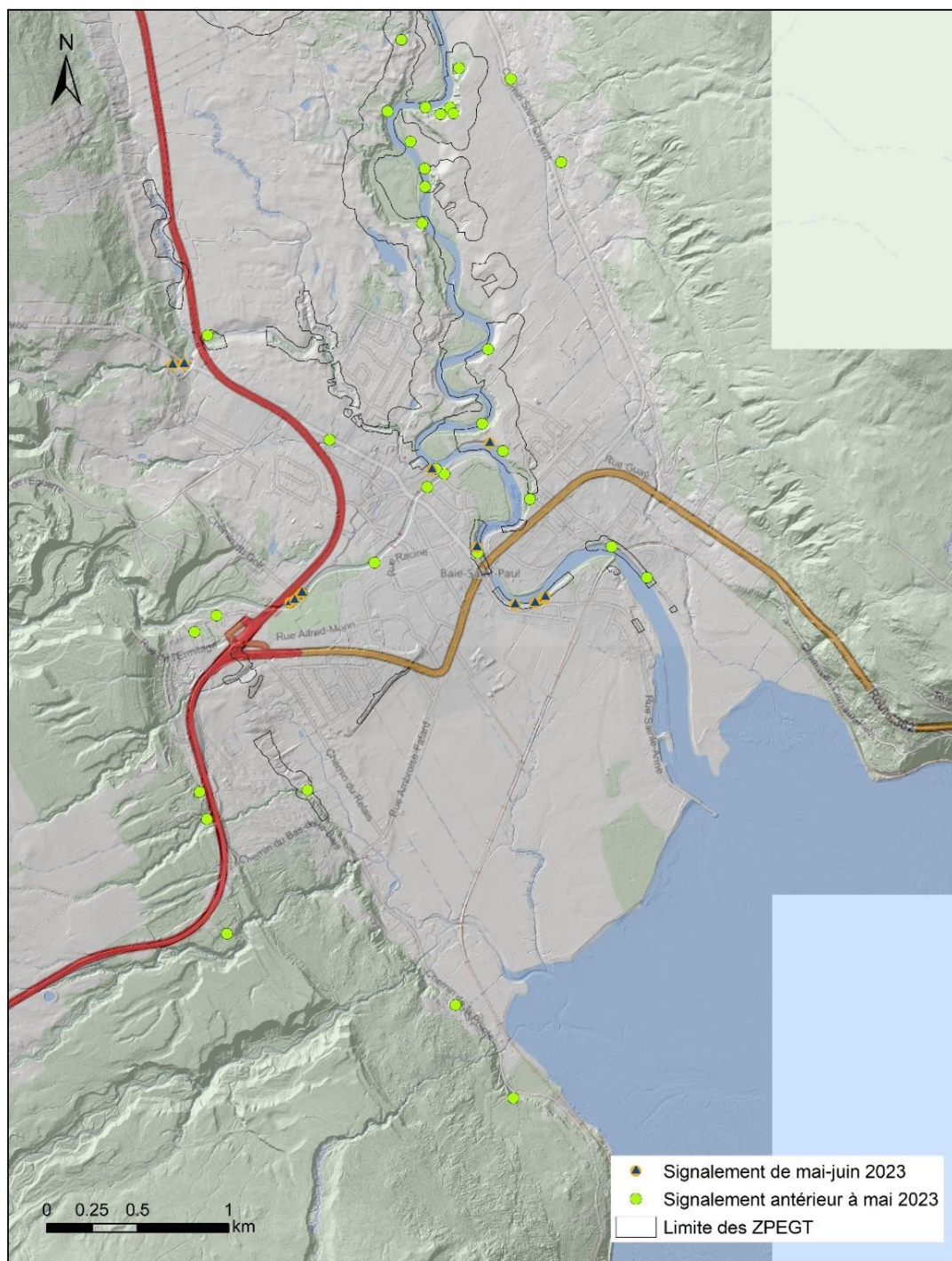


Figure 20. Carte de la portion sud de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de Baie-Saint-Paul, indiquant le contour des zones cartographiées et la position des signalements de mouvements de sol avant et après le 1^{er} mai 2023

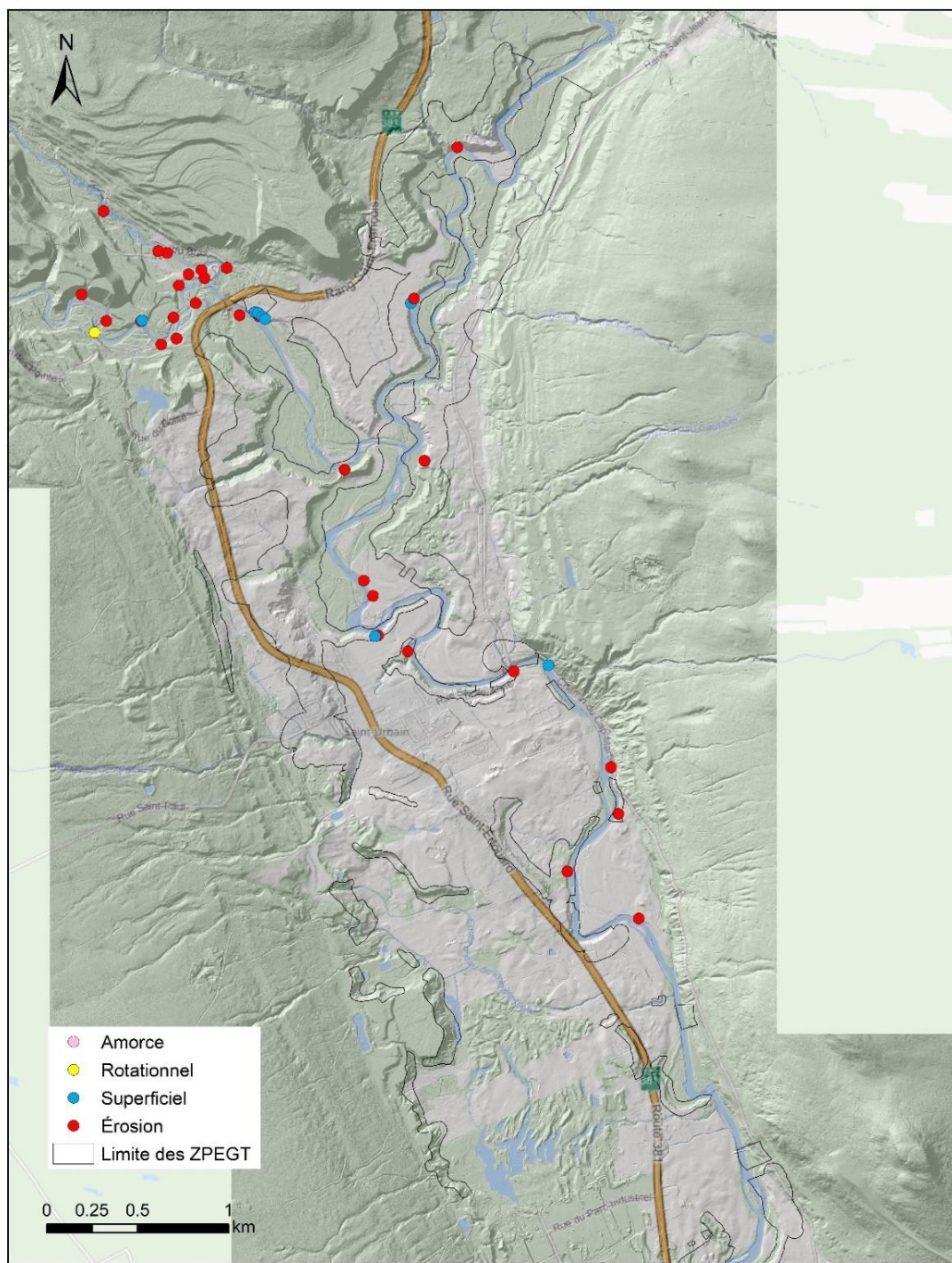


Figure 21. Inventaire de l'ensemble des cas d'érosion des berges et de glissements de terrain inventoriés lors de la tournée en hélicoptère du 5 mai 2023, pour la portion nord de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de Saint-Urbain

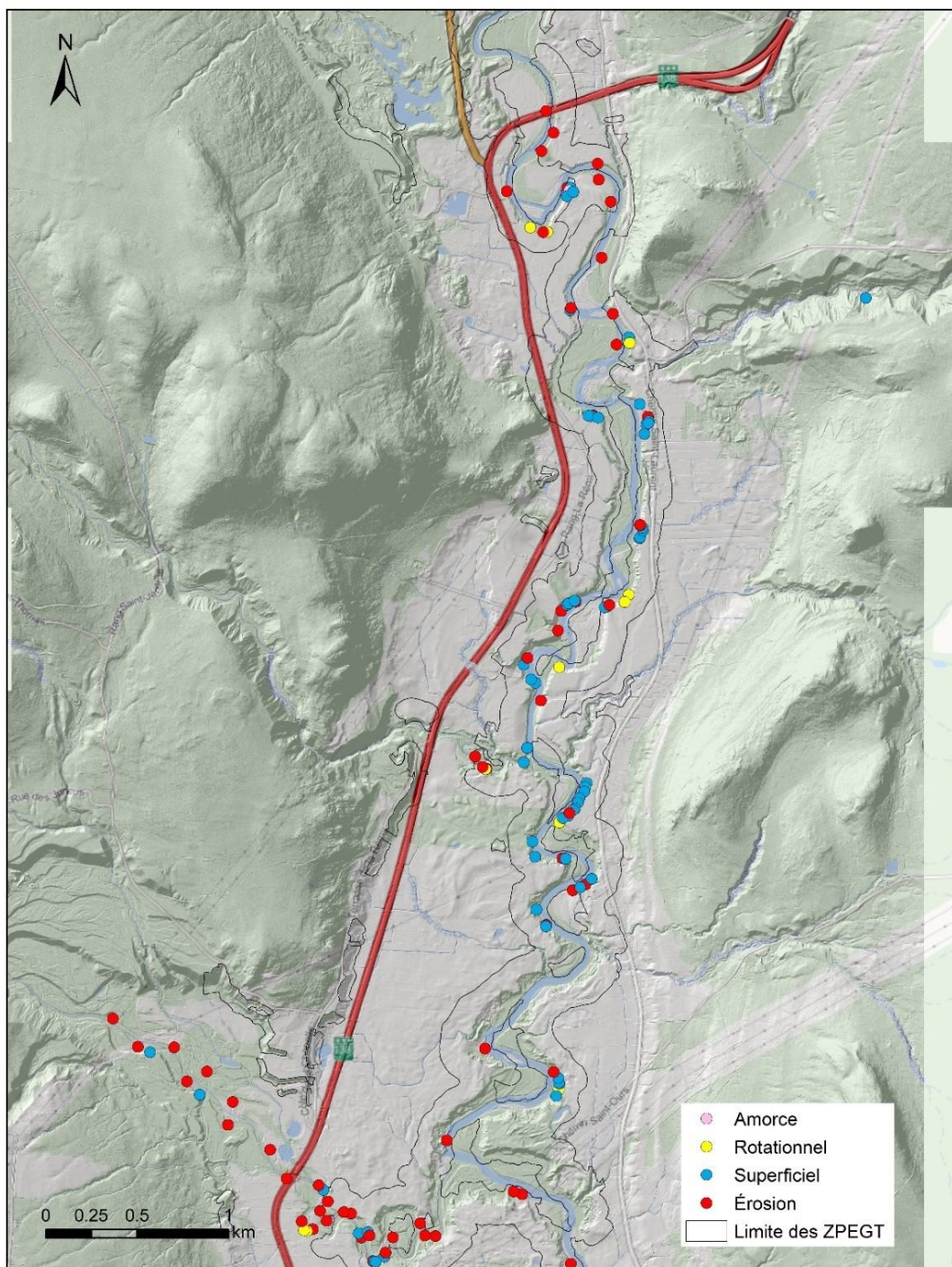


Figure 22. Inventaire de l'ensemble des cas d'érosion des berges et de glissements de terrain inventoriés lors de la tournée en hélicoptère du 5 mai 2023, pour la portion centrale de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de la jonction entre la route 138 et la route 381

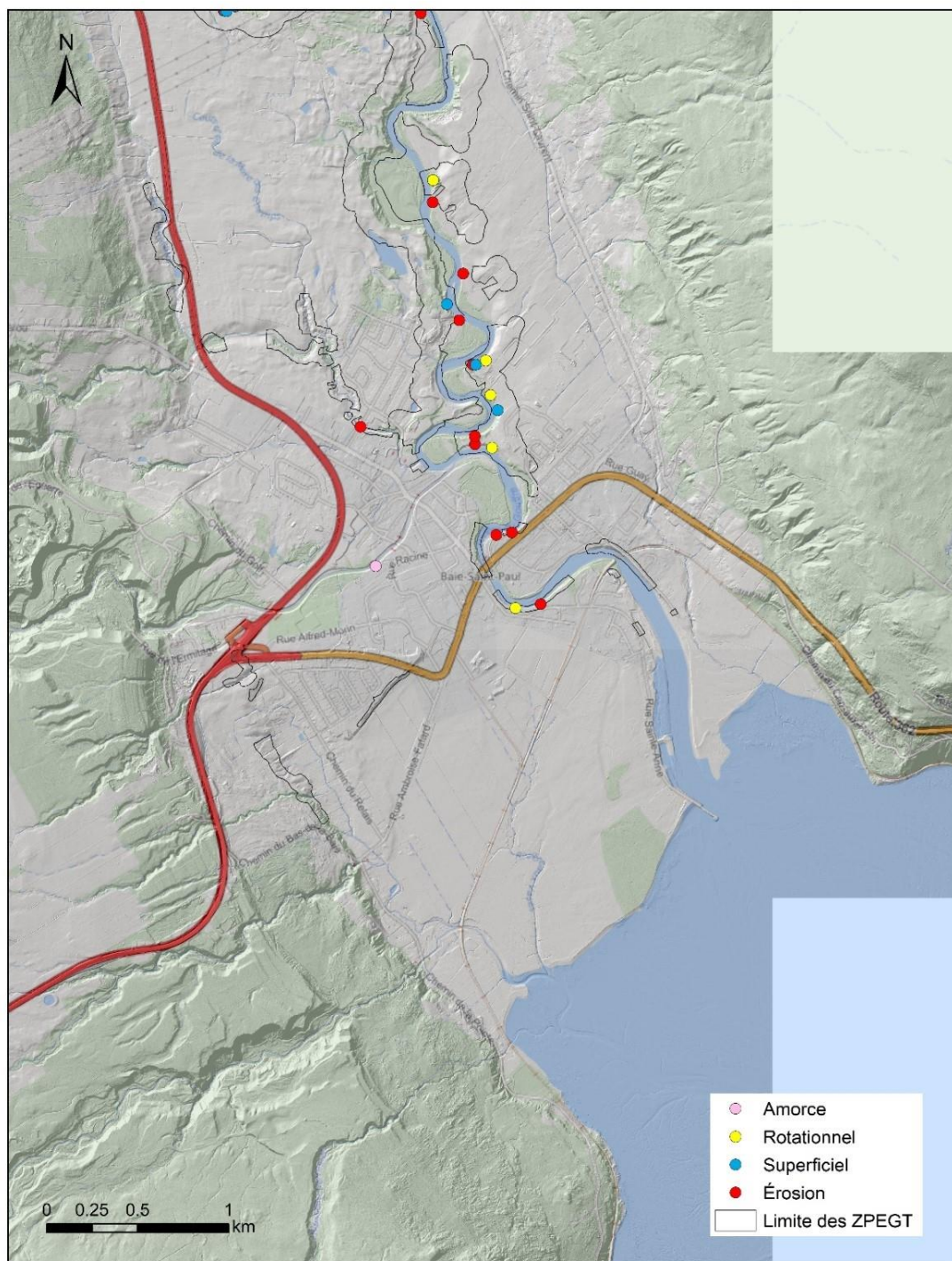


Figure 23. Inventaire de l'ensemble des cas d'érosion des berges et de glissements de terrain inventoriés lors de la tournée en hélicoptère du 5 mai 2023, pour la portion sud de la vallée de la rivière du Gouffre dans le secteur de Baie-Saint-Paul



Figure 24. Exemple d'érosion sévère dans un talus de moins de 4 mètres de hauteur, devant un chalet en rive gauche le long de la rivière du Gouffre en aval de Saint-Urbain (photo MTMD – 2023-05-05)



Figure 25. Exemple d'avulsion de la rivière Le Petit Bras à Saint-Urbain. La ligne pointillée bleue avec la flèche indique la position approximative de la rivière avant le 1^{er} mai 2023 (photo MTMD – 2023-05-05)



Figure 26. Exemple d'érosion ou de glissements superficiels dans l'argile en rive gauche de la rivière Le Gros Bras à Saint-Urbain en aval du pont de la route 381. À noter que plusieurs glissements superficiels successifs entretenus par l'érosion, qui fut très active le 1^{er} mai 2023, semblent s'être produits dans la pente (photo MTMD – 2023-05-05)



Figure 27. Exemple d'érosion ou de glissements rotationnels dans des dépôts silto-argileux en rive gauche de la rivière du Gouffre en zone agricole, environ 2,5 km en amont du secteur urbain de Baie-Saint-Paul (photo MTMD – 2023-05-05)



Figure 28. Exemple d'érosion ou de glissements superficiels dans des dépôts granulaires en rive gauche de la rivière Le Petit Bras à Saint-Urbain en amont du pont de la route 381. À noter que plusieurs glissements superficiels successifs entretenus par l'érosion, qui fut très active le 1^{er} mai 2023, se sont produits dans la pente. La flèche bleue indique un nouveau chenal temporaire que la rivière s'est creusé sur plusieurs mètres de profondeur lors de la crue du 1^{er} mai, et qui a été abandonné lors de la décrue (photo MTMD – 2023-05-05)



Figure 29. Exemple d'un glissement fortement rétrogressif qui s'est produit au printemps 2013 dans les dépôts silto-argileux en rive gauche de la rivière du Gouffre en zone agricole à Baie-Saint-Paul (photo MTMD – 2013-05-02)



Figure 30. Exemple d'un méandre de la rivière du Gouffre où la berge s'est déplacée latéralement de quelques dizaines de mètres depuis 2004, sous l'effet de l'érosion, se rapprochant progressivement du chemin du rang Saint-Laurent, à Baie-Saint-Paul (photo MTMD – 2023-05-05)

8.3. Inondation, érosion, dépôt, déplacement de cours d'eau

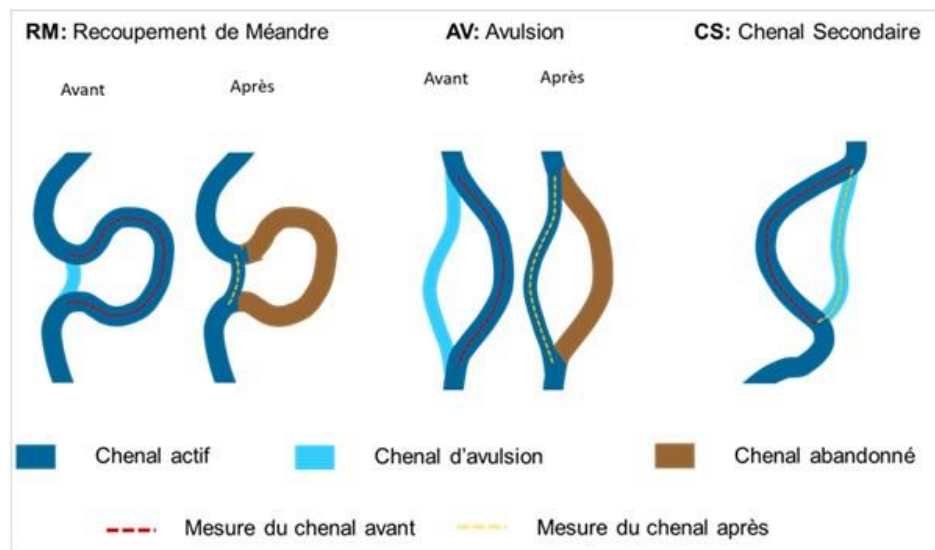
L'aléa d'inondation est un phénomène caractérisé par plusieurs paramètres, notamment la fréquence, l'intensité (profondeur d'eau et vitesse de courant), la durée, la cinétique (lente ou rapide), la saisonnalité, la périodicité et la combinaison des autres types d'inondations.

Les cartes des zones inondables disponibles pour le secteur ont été produites par le service de l'hydrométrie en 1979 par Jacques Déziel et Jean-Paul Boucher pour les périodes de retour de 20 et 100 ans (annexe 2). Il est prévu que ces cartes soient mises à jour dans le cadre du projet INFO-Crue. La date de sortie de ces cartes n'est toutefois pas déterminée.

La mobilité des cours d'eau est un facteur crucial à prendre en compte lorsqu'on aborde la question des risques liés aux aléas fluviaux. Ce phénomène est particulièrement remarquable dans le cas de la rivière Gouffre, dont plus de 35 km linéaires ont été caractérisés comme mobiles dans le cadre des travaux de cartographie réglementaire, compris dans le projet INFO-Crue, menés par le MELCCFP (figure 32).

L'aléa de mobilité d'un cours d'eau se définit comme un phénomène par lequel le lit de celui-ci peut se déplacer horizontalement et verticalement, résultant de différents processus physiques, dont l'érosion et la sédimentation. En milieu fluvial, les principaux types de mobilités observés sont :

- Élargissement;
- Migration latérale;
- Avulsion (voir la
- figure 31);
- Incision et aggradation (mobilité verticale).



[illegible]

L'aléa de torrentialité est fortement conditionné par la topographie du bassin versant d'un cours d'eau. Il est lié à une rupture de pente lorsqu'un cours d'eau émerge d'un relief escarpé en amont et se déverse dans une plaine en aval. En raison des fortes pentes et des faibles superficies de drainage, la réponse hydrologique de ce type de cours d'eau est prompte et intense.

¹⁷ Tiré de Maltais, M. *Développement de connaissances et d'outils pour l'analyse et la gestion des aléas hydrogéomorphologiques* (HGM2), 2021, 80 p.

de sédiments hétérométriques transportés par de petits cours d'eau et déposés au pied du versant d'une vallée principale lors d'événements torrentiels. Ils ont tendance à avoir un profil transversal convexe et à s'affiner dans la portion distale. Un secteur sujet à la torrentialité n'est pas nécessairement un cône alluvial, alors que tous les cônes alluviaux sont de nature torrentielle. Le MELCCFP a circonscrit de façon préliminaire plusieurs cônes alluviaux, représentés à la figure 33, pour le bassin versant de la rivière du Gouffre.

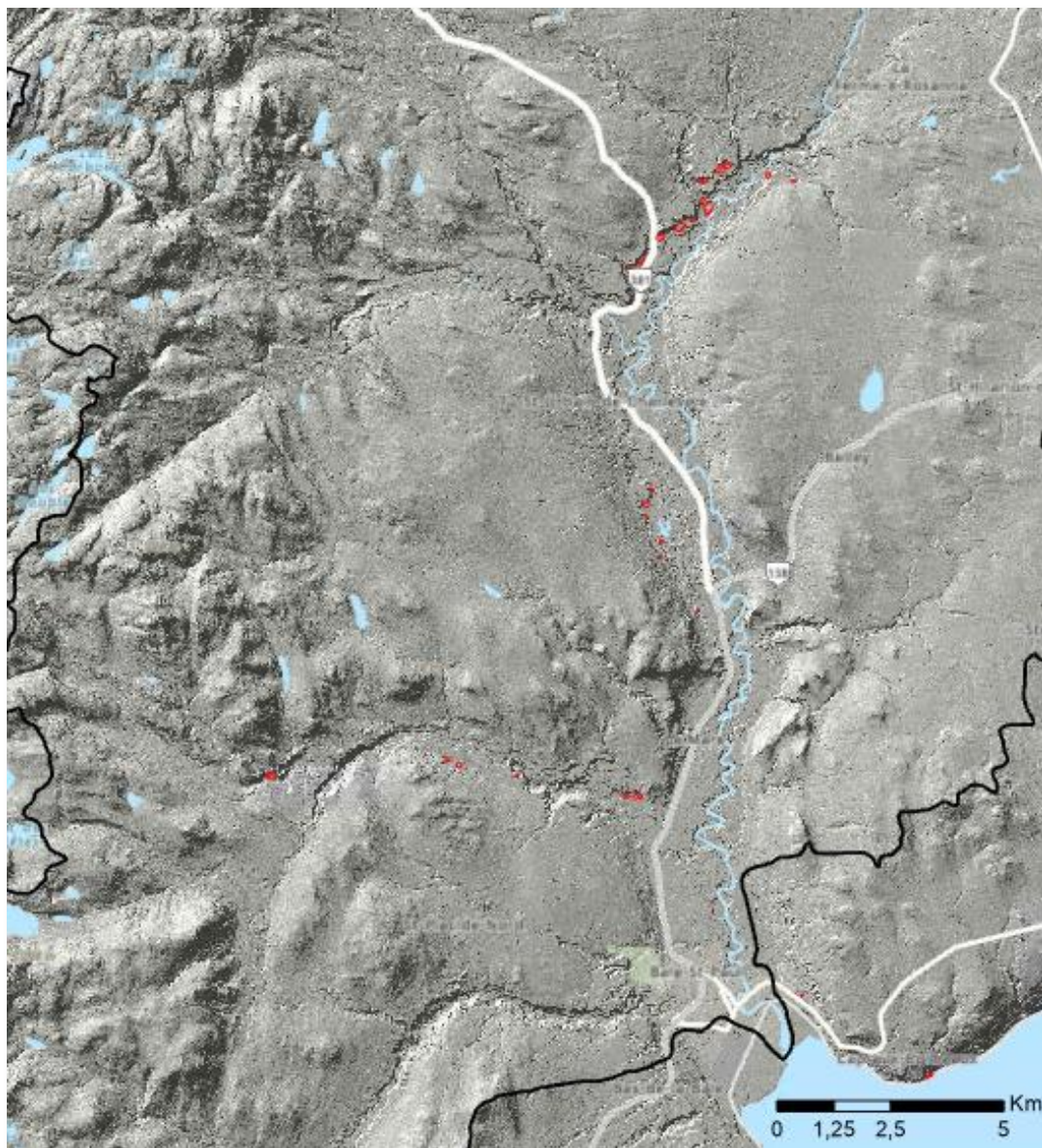


Figure 33. Cônes alluviaux circonscrits (en rouge) préliminairement pour le bassin versant de la rivière du Gouffre

La plaine alluviale fonctionnelle (PAF) est la portion de la plaine alluviale actuellement exposée à l'action des aléas fluviaux. La délimitation de la plaine alluviale fonctionnelle est fixée au bas du premier talus où survient une discontinuité topographique marquant la présence d'une unité d'origine non alluviale ou qui présente des indices de stabilité

géomorphologique prolongée¹⁸. À cet effet, elle constitue un outil pour circonscrire l'occurrence des aléas fluviaux. La plaine alluviale fonctionnelle du bassin versant de la rivière du Gouffre a été circonscrite préliminairement par le MELCCFP et est représentée aux figures 34 et 35.

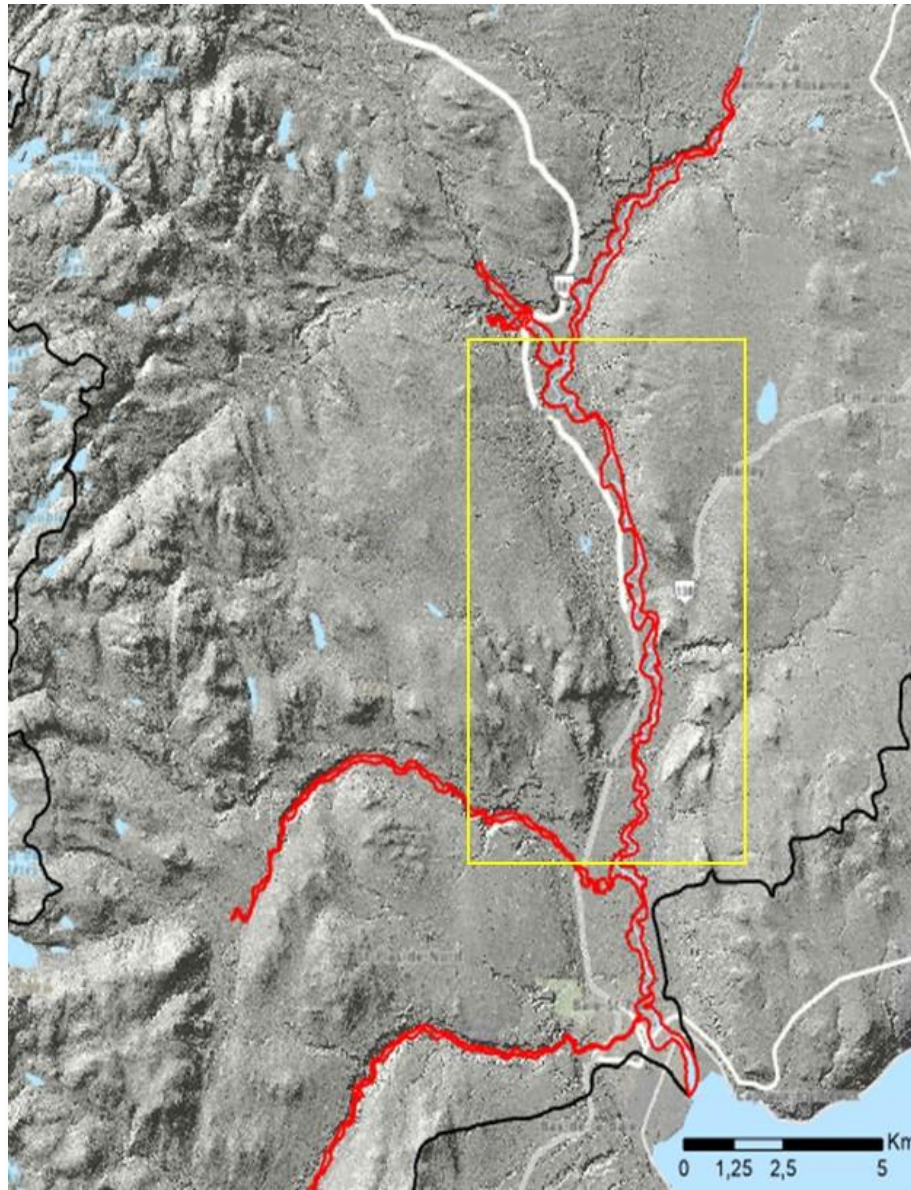


Figure 34. Plaine alluviale fonctionnelle circonscrite (en rouge) préliminairement pour le bassin versant de la rivière du Gouffre. L'encadré jaune est agrandi à la figure suivante

¹⁸ Demers, S., et autres. « L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec) », *Physio-Géo*, vol. 8, 2014, p. 67-88.

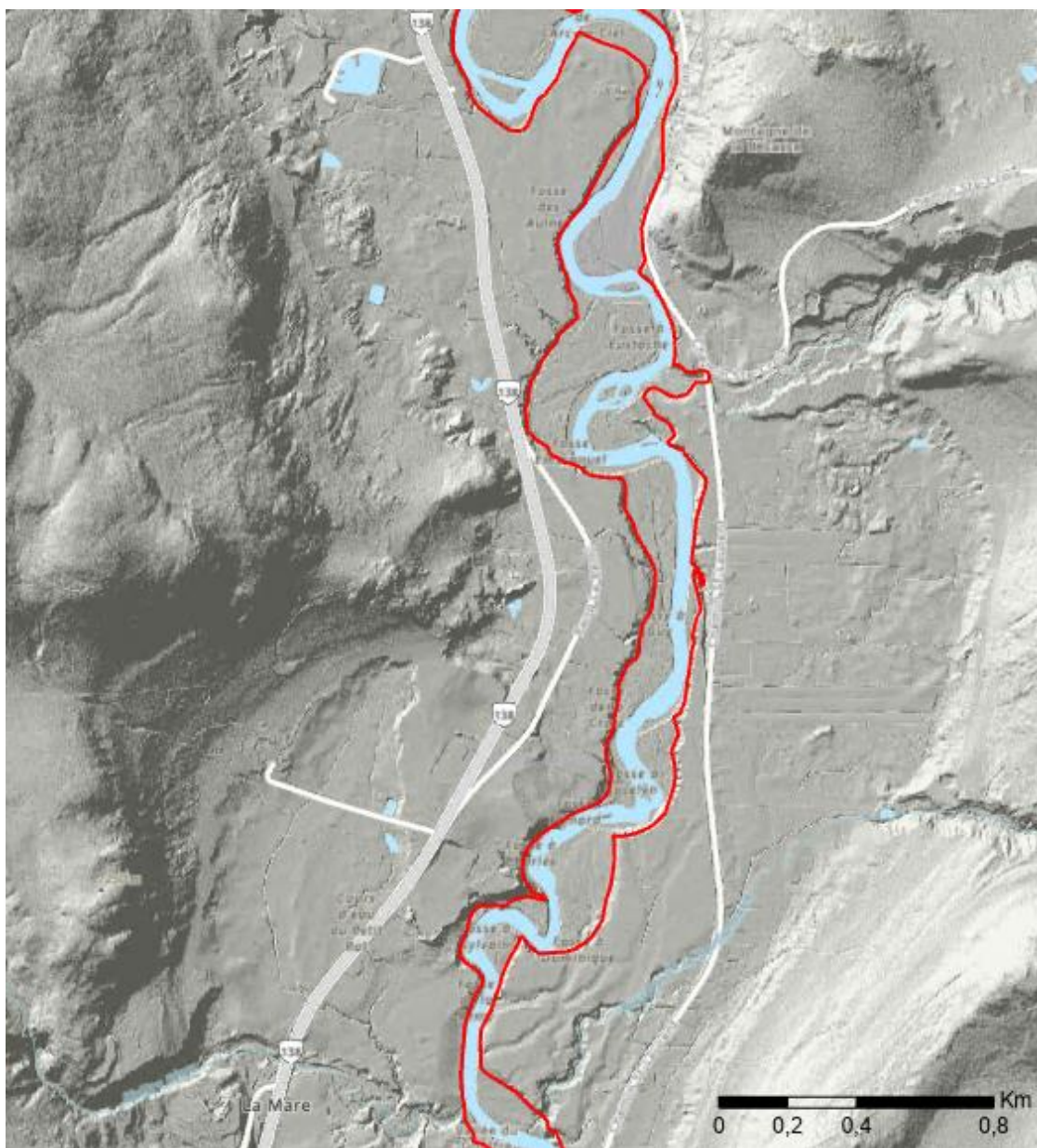


Figure 35. Plaine alluviale fonctionnelle circonscrite (en rouge) préliminairement pour le secteur de l'amont de la confluence de la rivière du Gouffre et de la rivière des Mares jusqu'au pont de la route 138

8.3.1. État de la situation à la suite des événements du 1^{er} mai 2023

Le 1^{er} mai 2023, l'ampleur et la rapidité de la crue dans l'ensemble du bassin versant de la rivière du Gouffre ont entraîné d'importantes inondations, en plus de favoriser des processus d'érosion, de transport et de sédimentation des cours d'eau. Il a été possible de constater l'ampleur des débordements par des accumulations importantes, de plusieurs dizaines de centimètres, de dépôts alluviaux dans le lit majeur des cours d'eau. Même si les inondations ont touché plusieurs secteurs sur l'ensemble du bassin, avec des hauteurs d'eau mesurées pouvant atteindre près de 2 mètres par endroit (p. ex. : les secteurs du rang Saint-Georges et de l'intersection de la rue Sainte-Anne et du rang Saint-Jean-Baptiste, à Saint-Urbain, ainsi que le camping du Gouffre à Baie-Saint-Paul), c'est dans le secteur du centre-ville de Baie-Saint-Paul que les conséquences liées aux inondations ont été les plus importantes.

Comme mentionné dans la section 3, la majorité des dépôts meubles composant la plaine alluviale est formée de dépôts fluvioglaciaires et marins (sables et graviers peu cohésifs) sus-jacents à des dépôts glaciaires (till) ou marins (argile gris-bleu et compacte de la mer de Goldthwait). Ainsi, à plusieurs endroits, les hautes terrasses latérales soulevées constituées de dépôts meubles marins et littoraux anciens sont érodées par la rivière et soumises à des mouvements de terrain, comme mentionné précédemment. Il a été observé à plusieurs endroits que les taux de mobilité (latérale et verticale) sont diminués lorsque la rivière s'est incisée jusqu'à l'unité d'argile marine sous-jacente. La nature peu cohésive de la plaine alluviale joue un rôle prépondérant dans les phénomènes de mobilité observés.

Entre Saint-Urbain et son embouchure dans le fleuve Saint-Laurent, la rivière du Gouffre présente un style divagant qui est propice à la mobilité de son chenal. Avant les événements du 1^{er} mai 2023, les berges de la rivière s'érodaient déjà naturellement, et ce, de manière relativement importante. Les observations faites après l'événement du 1^{er} mai 2023 à partir des données géospatiales disponibles démontrent de la mobilité latérale dans certains secteurs. Malgré tout, le tracé de la rivière du Gouffre, sur son tronçon principal, est demeuré sensiblement le même qu'avant l'événement.

Le secteur où la migration latérale des berges a été la plus importante se situe entre la confluence de la rivière Le Gros Bras et le pont de Saint-Urbain (rang Saint-Jean-Baptiste). Par endroits, les berges ont reculé de plus de 50 mètres linéaires en comparaison avec les plus récentes orthomosaïques disponibles avant l'événement, soit 2018. Il faut néanmoins prendre en considération que le recul naturel des berges de 2018 à 2023 peut influencer cette distance de migration. En vue de l'événement du 1^{er} mai, on peut estimer que cette migration latérale significative est due à la confluence de la rivière Le Gros Bras, où ses débits se sont ajoutés à ceux de la rivière du gouffre de manière à augmenter la capacité érosive de la rivière localement.

Entre le pont de Saint-Urbain et le pont de la route 138, on trouve plusieurs secteurs où des reculs jusqu'à 15 mètres (par rapport aux images de 2018) ont été répertoriés dans les rives concaves de la rivière.

Un autre secteur où la migration latérale a été importante est à l'intersection entre le chemin Saint-Laurent et le chemin Sainte-Croix, où l'on peut observer jusqu'à 30 mètres linéaires d'érosion (depuis 2018). Deux avulsions mineures ont eu lieu dans ce secteur lors de l'événement du 1^{er} mai, qui a créé deux chenaux secondaires temporaires. Il faudra voir

dans les prochaines années si la rivière s'écoulera de nouveau dans ces chenaux secondaires.

Malgré la difficulté d'interprétation de la mobilité verticale avec les données géospatiales disponibles, il est possible de déduire qu'un événement de cette magnitude a surcreusé ou rehaussé le lit de la rivière menant à de l'incision et à de l'aggradation. Il est donc possible d'induire que les processus d'incision ont altéré considérablement la bathymétrie de la rivière, qui était déjà très instable avant l'événement, et ce, sur l'ensemble de son cours.

Tout le long du parcours de la rivière, on note la présence de bancs alluviaux latéraux et centraux qui démontrent un transport sédimentaire important. Ces zones d'accumulation éphémères sont issues des berges érodées ainsi que du lit incisé. Ces bancs sont sujets à être remaniés dans un futur proche, tandis que la rivière tendra vers un nouvel équilibre hydrosédimentaire.

Il est aussi possible d'observer que l'événement a laissé des traces d'alluvionnement aux endroits où la rivière est sortie de son lit. En effet, les terrasses alluviales de la rivière sont parsemées de dépôts sableux laissés après l'inondation. Ces alluvions proviennent de zones d'érosion plus en amont. Il est impossible de déterminer la quantité de matériaux ayant été déposés de cette manière. Cependant, les observations sur le terrain font état de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur.

Les phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation (liés à l'aléa mobilité) ont donc été prépondérants dans les événements du 1^{er} mai 2023. Ces trois phénomènes ont leurs conséquences propres et distinctes. Il demeure important de prendre en compte qu'à la suite d'un événement d'une telle ampleur, le système hydrosédimentaire aura besoin de temps pour retrouver un équilibre dynamique dans les divers processus qui le gouvernent. À cet effet, il se peut que le système se réajuste à ces nouvelles conditions hydrodynamiques et que cela entraîne davantage de mobilité dans les années à venir. Il est donc crucial d'assurer un suivi des différents processus géomorphologiques sur la rivière du Gouffre dans les prochaines années.

8.3.2. Adéquation de l'événement avec les zones de faible courant et de grand courant

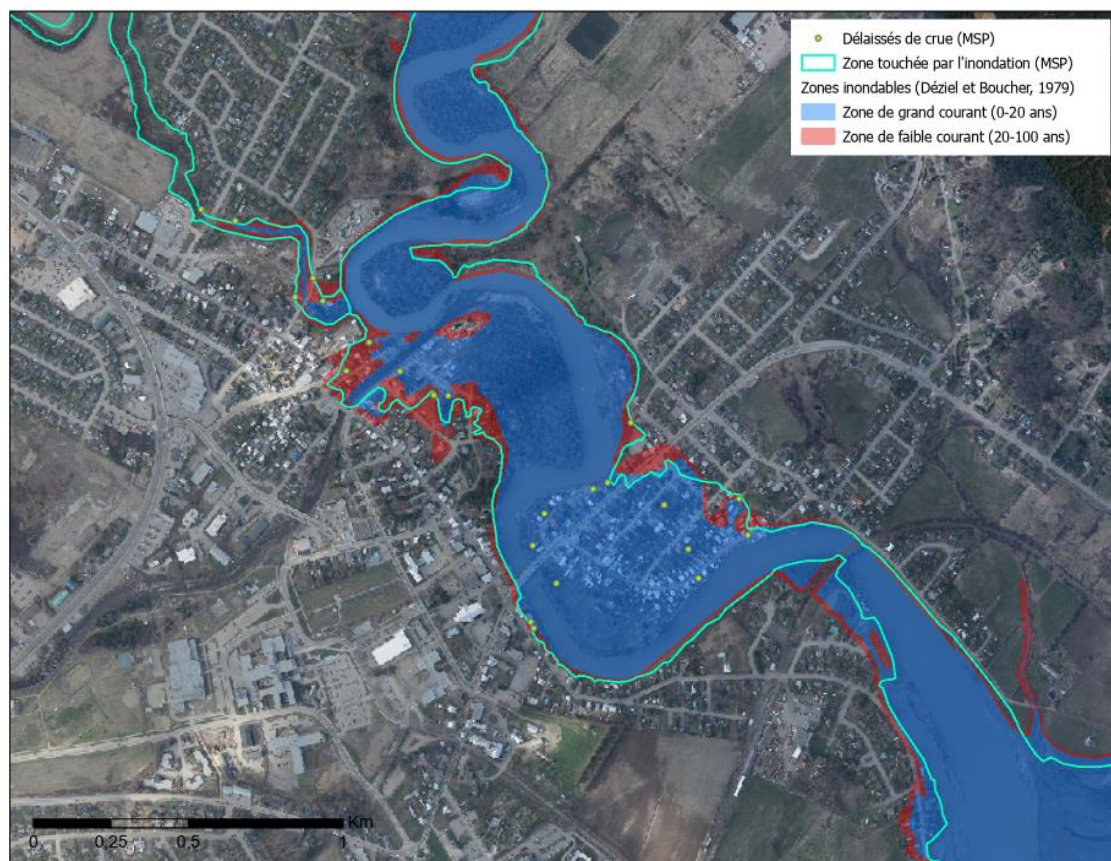


Figure 36. Étendue touchée par l'inondation de la rivière du Gouffre lors de l'événement du 1^{er} mai 2023 et zones inondables de grand (réurrence 20 ans) et de faible courant (réurrence 100 ans)¹⁹

Lorsque la zone touchée du 1^{er} mai 2023 est comparée aux cartes de zones inondables²⁰, il est possible de constater qu'elle correspond généralement à la zone de faible courant (figure 36). Bien que la récurrence estimée pour l'événement soit plus grande que 20 ans, il faut souligner que l'analyse de récurrence à la base de la zone de faible courant date de plusieurs décennies et que les méthodologies utilisées pour produire les informations comparées sont très différentes. Pour cette raison, il faut être très prudent et ne pas tirer de conclusion sur la récurrence en comparant simplement la zone touchée aux cartes de zones inondables. Il faut également souligner que cette zone de faible courant ne caractérise que l'inondation, et non les autres aléas mentionnés précédemment. Finalement, il n'est toutefois pas étonnant que les zones inondables soient incluses dans la zone touchée.

¹⁹ Déziel, J. et J.-P. Boucher. *Cartographie des plaines d'inondation – Rivière du Gouffre. Calcul des cotes d'inondation : crue de récurrence 20 ans et 100 ans*, 1979.

²⁰ *Idem*.

9. Secteurs d'intérêt particulier

Le 8 mai 2023, une équipe de la Direction de l'hydrologie et de l'hydraulique du ministère de l'Environnement s'est rendue sur le terrain pour effectuer des observations sur l'aléa mobilité et sur l'hydrogéomorphologie générale des différents sites visités. Puis, le 9 juin 2023, une équipe de la Direction du soutien à la réduction des risques de sinistres du MSP a effectué une visite sur le terrain pour observer et recueillir de l'information en lien avec l'érosion fluviale. Au cours de ces visites, plusieurs constatations ont été faites et sont présentées dans les prochaines sections.

9.1. Centre-ville de Baie-Saint-Paul

Le secteur du centre-ville de Baie-Saint-Paul est caractérisé par un style fluvial à méandres. À la suite de l'événement du 1^{er} mai 2023, le secteur a subi peu d'érosion et de mobilité latérale, mais il a été particulièrement touché par l'inondation (figure 37).



Figure 37. Comparaison du tracé de la rivière du Gouffre (centre-ville) en 2018 (a) et après l'événement du 1^{er} mai 2023 (b)

Une estimation des hauteurs d'eau atteintes dans le méandre du centre-ville de Baie-Saint-Paul est représentée sur la carte ci-dessous (Figure 38). Il est donc possible de constater des hauteurs d'eau pouvant atteindre plus de 2 mètres à proximité de certains bâtiments de ce secteur.

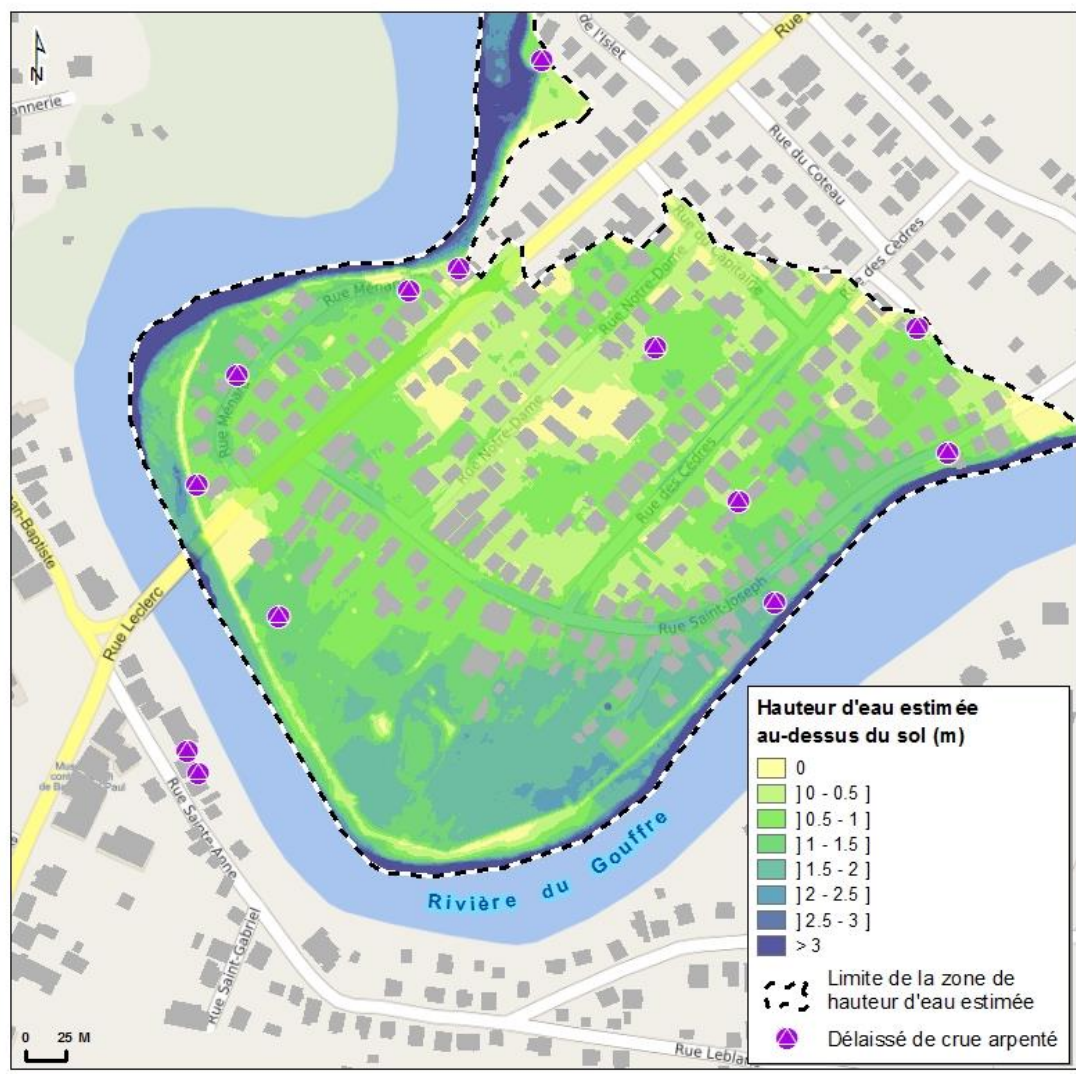


Figure 38. Représentation des hauteurs d'eau (m) estimées au-dessus du sol dans le secteur du méandre du centre-ville de Baie-Saint-Paul

À l'aide des images satellites historiques et récentes, il est possible de constater une évolution des limites de la rivière du Gouffre au fil des années. Une délimitation des limites de la rivière en 1964, en 2018 et en 2023 est représentée à la figure 39. L'évolution récente dans le secteur du centre-ville de Baie-Saint-Paul n'est pas très importante considérant les aménagements de protection des berges, mais une légère mobilité latérale de la rivière depuis 1964 est visible dans les zones peu ou pas urbanisées.



Figure 39. Positions historiques des berges de la rivière du Gouffre

Le profil de pente réalisé le long de la rivière du Gouffre permet d'illustrer un adoucissement important de la pente dans le secteur de Baie-Saint-Paul (figure 40). En effet, le secteur a un coefficient de pente de 0,11 %, comparativement à 0,3 % pour le secteur de Saint-Urbain en amont.

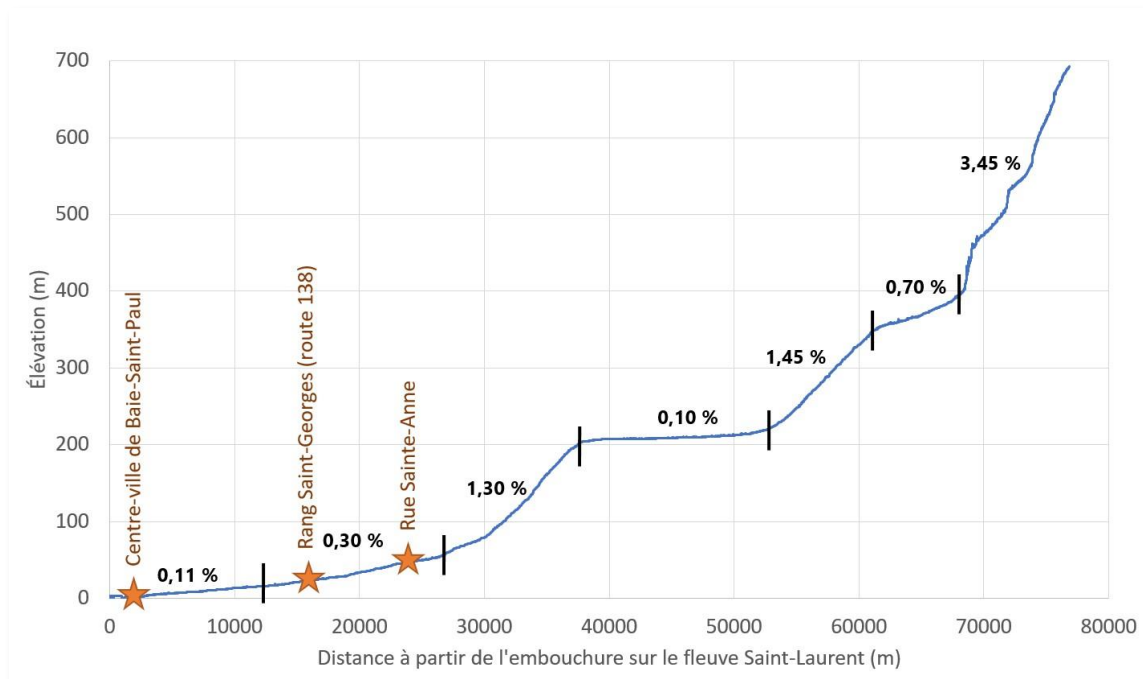


Figure 40. Profil topographique de la rivière du Gouffre à partir de son embouchure sur le fleuve Saint-Laurent. La municipalité de Saint-Urbain est située dans la zone représentée par un coefficient de pente de 0,3 % et marquée par un adoucissement de la pente du cours d'eau

9.1.1. Secteur de la rue Ménard

Le mur de protection contre les inondations au centre-ville de Baie-Saint-Paul longe le secteur de la rue Ménard. Ce secteur a principalement été touché par la montée des eaux. Le muret en place n'a pas permis d'empêcher l'inondation du quartier (figures 41 et 42). Dans le même secteur, le long de la rivière, du bois s'est accumulé (figure 43).



Figure 41. Localisation de la rupture d'ouvrage de protection



Figure 42. Rupture d'ouvrage et accumulation de sédiments fins, rue Ménard



Figure 43. Ouvrage de la rue Ménard. Banc d'accumulation en berge convexe. Accumulation de matière ligneuse en berge concave. Peu de mobilité latérale observée

9.1.2. Secteur de la confluence du Bras du Nord-Ouest

Pour la rivière du Bras du Nord-Ouest (secteur en aval), le style fluvial est sinueux. Le tronçon est peu sensible à l'érosion latérale. On observe donc très peu, voire pas du tout, de mobilité latérale à la suite de l'événement du 1^{er} mai 2023. En effet, la rivière est encaissée et confinée dans le roc en amont du pont de la route 138. En aval du pont de la route 138, les berges sont largement protégées par des enrochements ou des murs qui ont protégé les berges de l'érosion. Il demeure possible que, par endroit, on retrouve de la mobilité verticale (incision). Il est à noter qu'avant la mise en place de ces infrastructures de protection, le cours d'eau était mobile (voir la figure 44) et la présence d'enrochements et autres obstacles à la connectivité sédimentaire peut accélérer les phénomènes d'érosion en aval du cours d'eau.

Lors de l'événement du 1^{er} mai, l'eau a débordé des murs de protection, notamment celui de la rue Saint-Pierre, près de la confluence (figures 45 et 46). L'eau a emprunté un chemin préférentiel créé par la route et a érodé partiellement la rue Clarence-Gagnon, malgré la présence d'un fossé de drainage à quelques mètres. L'analyse visuelle du Lidar indique la présence de chenaux de débordement sur la partie convexe du méandre.

Sur le tronçon de la rivière du Gouffre, au point de confluence avec les Bras du Nord-Ouest, un recoupement de méandres par migration latérale est en cours (

figure 47). Cette évolution est généralement liée à des processus naturels, et la hauteur importante des talus empêche le recoupement par déversement. De plus, une couche

d'argile à la base du pincement tend à ralentir les taux de recul en période d'étiage ou de crue de faible importance. Cependant, les taux de recul sont plus importants lors d'événements majeurs, comme celui survenu le 1^{er} mai, et accentués par la présence d'ouvrages de stabilisation de berges. En effet, une zone d'érosion a été repérée à l'extrémité d'un enrochement ou un « effet de bout » a été observé. En cas de recoupement de méandres, l'augmentation locale de la pente de la rivière pourrait provoquer en retour une accentuation des érosions de berge en amont et en aval, jusqu'à ce que l'augmentation de la sinuosité qui en résulte rétablisse une pente d'« équilibre ».



Figure 44. Secteur de la confluence des rivières du Gouffre et du Bras du Nord-Ouest. Photo prise le 19 mars 1936 à côté du Moulin Gariépy et du Magasin général et photographie Google Street View du Bras du Nord-Ouest (septembre 2022). Érosion et événement de crue historique



Figure 45. Secteur de la confluence des rivières du Gouffre et du Bras du Nord-Ouest. Ouvrage de la rue Saint-Pierre. Vue sur le pincement du méandre. Le talus est d'environ 10 mètres de hauteur (flèche rouge). Secteur inondé lors de l'événement



Figure 46. Secteur de la confluence des rivières du Gouffre et du Bras du Nord-Ouest. Ouvrage de la rue Saint-Pierre. Chenal de débordement (flèche rouge) emprunté par le Bras du Nord-Ouest. La rue Clarence-Gagnon a été partiellement érodée. Présence d'un fossé de drainage à quelques mètres à gauche



Figure 47. Confluence des rivières du Gouffre et du Bras du Nord-Ouest. Constats faits lors de la visite sur le terrain en 2022 : érosion marquée des deux côtés du pincement; érosion diminuée en période d'étiage, car la base du pincement est en argile; possibilité de taux d'érosion accrus en période de crue, car les strates supérieures sont peu cohésives; effet de bout observé à la fin de l'ouvrage de stabilisation (image de droite)

9.2. Camping Le Genévrier

En amont du pont de la route 138, le style de la rivière des Mares est divagant, alors qu'en aval du pont le style fluvial est à méandres dynamiques. Il s'agit donc d'un secteur où l'aléa mobilité est prépondérant. Le caractère torrentiel de la rivière des Mares a été l'élément clé dans l'événement du 1^{er} mai 2023. Le secteur du camping Le Genévrier est d'ailleurs situé dans une zone propice aux événements de torrentialité. La physiographie du bassin versant de la rivière des Mares prédispose le secteur aux conséquences liées à de fortes précipitations, c'est-à-dire une augmentation rapide de son débit provoquant des crues soudaines et intenses. Le secteur a d'ailleurs été touché par des inondations, avec des hauteurs d'eau pouvant atteindre près d'un mètre par endroit. Son bassin versant de petite taille avec une pente raide, le lit du cours d'eau étroit et encaissé, les matériaux en couches minces et relativement imperméables recouvrant les versants ainsi que l'activité humaine influencent la capacité de rétention de l'eau du bassin versant, qui aura tendance à réagir plus rapidement aux précipitations, ce qui peut entraîner des crues torrentielles (figure 48). Les données géospatiales montrent d'ailleurs deux avulsions en amont du camping Le Genévrier. Cette information est également représentée dans la figure 50, où l'on peut comparer les tracés historiques de la rivière des Mares. Des cônes alluviaux ont aussi été repérés à certains endroits, témoignant de l'activité torrentielle du cours d'eau et de ses affluents (figure 58).

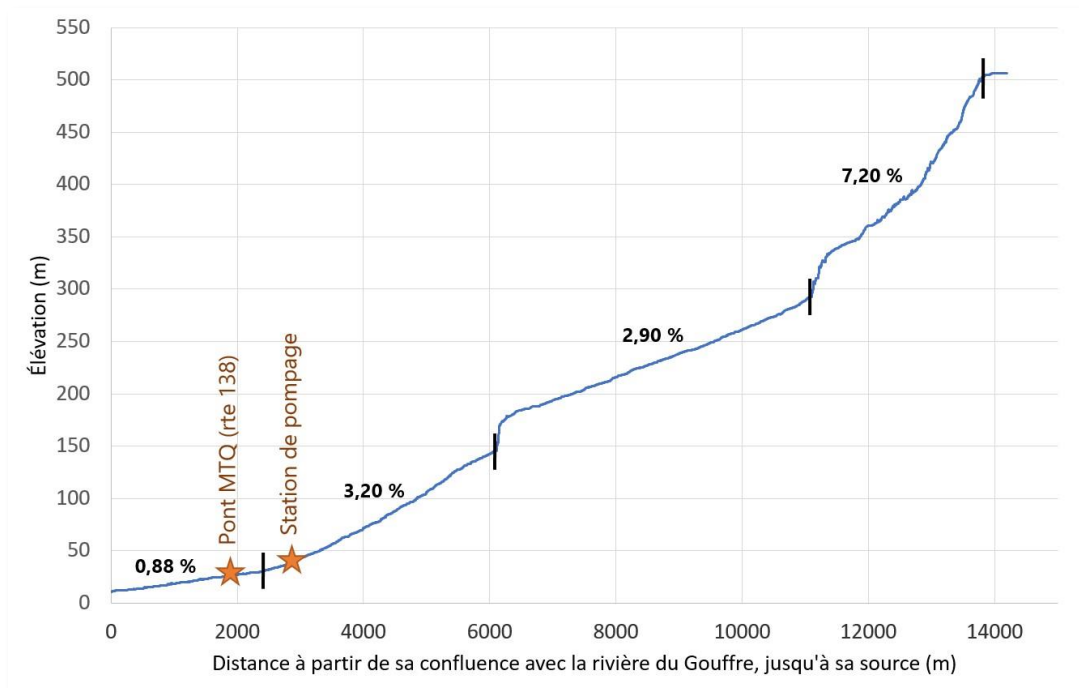


Figure 48. Profil topographique de la rivière des Mares, à partir de sa confluence avec la rivière du Gouffre jusqu'à sa source. Le camping Le Genévrier est situé dans la portion en aval de la rivière, où les trois derniers kilomètres présentent un adoucissement de la pente du cours d'eau, passant d'un coefficient de pente de 3,2 % à 0,88 %

Lors de la visite sur le terrain en août 2022 (figures 51 à 57), il avait été noté que le chenal, présentant une forme rectiligne dans la section du camping, montrait des signes d'incision et semblait confiné dans les dépôts très grossiers (couche d'armure) à matrice sableuse (figure 49).

On note aussi la présence de nombreux bancs alluviaux composés de matériaux grossiers (sable, graviers et blocs pluricentimétriques) ainsi qu'une quantité importante d'alluvions. Ces dernières résultent d'une charge de fond surabondante et de l'importante capacité de transport du cours d'eau lors de l'événement. Il est aussi possible d'observer une quantité importante de débris ligneux délaissés.

En aval du pont de la route 138, il est possible d'observer beaucoup de mobilité latérale. L'érosion se produit principalement dans les rives concaves de la rivière des Mares. L'embouchure de la rivière a été modifiée passablement à la suite de l'événement. Le cours a été déporté vers le sud-est. Par endroit, il a été possible d'observer les argiles de la mer de Goldthwait sous-jacentes aux dépôts plus grossiers.

À noter : Il n'existe pas de carte des zones inondables en vigueur pour ce secteur.



Figure 49. Comparaison du tracé de la rivière des Mares avant (2018 à gauche) et après l'événement du 1^{er} mai (2023 à droite)



Figure 50. Positions historiques des berges de la rivière des Mares. Les années antérieures ont été superposées sur l'année en cours pour mieux représenter la mobilité du cours d'eau et l'élargissement du chenal lors de l'événement du 1^{er} mai 2023



Figure 51. Avulsion du chenal de la rivière des Mares, camping Le Genévrier. Le chenal s'est déplacé d'environ 85 mètres à cet endroit. La largeur du chenal est passée d'environ 27 mètres à 125 mètres à cet endroit (point 1)



Figure 52. Avulsion du chenal de la rivière des Mares, camping Le Genévrier (point 2)



Figure 53. Avulsion du chenal de la rivière des Mares, camping Le Genévrier (point 3)



Figure 54. Chenal de débordement de la rivière des Mares, camping Le Genévrier (point 4)



Figure 55. Localisation des figures ci-dessus



Figure 56. Changement du style fluvial : linéaire et confiné, signes d'incision du chenal → divagant, bancs alluviaux de sables et de graviers



Figure 57. Avulsion du chenal de la rivière des Mares, camping Le Genévrier. Érosion verticale d'environ 60 cm près du pilier, en bas à droite

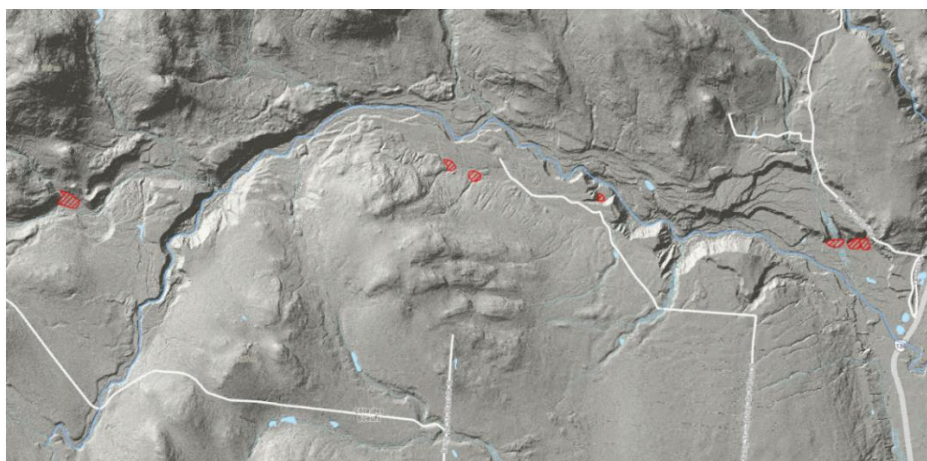


Figure 58. Cônes alluviaux circonscrits préliminairement (en rouge) pour le secteur de la rivière des Mares

9.3. Saint-Urbain : confluence des rivières Le Petit Bras et Le Gros Bras

À la suite de l'événement du 1^{er} mai, beaucoup de mobilité a pu être observée à la confluence des rivières Le Petit Bras et Le Gros Bras (figure 59). Ce secteur a été fortement touché par l'aléa de mobilité, soit latérale, verticale, en plus d'une avulsion du chenal de la rivière Le Petit Bras. L'évolution de la mobilité du cours d'eau est représentée à la figure 60, par la superposition de tracés historiques et récents des rivières.

En amont du pont de la route 138, plusieurs secteurs ont aussi subi de l'érosion latérale (figures 63 à 68). Les deux rivières ont érodé de hautes terrasses anciennes (élargissement de leur plaine alluviale fonctionnelle) sur plusieurs dizaines de mètres de largeur.

Les observations sur le terrain ont permis de constater beaucoup de mobilité verticale (incision du lit, ainsi que des chenaux de débordement) dans les deux cours d'eau. La rivière Gros Bras a d'ailleurs débordé sur la plaine alluviale en empruntant une route comme chemin préférentiel, qui s'est incisée d'environ 7 mètres verticalement. De nombreux talus sableux de plusieurs mètres de hauteur, formés par l'érosion de la base de terrasses anciennes, présentent une pente très abrupte (presque verticale) qui s'adoucira avec le temps. Il est à prévoir un recul du haut de ces talus dans les prochaines semaines, prochains mois et prochaines années. Deux maisons à proximité de la rivière Le Petit Bras sont d'ailleurs très proches de ces hauts de talus (figures 65 et 68).

Les données géospatiales permettent aussi de constater que les deux rivières s'écoulent à travers plusieurs chenaux par endroits en occupant des chenaux secondaires.

La rivière Le Petit Bras a subi une avulsion de son chenal en amont de la confluence avec la rivière Le Gros Bras. Les données géospatiales (images aériennes et Lidar) montrent aussi une avulsion entre le pont de la route 138 et la confluence avec la rivière du Gouffre (coupure de méandre) représentée aux figures 65 et 68.

Il est possible d'observer la présence de nombreux bancs alluviaux composés de sédiments grossiers (graviers, cailloux, galets, blocs, etc.) qui illustrent un transport sédimentaire important et une surabondance de la charge de fond.

Les profils topographiques des rivières Le Petit Bras et Le Gros Bras (figures 61 et 62) illustrent que les zones fortement touchées sont situées dans une zone de rupture de pente, caractérisée par l'adoucissement de la pente des cours d'eau.

À noter : Il n'existe pas de carte des zones inondables en vigueur pour ce secteur.



Figure 59. Comparaison de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras avant 2020 (photo du haut) et après l'événement du 1^{er} mai 2023 (photo du bas)



Figure 60. Positions historiques des berges des rivières Le Petit Bras et Le Gros Bras. Les années antérieures ont été superposées sur l'année en cours pour mieux représenter la mobilité du cours d'eau et l'élargissement du chenal lors de l'événement du 1^{er} mai 2023

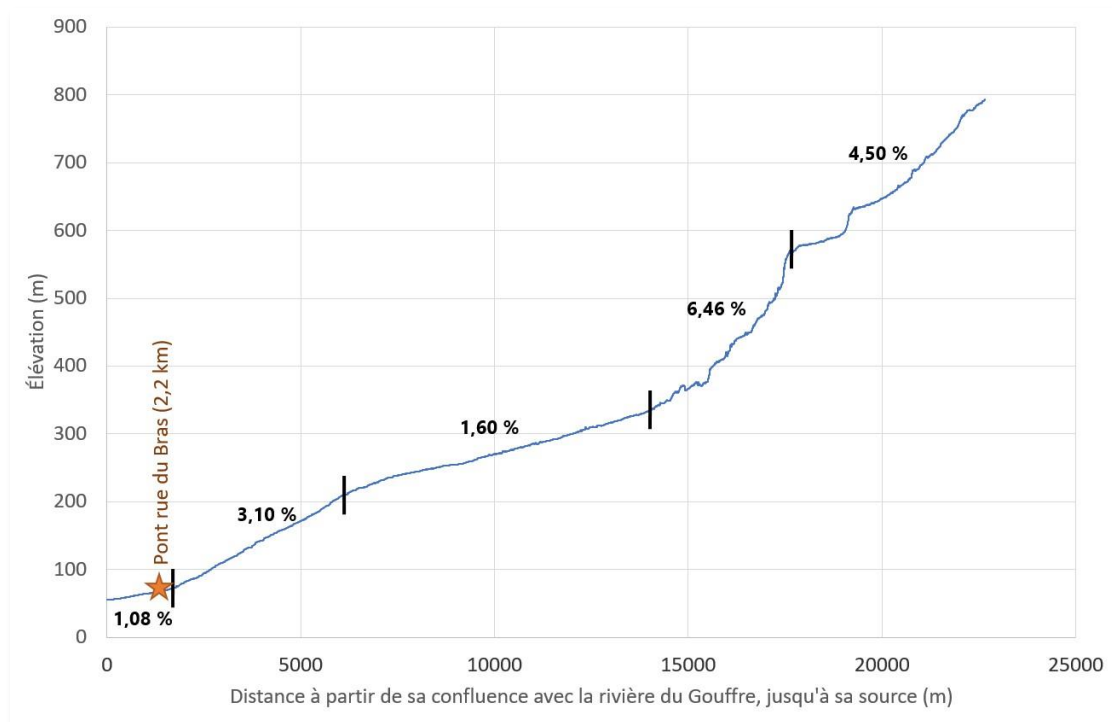


Figure 61. Profil topographique de la rivière Le Gros Bras à partir de sa confluence avec la rivière du Gouffre, jusqu'à sa source. Le secteur du pont privé de la rue du Bras est situé dans une zone d'adoucissement de la pente du cours d'eau, passant d'un coefficient de pente de 3,11 % à 1,08 %

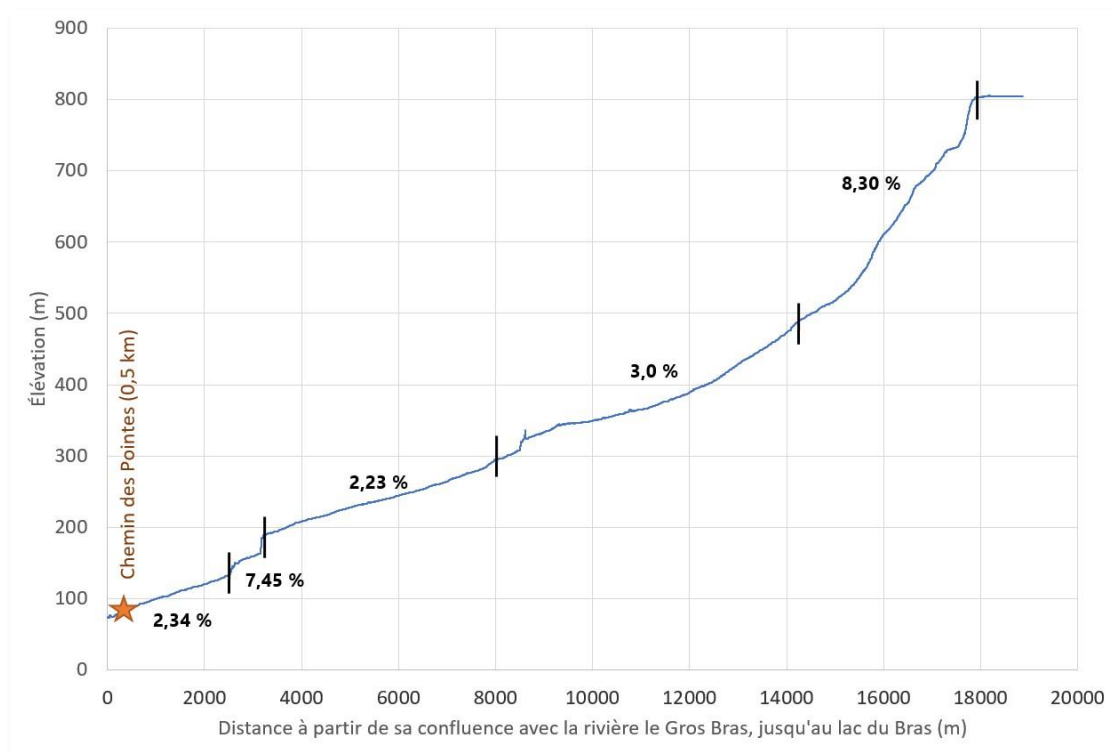


Figure 62. Profil topographique de la rivière Le Petit Bras, de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras, jusqu'à sa source au lac du Bras. La confluence des deux rivières est marquée par un adoucissement de la pente du cours d'eau



Figure 63. Pont privé de la rue du Bras à Saint-Urbain. Photo oblique du pont avant l'événement, le 24 août 2022, et après l'événement, le 8 mai 2023. Élargissement marqué de la largeur du chenal (au niveau du pont) d'environ 15 mètres avant l'événement et d'environ 45 mètres après



Figure 64. Pont privé de la rue du Bras à Saint-Urbain. Photos obliques en direction de l'amont de la rivière avant l'événement (24 août 2022) et après l'événement (8 mai 2023). Changement du style fluvial de linéaire (seuils-mouilles) à divagant. Changement dans le calibre des sédiments du lit : avant, composé de blocs pluridécimétriques à métriques avec peu de sédiments fins; après, composé de blocs décimétriques avec sables et graviers sous forme de plusieurs bancs d'accumulation



Figure 65. Secteur de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras. Photo oblique en direction de l'amont de la rivière Le Petit Bras. La hauteur du talus est estimée à environ 20 mètres



Figure 66. Secteur de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras avant l'événement, le 24 août 2022 (l'écoulement s'effectue de gauche à droite de la photo)



Figure 67. Secteur de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras après l'événement, le 8 mai 2023 (l'écoulement s'effectue de gauche à droite de la photo)



Figure 68. Érosion verticale de près de 7 mètres dans un chenal de débordement (à gauche de la maison) du secteur de la confluence des rivières Le Gros Bras et Le Petit Bras

9.4. Saint-Urbain : L'intersection de la rue Sainte-Anne et du rang Saint-Jean-Baptiste

Les observations faites à l'intersection de la rue Sainte-Anne et du rang Saint-Jean-Baptiste font état de peu de mobilité latérale. Quelques sections de berges ont été érodées, dont l'ancrage du pont du rang Saint-Jean-Baptiste (figure 70). Il est cependant suspecté que le lit se soit incisé, dans la portion en aval du pont du rang Saint-Jean-Baptiste, compte tenu du confinement du chenal et de l'absence d'une plaine alluviale, qui ont pour effet d'augmenter les vitesses d'écoulement. De plus, le secteur a été touché par des inondations provoquées autant par le débordement de la rivière du Gouffre que celui du ruisseau de l'Église, avec des hauteurs d'eau mesurées pouvant atteindre près de 1,5 mètre près de quelques résidences. La zone touchée par les inondations dans ce secteur correspond davantage à la zone de faible courant représentée à la figure 69.

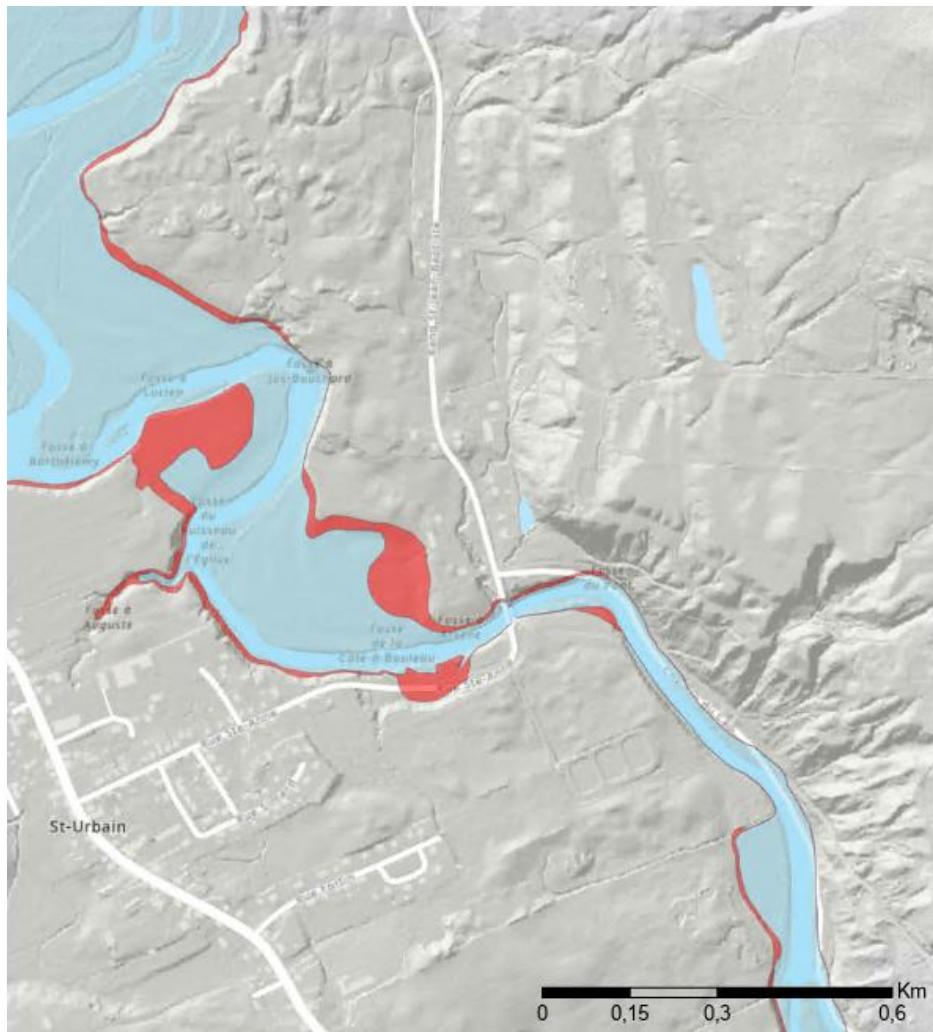


Figure 69. Carte des zones inondables pour le secteur de l'intersection de la rue Sainte-Anne et du rang Saint-Jean-Baptiste réalisée à l'aide de l'étude de Déziel et Boucher de 1979. La zone en bleu correspond à la zone de grand courant et en rouge à la zone de faible courant

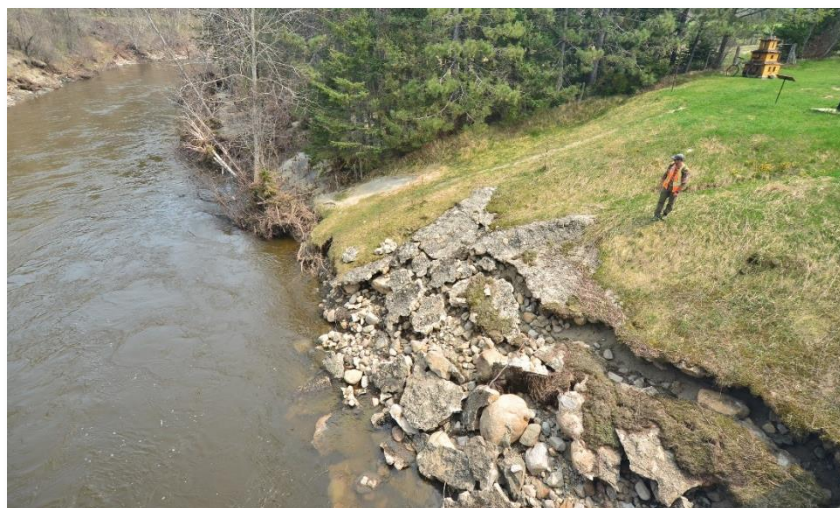


Figure 70. Érosion de l'ancrage du pont à l'intersection de la rue Sainte-Anne et du rang Saint-Jean-Baptiste, à Saint-Urbain

9.5. Saint-Urbain : Secteur du rang Saint-Georges

Le secteur d'intérêt du rang Saint-Georges est situé sur la rive droite de la rivière du Gouffre, dans la berge convexe du méandre où le rang traverse la rivière (figure 71). Cette zone correspond à la plaine alluviale de la rivière du Gouffre et est définie par la zone de grand courant dans la cartographie des zones inondables (figure 72). Le secteur a été touché par un débordement de la rivière jusqu'à plus de 250 mètres de celle-ci. Des hauteurs d'eau ont été mesurées dans le secteur, atteignant plus d'un mètre près de certaines résidences. Plusieurs résidences ont d'ailleurs été inondées lors de l'événement du 1^{er} mai 2023. Des débris et des accumulations de sédiments importantes, de plus de 30 cm par endroit, ont également été observés sur le terrain.



Figure 71. Vue aérienne du secteur inondé du rang Saint-Georges le 5 mai 2023

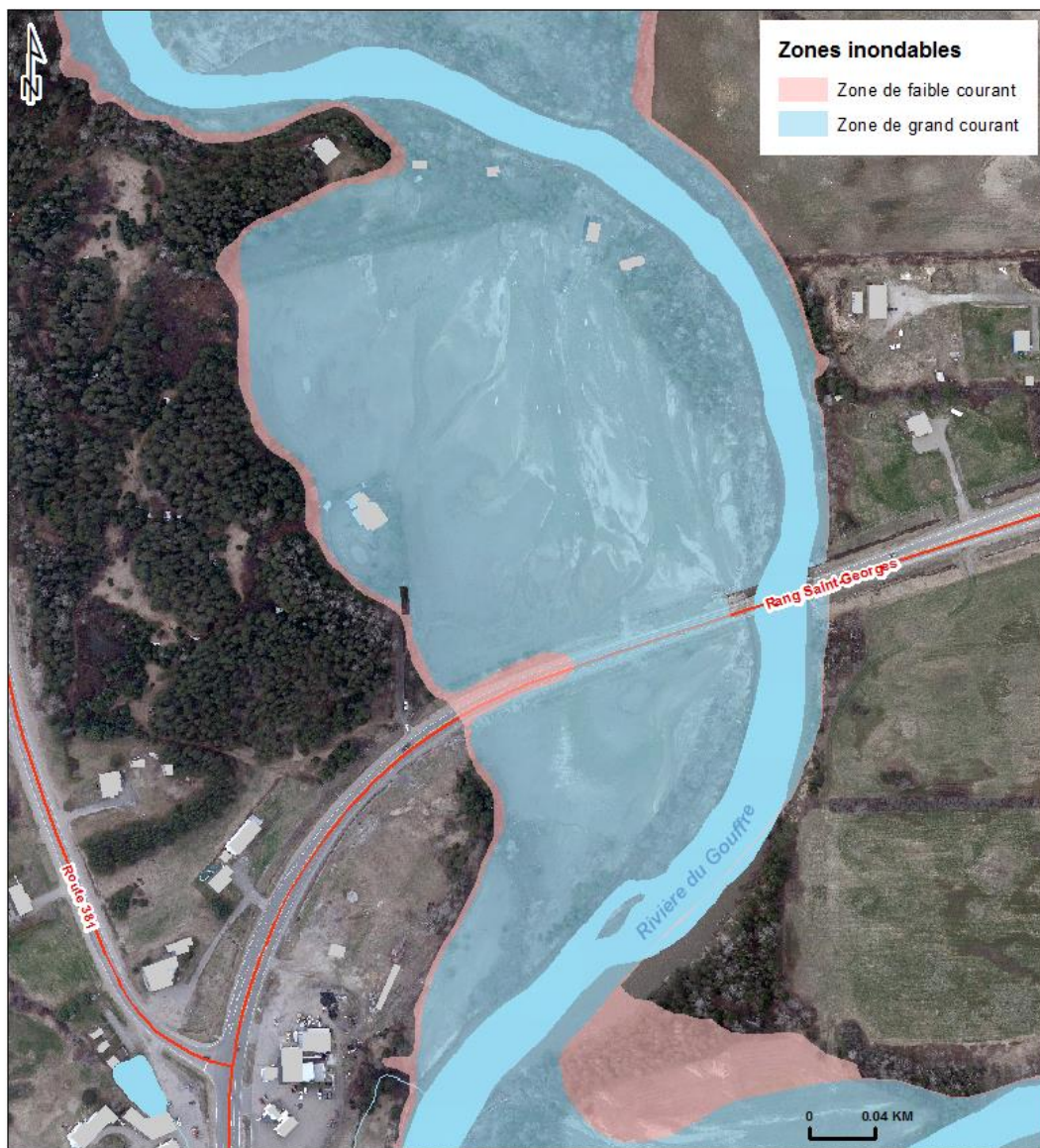


Figure 72. Carte des zones inondables pour le secteur du rang Saint-Georges à Saint-Urbain, réalisée à l'aide de l'étude de Déziel et Boucher de 1979

10. Références

Brooks, G.R. et D. Perret. « A long-term context for the 1663 Charlevoix CE earthquake interpreted from the postglacial landslide record in the Gouffre Valley, Quebec, Canada », *Quaternary Science Reviews*, vol. 309, 2023, 108096.

Chagnon, J.-Y. *Étude des phénomènes d'érosion et des dépôts de surface dans la région de Baie-Saint-Paul – Saint-Urbain, comté de Charlevoix*, Ministère des Richesses naturelles du Québec, Direction générale des mines, 1969, 40 p. et 2 plans en annexe.

Demers, S., et autres. « L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec) », *Physio-Géo*, vol. 8, 2014, p. 67-88.

Déziel, J. et J.-P. Boucher. *Cartographie des plaines d'inondation – Rivière du Gouffre. Calcul des cotes d'inondation – Crue de récurrence 20 ans et 100 ans*, Ministère des Richesses naturelles, 1979.

Filion, L., F. Quinty et C. Begin. « A chronology of landslide activity in the valley of Rivière du Gouffre, Charlevoix, Quebec », *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 28, 1991, p. 250-256.

Gouvernement du Québec. *Glissements de terrain dans les dépôts meubles : types et causes*, 2017, 10 p.

[\[https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/glissements_terrains_types_causes.pdf\]](https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/glissements_terrains_types_causes.pdf).

Maltais, M. *Développement de connaissances et d'outils pour l'analyse et la gestion des aléas hydrogéomorphologiques (HGM2). Volet 2 : Cartographie des aléas hydrogéomorphologiques*, Rapport final présenté au ministère de la Sécurité publique, 2021, 80 p.

OBV Charlevoix-Montmorency. *Plan directeur de l'eau de la zone hydrique Charlevoix-Montmorency*, Chapitre 5 : Bassin versant de la rivière du Gouffre, Présenté au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Août 2014, 2014, 903 p.

[\[https://drive.google.com/file/d/1bscrG23D7hP33IAgWF3tZuYeapzsFQSQ/view\]](https://drive.google.com/file/d/1bscrG23D7hP33IAgWF3tZuYeapzsFQSQ/view).

Perret, D., et autres. « Sismostratigraphie de la partie aval de la vallée de la rivière du Gouffre et du chenal nord de l'île aux Coudres », Arrêt 1.2 dans *Excursion en Charlevoix*, Association québécoise pour l'étude du Quaternaire (AQQUA), septembre 2012.

Poulin Leboeuf, L., D. Demers et M. Allard. « Portrait statistique de la distribution temporelle et spatiale des glissements de terrain au Québec », *Géorisques-VIII*, Québec, Canada, 2022.

Annexes

Annexe 1 : Typologie des glissements de terrain

Glissement de terrain superficiel

Ce type de glissement est caractérisé par une surface de rupture peu profonde (figure 1), généralement d'une profondeur inférieure à 1,5 mètre sous le terrain naturel.

Dans les talus constitués de dépôts granulaires, il est généralement déclenché par l'érosion en pied du talus et peut se produire par tranches successives, tant que l'érosion en pied est active. Un recul de quelques mètres peut se produire en sommet du talus à chaque tranche de glissement.

Dans les talus argileux (figure 1), il ne touche que la couche de sol superficielle altérée appelée « croûte argileuse ». De façon naturelle, il est causé par la saturation des sols lors de fortes pluies ou de la fonte de la neige. En règle générale, ce glissement se produit exclusivement dans le talus sans en toucher le sommet. Par contre, ses débris peuvent s'étaler à la base du talus sur des distances parfois importantes (figure 3). Bien que ce type de glissement puisse sembler anodin, il peut causer d'importants dommages aux bâtiments, voire menacer la sécurité des occupants.

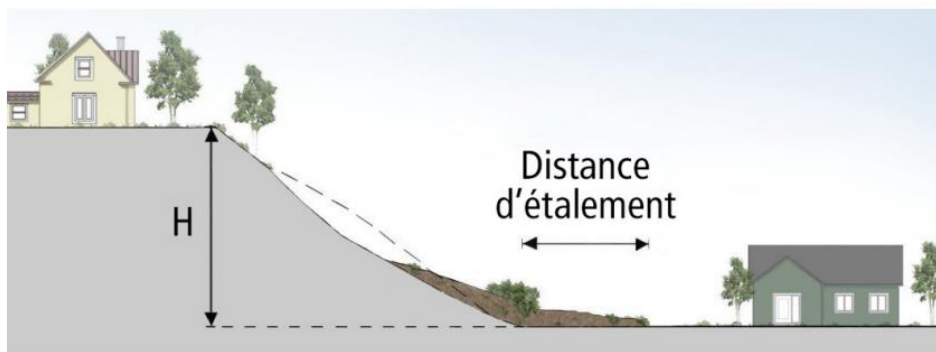


Figure 1. Vue en coupe d'un glissement superficiel

Glissement de terrain rotationnel

Le glissement rotationnel est caractérisé par une surface de rupture de forme circulaire (figure 4) qui peut se propager à quelques mètres de profondeur. Il se produit dans les dépôts silto-argileux et est très souvent causé par l'érosion naturelle d'un cours d'eau à la base d'un talus. L'action de l'eau à la base des talus a ainsi pour effet d'entraîner de façon graduelle du matériel qui agissait comme contrepoids naturel. Petit à petit, cette érosion modifie les conditions d'équilibre de la pente. Ce type de glissement peut toucher une bande de terrain située au sommet du talus, dont le recul est généralement inférieur à une distance équivalant à une fois la hauteur du talus. Lors d'un glissement rotationnel, les éléments situés dans la bande de terrain en sommet de talus (routes, bâtiments, infrastructures, etc.) peuvent subir des dommages dont l'importance peut varier selon les situations.

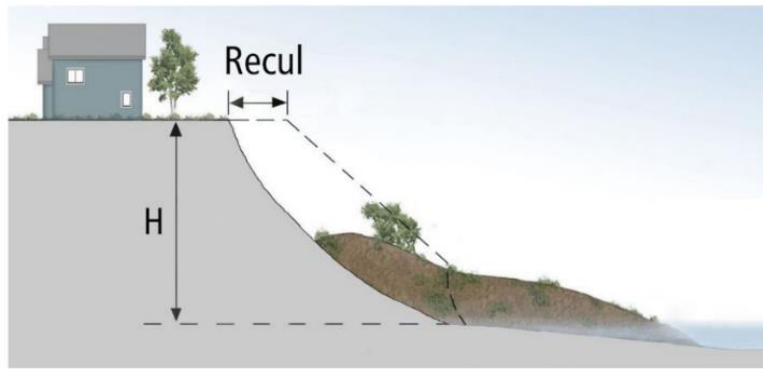


Figure 4. Vue en coupe d'un glissement rotationnel



Figure 5. Vue en perspective d'un glissement de terrain fortement rétrogressif

Glissement de terrain fortement rétrogressif

Les glissements fortement rétrogressifs (figure 5) se produisent uniquement dans les sols argileux sensibles. Ils touchent non seulement le talus, mais aussi des bandes de terrain de dimensions importantes à l'arrière du sommet du talus (figure 5). Leurs reculs peuvent atteindre plusieurs dizaines, et parfois plusieurs centaines de mètres, et ce, en quelques minutes seulement. Les débris constituent une masse importante et peuvent se propager, dans certains cas, sur des distances considérables. Les bâtiments et les infrastructures situés sur les terrains touchés autant par le recul du glissement que par la propagation de ses débris peuvent être complètement détruits.

Source : Gouvernement du Québec. [Glissements de terrain dans les dépôts meubles : types et causes](#), 2017, 10 p.

**Annexe 2 : Cartographie des plaines inondables –
Rivière du Gouffre – Calcul des cotes d’inondation
de crues de récurrence 20 ans et 100 ans**

MINISTÈRE DES RICHESSES NATURELLES

SERVICE DE L'HYDROMÉTRIE

CARTOGRAPHIE
DES
PLAINES D'INONDATION

RIVIÈRE DU GOUFFRE

CALCUL DES COTES D'INONDATION
CRUE DE RECURRENCE 20 ANS ET 100 ANS

Jacques Déziel, ing.,
Division de l'Information.

Jean-Paul Boucher, ing.,
Division des Relevés spéciaux.

Le 12 novembre 1979.

ES-79-02

CE RAPPORT ÉTANT PRODUIT DANS LE CADRE D'UN PROGRAMME
CONJOINT FÉDÉRAL-PROVINCIAL, LES MINISTRES N'ACCEPTENT
AUCUNE RESPONSABILITÉ POUR TOUT USAGE DE CE RAPPORT
INTERNE AUTRE QUE LA POURSUITE EXPRESSE DE LA DÉSIGNA-
TION DE L'ENDROIT À ÊTRE DÉSIGNÉ NOMMÉ DANS LE TITRE
DU RAPPORT.

Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de la cartographie des plaines d'inondation de certaines rivières du Québec. Il donne une description sommaire des secteurs cartographiés et des méthodes employées pour le calcul des cotes d'inondation et des profils du plan d'eau de la Du Gouffre pour les périodes de retour de 20 et 100 ans.

Secteur cartographié

La rivière Du Gouffre fut cartographiée depuis l'embouchure jusqu'à environ dix (10) kilomètres en amont de Saint-Urbain. Le secteur cartographié et la localisation des stations hydrométriques sont illustrés sur la carte 1.

Les données

Sur la rivière, les niveaux maximaux se présentent généralement au printemps. En 1976, nous avons observé le plus haut niveau en juillet soit 9,78 m. Les niveaux utilisés ne tiennent pas compte des embâcles de glace, ce qui permet d'établir des lignes de plan d'eau correspondantes aux conditions d'eau libre.

La station 051301 - Du Gouffre à Baie Saint-Paul existe depuis 1968. Nous avons en 1978 installé une deuxième station au pont-route à Saint-Urbain et des échelles au pont-route 138, au pont-route dans Baie Saint-Paul et au pont du C.N. Ces échelles ont permis d'étudier les crues de 1978 et 1979 en plus de fournir des relevés pour le calcul des courbes de remous. Voici la liste, la localisation et les périodes d'opération de ces stations.

- 051301 - Du Gouffre à 1,6 km en amont du pont-route 362 à Baie Saint-Paul. Période 1968 à date.
- 051320 - Du Gouffre au pont-route à Saint-Urbain. Période de 1978 et 1979.
- Echelle no.1 - Du Gouffre au pont du C.N. Période 1978 et 1979.
- Echelle no.2 - Du Gouffre au pont-route no.362 dans la ville de Baie Saint-Paul - Période 1978 et 1979.
- Echelle no.3 - Du Gouffre au pont-route 138. Période 1978 et 1979.
- Marégraphe - Saint-Laurent à Saint-Joseph-de-la-Rive. Station marégraphique 1968 à date.

Méthode de calcul

Pour l'analyse statistique des données hydrométriques, nous avons appliqué la loi log Pearson III ou gamma tronqué à

trois paramètres . Les paramètres de la loi furent évalués par la méthode des moments, tel que défini par le Water Resources Council U.S.A. et les intervalles de confiance furent calculés selon la procédure expliquée dans "Introduction to Hydrology" de Warren Viessemand Jr, Terence E. Harbough et John W. Knapp. Le choix de la loi Log-Pearson III est conforme aux résultats d'une étude faite par le service de l'Hydro-métrie en 1978 et publiée sous le titre "H-P-47 Meilleur ajustement statistique aux débits journaliers de crue et d'étiage des rivières du Québec". Pour établir les cotes dans la partie aval de la Du Gouffre, nous avons utilisé les courbes de remous faites en 1972-73 par le service d'Aménagement et reprises en 1979 par le service des Interventions; un rapport complet est en préparation à ce service. Tous les résultats (cotes) relatifs aux plans d'eau 20 ans et 100 ans ainsi que la crue de 1979 apparaissent à la figure 3.

Calcul des plans d'eau

Tronçon aval: embouchure - station 051301

Dans ce tronçon, les cotes relatives à des débits de récurrence 20 ans et 100 ans ont été déterminées à l'aide du modèle "Courbe de remous". Ces calculs furent réalisés par

Le service des interventions de la direction générale des Eaux pour les sections (établies en 1978) allant du pont du C.N. jusqu'à l'amont de la station 051301. A l'aide du modèle, il avait été déterminé que les marées n'affectaient pas les cotes à l'amont du pont du C.N.; nous avons donc aussi utilisé les valeurs du modèle pour le tronçon aval du pont du C.N. et les cotes de marée de récurrence 20 ans et 100 ans à St-Joseph de la Rive, comme point de départ.

Les relevés de crue de 1979 aux deux (2) échelles à maxima (pont du C.N. et pont-route no. 362) ainsi que le débit maximum et le niveau correspondant à la station 051301 nous ont permis de vérifier et confirmer la validité du modèle "Courbe de remous" pour le tronçon aval.

Tronçon intermédiaire: De la station 051301 au pont-route à Saint-Urbain

Au pont-route 138 des relevés de niveaux d'eau et des relevés de crue (échelle à maxima) nous ont permis d'établir une relation niveau-niveau avec la station de jaugeage à Saint-Urbain. Des relevés intermédiaires entre Saint-Urbain et le pont-route 138 nous ont permis d'établir les pentes de la rivière dans cette zone et les cotes d'inondation de ce tronçon furent établies par interpolation.

Du pont-route 138 à la station 051301, nous avons aussi procédé par interpolation en reliant les cotes 20 ans et 100 ans au pont-route 138 avec celles de la station 051301, en tenant compte du profil en long du tronçon.

Tronçon: amont pont-route à Saint-Urbain

Au site du pont-route, la station de jaugeage no.051320 fut en opération pendant deux (2) ans; ce qui nous a permis d'utiliser les valeurs de débit de la station 051301 (1968-79) en transposant l'information par le rapport des bassins de drainage aux deux stations, en plus d'un enregistreur, la station 051320 était équipée d'échelles à maxima.

Pour ce tronçon incluant les 300 m. en amont du pont-route, nous avons effectué des relevés pour déterminer le profil des sections transversales de la rivière nécessaires au modèle "Courbes de remous". A l'aide de ce modèle, les cotes relatives aux débits de récurrence 20 ans et 100 ans transposés de la station 051301 furent établies.

La calibration du modèle fut réalisée d'après les relevés de niveaux d'eau aux sections transversales et aux débits correspondant à la station de jaugeage. Le relevé des cotes d'inondation de 1976 a confirmé le profil de la courbe de remous pour ce secteur.

Tableaux et graphiques

Une carte donne la localisation du segment de rivière cartographié et des échelles utilisées.

Sur le tableau 1, nous avons compilé les résultats de la loi Log Pearson III et des niveaux observés en 1979. La figure 1 représente les niveaux maximaux journaliers annuels à la station 051301 pour la période 1968-79 et la figure 2, un profil en long établi à partir des courbes de niveau des cartes 1: 10 000.

A la figure 3, on donne le profil des plans d'eau pour l'année 1979 et pour des périodes de retour de 20 ans et 100 ans. La relation niveau-débit de la station 051320 est représentée à la figure 4. Enfin, les figures 5 et 6 montrent les résultats à l'ajustement de la loi log-Pearson III ainsi que les intervalles de confiance à 95% pour les niveaux maximaux à Baie Saint-Paul et Saint-Joseph-de-la-Rive. Dans les deux cas, la période documentée est très courte, 12 et 11 ans respectivement.

Jacques Déziel, ing.
Division de l'information
hydrologique.

Jean-Paul Boucher, ing.,
Division des Relevés spéciaux.

Le 12 novembre 1979.

CARTE I
 ZONE CARTOGRAPHIÉE
 RIVIÈRE DU GOUFFRE
 localisation des stations

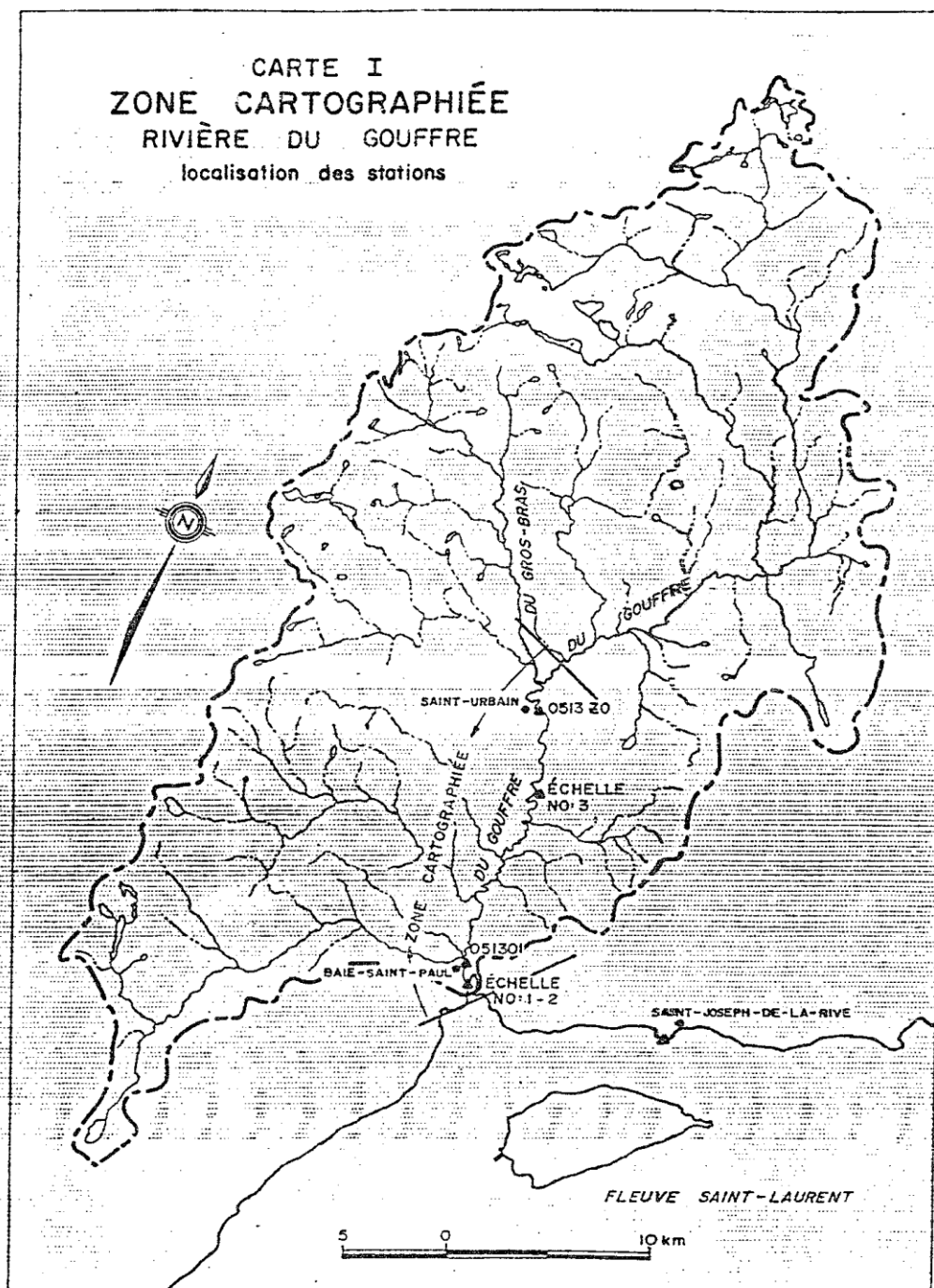


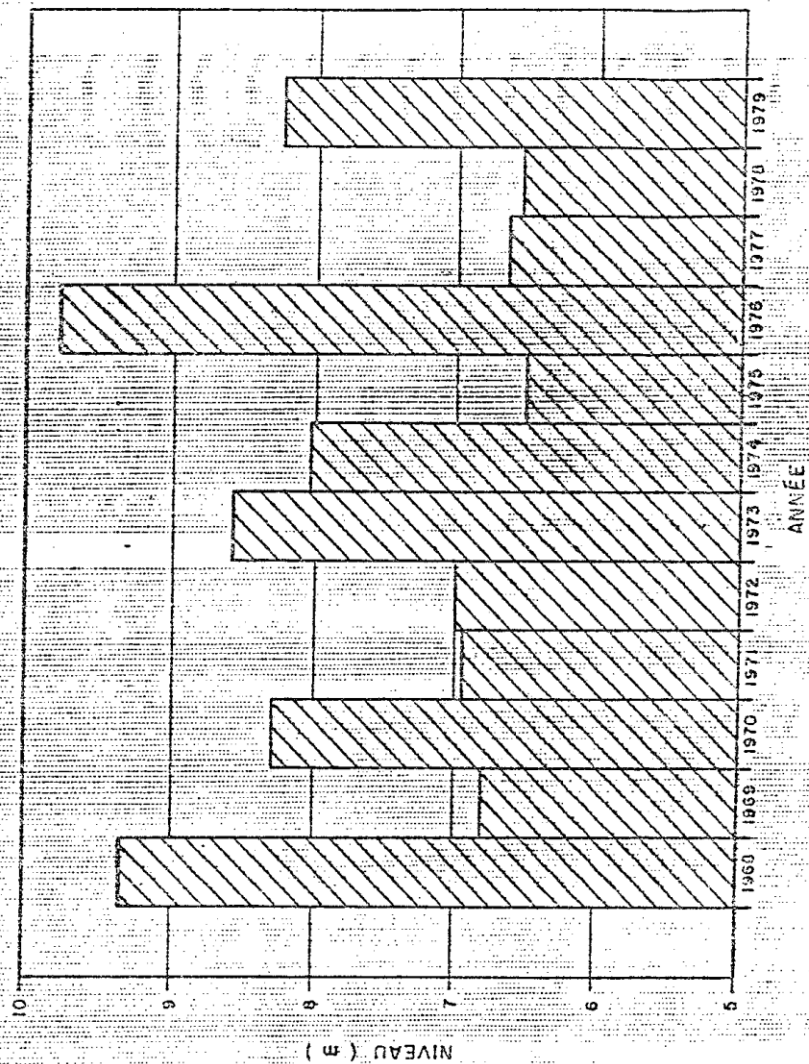
Tableau 1

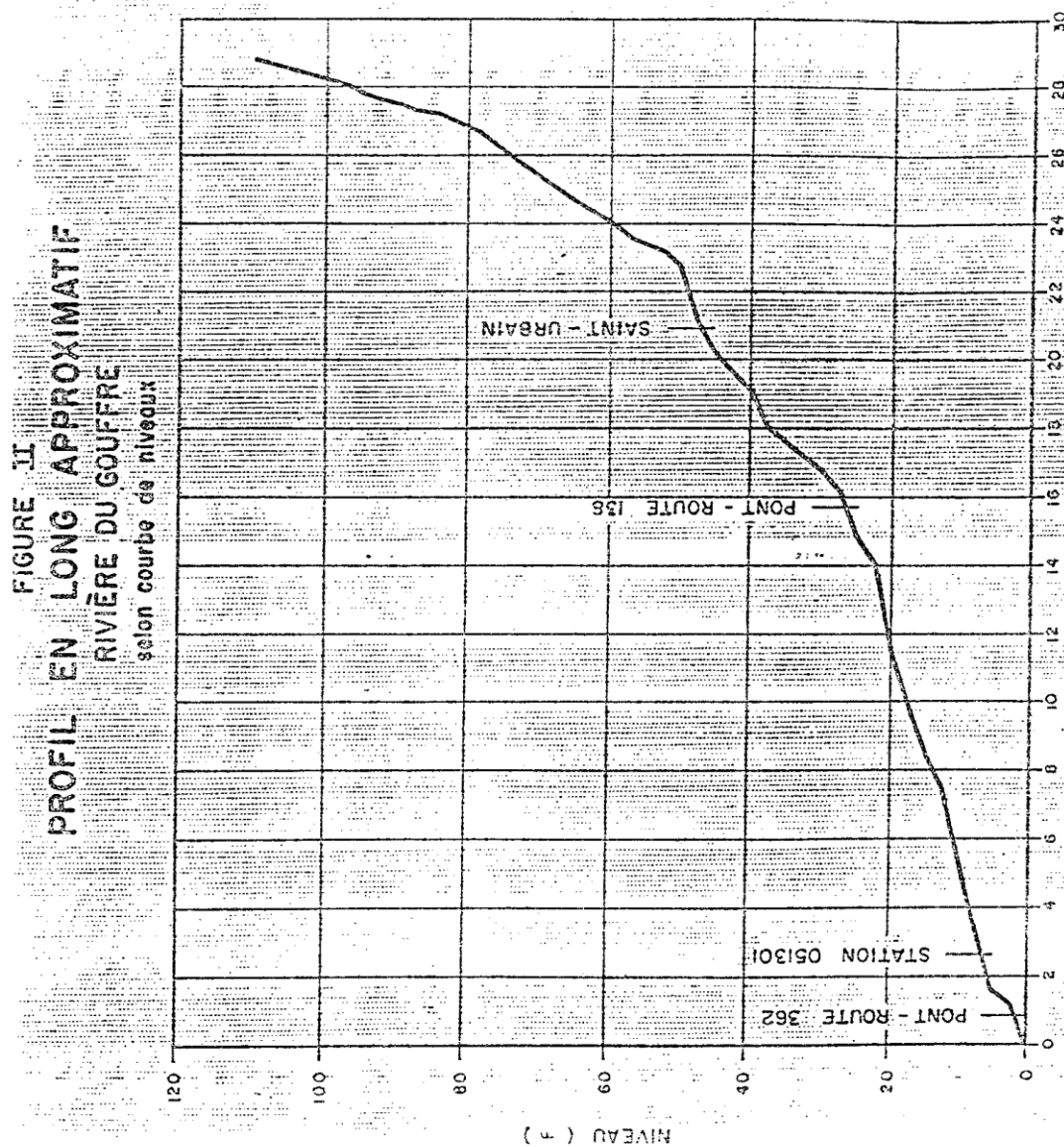
TABLEAU DES NIVEAUX

SITE	NIVEAUX EN METRES		
	20 ans	100 ans	Crue 1979
Saint-Laurent à Saint-Joseph-de-la-Rive *	4,45	4,80	3,35
Echelle au pont du C.N. à Baie-Saint-Paul	—	—	2,90
Echelle au pont-route 362 à Baie-Saint-Paul	—	—	4,72
051301 - Du Gouffre à 1,6 km en amont du pont-route 362 à Baie-Saint-Paul	9,88	11,2	8,26
Echelle au pont-route 138	—	—	29,99
051320 - Du Gouffre au pont-route à Saint-Urbain	—	—	50,08

* A Saint-Joseph-de-la-Rive - valeurs instantanées.

FIGURE I
NIVEAUX MAXIMAUX JOURNALIERS
 051301 - DU GOUFFRE
 1968 à 1979





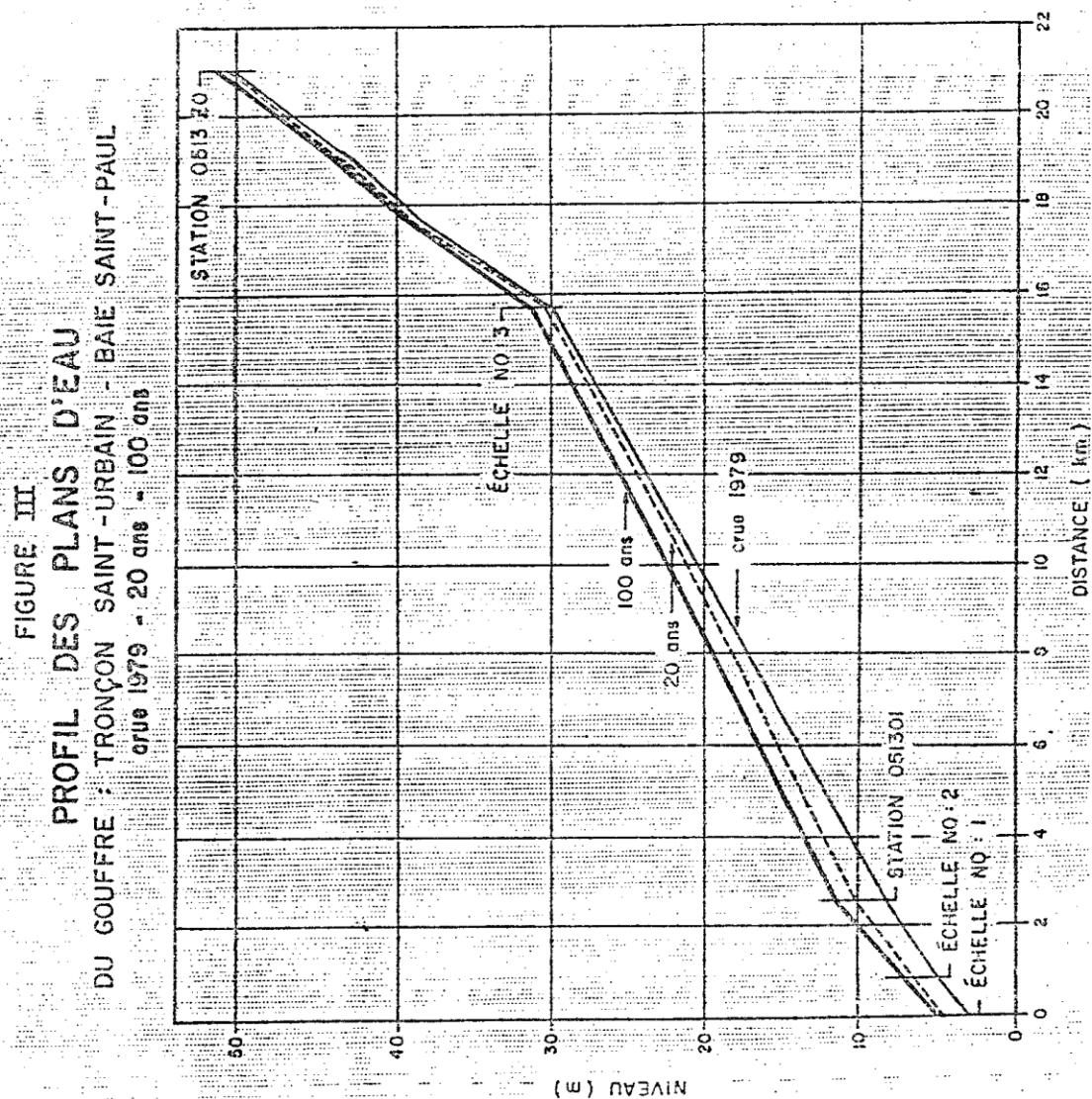


FIGURE IV
 AJUSTEMENT LOG PEARSON III
 051301 - DU GOUFFRE
 1968 à 1979

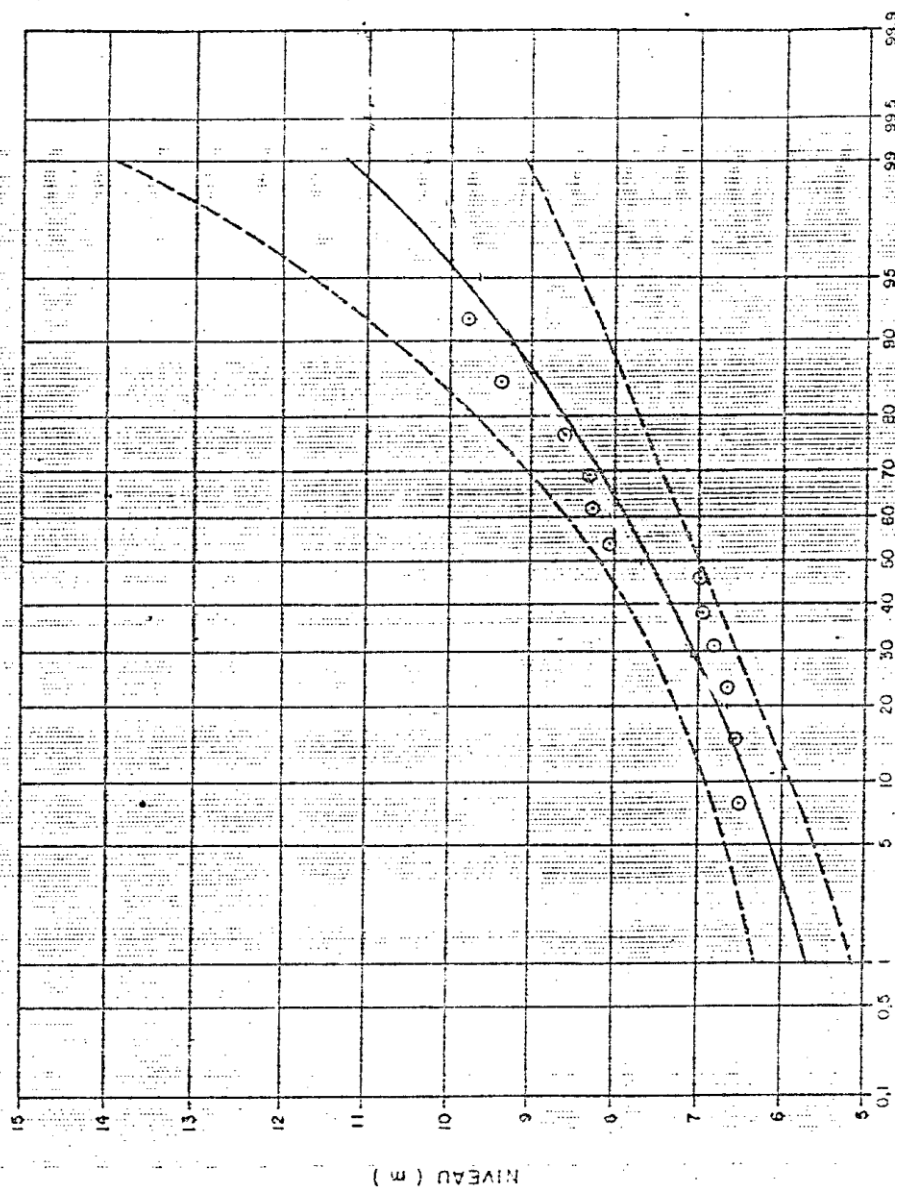
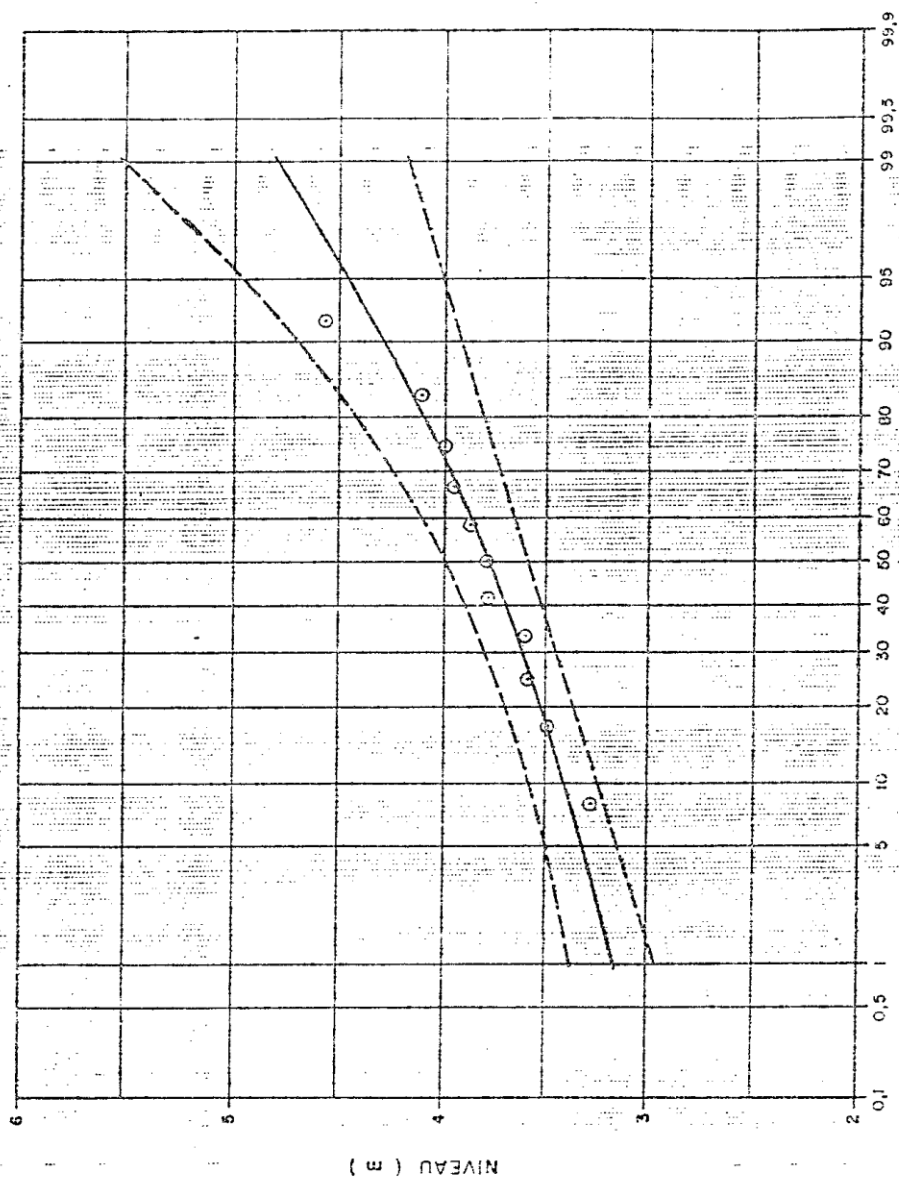


FIGURE VI
 AJUSTEMENT LOG PEARSON III
 SAINT-LAURENT À SAINT-JOSEPH - DE LA RIVE
 1960 à 1970



**Annexe 3 : Rapport technique – Analyse de la récurrence
de la crue du 1^{er} mai 2023 sur la rivière du Gouffre**

DESTINATAIRE : Comité expert interministériel de Baie-Saint-Paul

DATE : Le 8 juin 2023

OBJET : ***Rapport technique – Analyse de la récurrence de la crue du 1^{er} mai 2023 sur la rivière du Gouffre***

Résumé

La présente note technique donne l'estimation de la récurrence de la crue du 1^{er} mai 2023 à la rivière du Gouffre, à la station 051305. Il y a deux difficultés majeures à cette estimation : l'absence d'un long historique et le caractère rapide de la crue (quelques heures). Différentes approches sont mises en place pour contourner ces difficultés et évaluer la sensibilité des estimations aux choix méthodologiques. Les différents résultats permettent d'obtenir l'estimation de la récurrence de la crue 2023, soit 60 ans pour le débit maximum 3 heures et 150 ans pour le débit maximum journalier.

1. Introduction

La présente note technique donne l'estimation de la récurrence de la crue du 1^{er} mai 2023 à la rivière du Gouffre. Il y a deux difficultés majeures à cette estimation : l'absence d'un long historique et le caractère rapide de la crue (quelques heures). La première partie de cette note présente les données disponibles pour l'analyse. La seconde partie détaille la méthodologie mise en place pour pallier les difficultés mentionnées et estimer la récurrence. La dernière partie expose les résultats et leur sensibilité aux choix méthodologiques, ainsi qu'une brève discussion sur ceux-ci.

2. Données

Les données hydrométriques utilisées pour cette analyse sont celles des stations du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) situées dans le bassin versant de la rivière du Gouffre (051301 et 051305), ainsi que celle du bassin versant voisin, la rivière Malbaie (051502). La Figure 1 présente la carte des stations avec les limites de leurs bassins versants et le Tableau 1 résume les principales informations sur ces stations.

675, boulevard René-Lévesque Est
Aile Louis-Alexandre Taschereau, 4^e étage, case 28
Québec (Québec) G1R 5V7

Courriel charles.malenfant@environnement.gouv.qc.ca

Station 051301

La station 051301, maintenant fermée, a été en opération entre 1967 et 1996. L'historique des débits journaliers est disponible, mais il est important de noter que la série ne semble pas stationnaire. En fait, la série des débits maximaux 1968-1996 échoue le test de stationnarité (Mann-Kendall). Il y a une cassure visible vers 1980 (Figure 2) et les premiers jaugeages utilisés pour les courbes de tarage datent de 1982. C'est la raison pour laquelle les données avant 1981 (période 1967-1980) ne sont pas utilisées pour cette analyse. Le plus haut débit jaugé est de 135 m³/s.

Station 051305

La station 051305 est située en amont de l'ancienne station 051301. Elle fournit des données de débits et de niveaux, au pas de temps 15 minutes et journalier depuis août 2020. Le plus haut débit jaugé avant mai 2023 était 107,8 m³/s (28 mai 2020). Le 3 mai 2023, un débit de 166,2 m³/s a été jaugé, puis 99,3 m³/s et 90,5 m³/s le 4 mai, 68,6 m³/s le 5 mai et finalement 79,8 m³/s le 7 mai.

Ces jaugeages, ainsi que les observations terrain, ont fourni les informations nécessaires pour permettre la validation des données de débit pour l'événement du 1^{er} mai 2023 par l'équipe d'hydrométrie du MELCCFP. Des ajustements sur les données préliminaires ont été effectués rétroactivement pour prendre en compte la charge sédimentaire mobile affectant la capacité des sondes à mesurer les niveaux d'eau ainsi que les modifications à la géométrie du contrôle hydraulique pouvant affecter les courbes de tarage utilisées pour calculer les débits.

La qualité des données validées pour l'événement est considérée comme acceptable au lieu de bonne (sur une échelle médiocre – acceptable - bonne) en raison de l'incertitude d'extrapolation de la courbe de tarage ayant servi aux calculs des débits, additionné à la modification du lit de la rivière pendant l'événement. Les données validées s'avèrent toutefois la meilleure estimation possible en regard des informations disponibles.

L'estimation de la récurrence de la crue du 1^{er} mai 2023 à la rivière du Gouffre est réalisée sur les données de cette station. Les valeurs observées lors de cette crue sont présentées au Tableau 2.

Station 051502

La station 051502 a l'avantage de fournir un long historique de débits journaliers et instantanés. Cela permettra de valider la méthodologie utilisée pour estimer la récurrence de la crue du 1^{er} mai 2023 observé à la station 051305. La physiographie de son bassin versant (notamment sa superficie près de trois fois plus grande que 051305), ne permet pas d'utiliser ses données directement pour estimer les récurrences à la rivière du Gouffre.

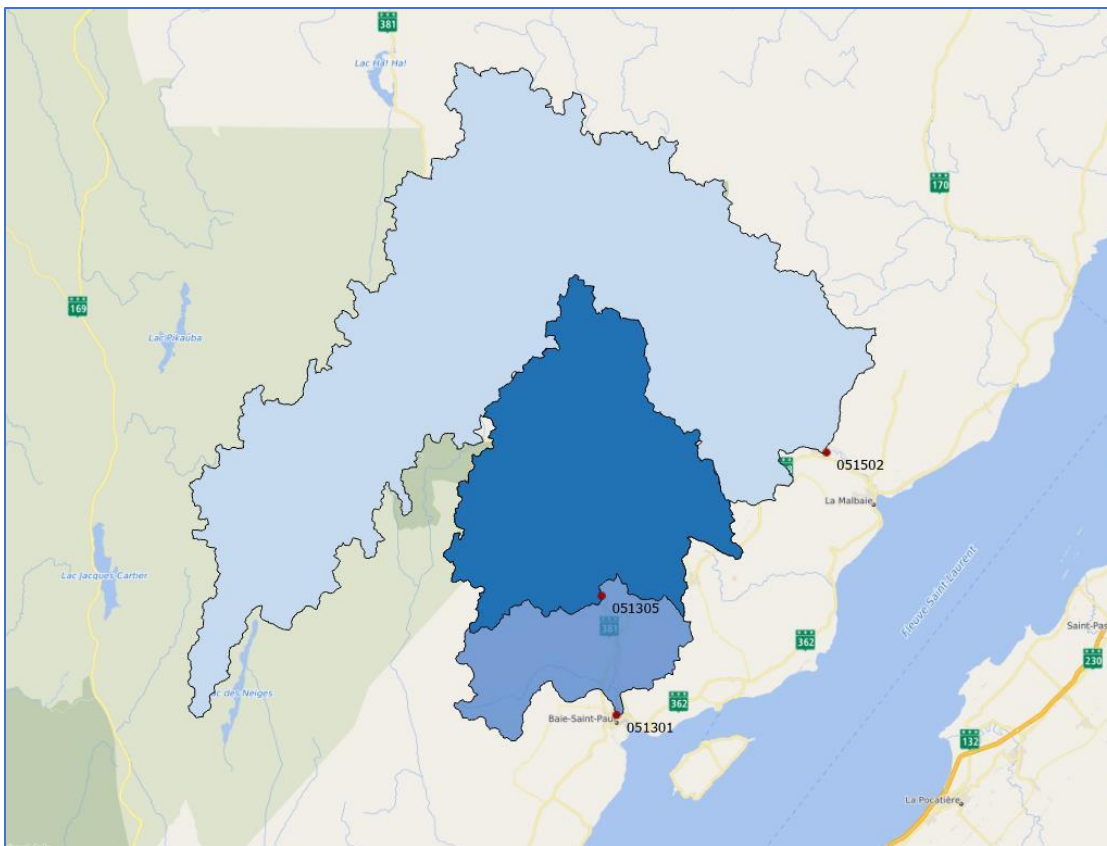


Figure 1. Cartes des stations hydrométriques

Données météorologiques

Les autres données utilisées sont des données climatiques historiques sur grille, servant pour le forçage du modèle hydrologique. Il s'agit de données de précipitations, de température maximum et de température minimum, au pas de temps 3 heures et 24 heures. Les données 3 heures sont issues d'un produit interne nommé GO-Ens qui combine par interpolation optimale les données des stations météorologiques du Réseau météorologique coopératif du Québec (RMCQ), avec les données du *Canadian Precipitation Analysis System*¹ (CaPA). Les données couvrent la période 1999-10-01 au 2022-12-31. Les données 24 heures viennent des grilles du MELCCFP (interpolation par krigeage des stations) et couvrent la période 1970 à 2022. Dans les deux cas, la résolution spatiale est d'environ 10 km.

¹ <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/canadian-centre-climate-services/display-download/technical-documentation-regional-precipitation-analysis.html>

Tableau 1. Métadonnées des stations hydrométriques

Numéro de station	051301	051305	051502
Tronçon associé (Atlas hydroclimatique)	SLNO00196	SLNO00199	SLNO00094
Nom	Du Gouffre	Du Gouffre	Malbaie
Type	Débit	Débit et Niveau	Débit
Description	à 1,6 km en amont du pont-route 362 à Baie-Saint-Paul	80 m en amont du pont du village de Saint-Urbain	à 0,3 km en aval du pont-route à Clermont
Cours d'eau	Rivière du Gouffre	Rivière du Gouffre	Rivière Malbaie
Superficie (km ²)	865	632,3	1707
Latitude	47,4475	47,5596	47,6942
Longitude	-70,5100	-70,5305	-70,2176
Régime	Naturel	Naturel	Influencé journallement
État	Fermée	Ouverte	Ouverte
Début observation 24h	1967	2020	1967
Fin observation 24h	1996	-	-
Début observation 15min	NA	2020-08-10	1997-10-01

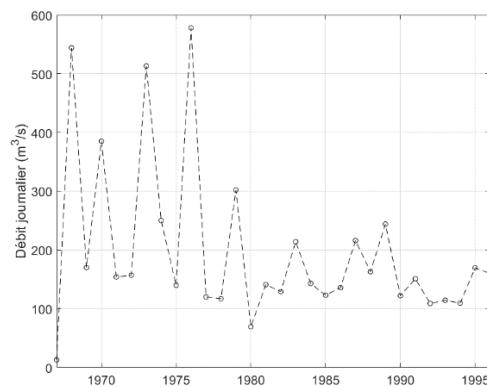
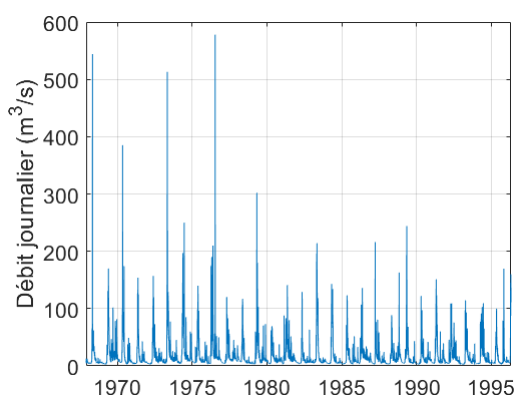


Figure 2. Série de débits journaliers et maxima annuels pour la station 051301. Tableau

2. Valeurs validées de la crue mai 2023 à la station 051305.

Date	2023-05-01 12:30	2023-05-01 12:00	2023-05-02
Pas de temps	15 minutes	3 heures	24 heures
Débits (m ³ /s)	505,0	487,6	310,1

3. Méthodologie

Différentes approches ont été considérées pour pallier les difficultés d'estimer la récurrence de la crue rapide du 1^{er} mai à la station 051305, qui n'a que 2 années d'historique. Elles sont résumées au Tableau 3, avec leurs avantages et désavantages respectifs.

Tableau 3. Approches utilisées pour l'estimation à 051305

Méthodes	Transfert de bassin versant (051301)	Portrait de l'Atlas hydroclimatique	Modélisation hydrologique
Avantages	Simple.	Simple.	Permet d'avoir des données au pas de temps sous-journalier (3 heures), pour plus de 20 ans d'historique et des données journalières pour plus de 50 ans.
Désavantages	- Estimation limitée au pas de temps journalier; - Seulement une quinzaine d'années (1981-1996) utilisables pour l'analyse; - Aucune période commune avec 051305 permettant de valider l'approche.	- Données au pas de temps journalier seulement; - Résultat de l'interpolation optimale biaisé par l'utilisation des données (potentiellement surestimées) avant 1981 à la station 051301.	- Plus complexe à mettre en place. - Calibration locale n'est pas possible (historique trop court à 051305).

3.1. Modélisation hydrologique

Les simulations hydrologiques sont réalisées à l'aide du modèle Hydrotel. L'absence de série de débits de qualité suffisamment longue signifie qu'il n'est pas possible de calibrer localement le modèle. Une calibration globale² au pas de temps 3 heures et une au pas de temps 24 heures ont donc été utilisées pour les simulations. La plateforme 3 heures (MG03HT) est utilisée comme champ d'essai pour les prévisions hydrologiques du MELCCFP pour les tronçons non-jaugés. La plateforme 24 heures (MG24HS) est utilisée pour l'Atlas hydroclimatique 2022. Une validation de la qualité des simulations est effectuée en calculant le *Kling-Gupta efficiency* (KGE) à l'aide des

² Calibration globale sur le Québec méridional, à l'aide de 70 stations hydrométriques.

observations de la station 051305. Comme l'historique de cette dernière est très court, une validation sur les stations 051502 et 051301 est aussi effectuée. Les validations sont faites pour les deux pas de temps (3h et 24h) lorsque possible et résumées au tableau ci-dessous. Une analyse des hydrogrammes et des maximums annuels montrent que le modèle MG03HT surestime un peu les débits maximaux à la station 051502. Par contre, les quatre maximums annuels disponibles à 051305 (2020, 2021, 2022 et 2023) sont bien reproduits par le modèle (Figure 3), particulièrement la crue d'intérêt 2023 (Figure 4).

Tableau 4. KGE des simulations 3h et 24h, aux 3 stations. Entre parenthèses, la période utilisée pour la validation.

	051502	051305	051301
Pas de temps 3h (MG03HT)	0,90 (2000-2022)	0,89 (2000-2022)	-
Pas de temps 24h (MG24HS)	0,82 (1980-2022)	0,83 (2000-2022)	0,74 (1980-1996)

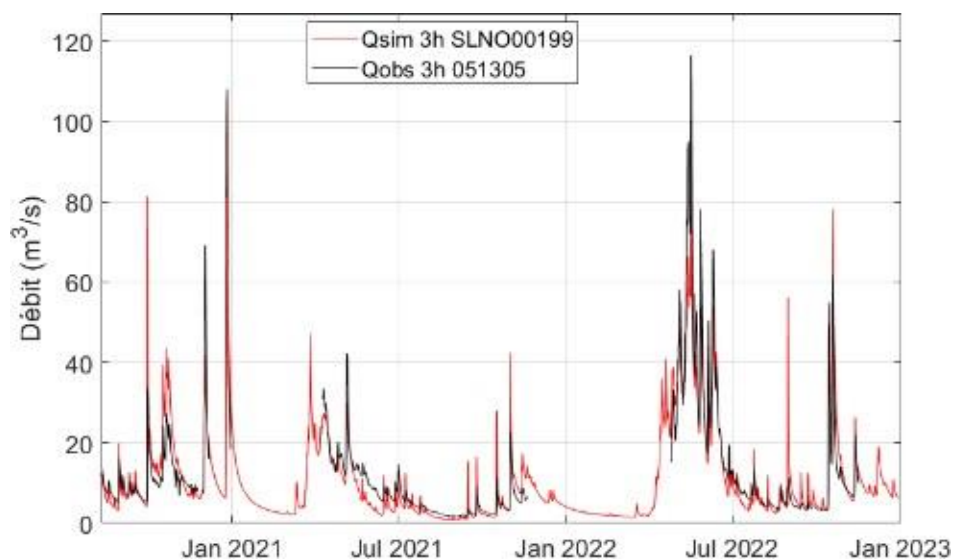


Figure 3. Débit observé (noir) et simulé (rouge) à la station 051305 (pas de temps 3h).

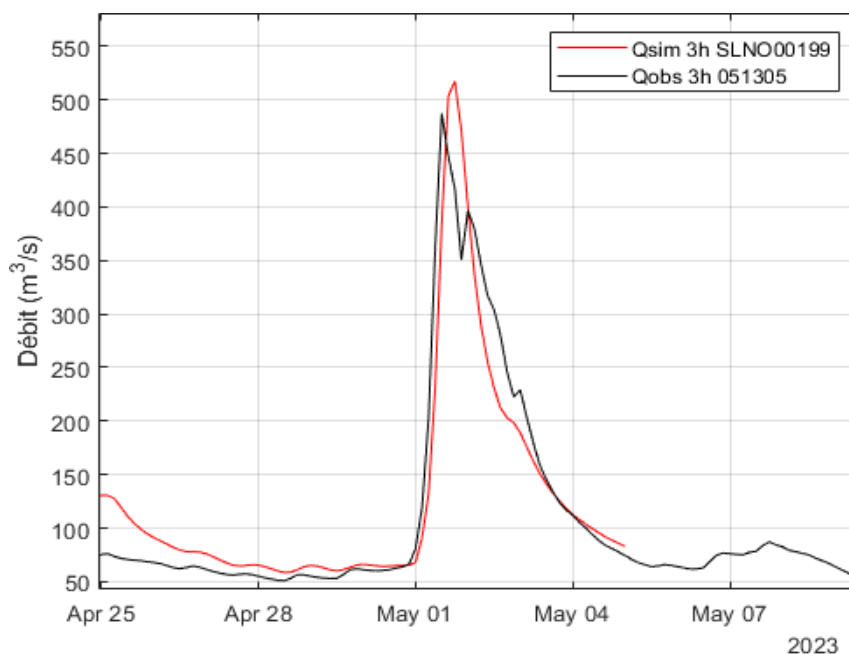


Figure 4. Crue du 1er mai 2023 à 051305, pas de temps 3h pour les débits observés (noir) et simulé (rouge).

3.2. Portrait de l'Atlas hydroclimatique

Le Portrait des indicateurs de l'Atlas hydroclimatique³ correspond aux indicateurs hydrologiques (débit journalier maximal annuel de récurrence de 20 ans, 100 ans, etc.) calculés pour la période historique, c'est-à-dire sans l'impact des changements climatiques projetés, sur environ 10 000 tronçons de rivière du Québec méridional. Ces indicateurs sont obtenus par interpolation optimale. Il s'agit d'une méthode de krigeage (ou d'interpolation spatiale) permettant de combiner les indicateurs calculés aux stations hydrométriques avec les indicateurs calculés à partir des débits simulés sur les milliers de tronçons jaugés et non-jaugés de l'Atlas. Cette approche permet généralement d'avoir de meilleures estimations des indicateurs pour les tronçons de rivière sans station que les autres méthodes de régionalisation utilisées dans la pratique.

3.3. Analyse fréquentielle

Les analyses sont réalisées sur les séries des maximums annuels ([Annexe A](#)), extraits des séries aux pas de temps 3 heures et 24 heures. Pour les données observées, les années ayant plus de 10% de données manquantes sont exclues, à l'exception de l'année 2023. En effet, en raison de leur impact sur la modélisation statistique, les valeurs maximales de la crue 2023 sont utilisées. L'homogénéité et la stationnarité des séries sont vérifiées par les tests de Wilcoxon et de Mann- Kendall, respectivement.

³ <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/carte-indicateurs/index.htm>

Pour l'analyse fréquentielle, une approche bayésienne avec la distribution des valeurs extrêmes généralisées (*generalized extreme values*, ou GEV) a été retenue comme principale méthode. L'incertitude statistique est échantillonnée avec une méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC): l'algorithme Metropolis-Hasting (N = 20 000).

À titre comparatif, les résultats d'une approche « classique » sont aussi présentés ([Annexe B](#)). Les lois de Gumbel, d'Extremum généralisé (GEV), log-normale, log-normale à trois paramètres (LN3), Pearson à trois paramètres (PR3) et log-Pearson à trois paramètres (LP3) ont été ajustées. Dans chaque cas, une calibration des paramètres de la loi par la méthode du maximum de vraisemblance a été réalisée. Différents tests d'adéquations (chi-carré, Kolmogorov-Smirnov et Anderson-Darling) ont été effectués. Les six distributions sont comparées en utilisant le critère d'information d'Akaike (AIC; *Akaike information criterion*) et le critère d'information bayésien (BIC; *Bayesian information criterion*).

Une analyse excluant les données de 2023 est fournie en annexe ([Annexe C](#)), afin de permettre la comparaison avec les résultats du transfert de bassin versant et du Portrait de l'Atlas hydroclimatique, puisque ces deux approches n'intègrent pas la crue 2023.

4. Résultats et discussion

4.1. Estimation par transfert de bassin versant (051301)

Tel que discuté à la section 2, la série des débits maximaux 1968-1996 de la station 051301 n'est pas stationnaire. L'analyse est donc réalisée sur les maximums de la période 1981-1996, auxquels est appliqué un ratio de superficie (632,34 km²/865 km²) pour le transfert à la station d'intérêt 051305.

L'approche bayésienne donne une estimation de la récurrence entre 200 et 1000 ans (Tableau 5 et Figure 5), avec la médiane un peu au-dessus de 500 ans. À titre comparatif, l'analyse classique estime la récurrence entre 200 et 350 ans ([Annexe B1](#)).

Tableau 5. Estimation des quantiles (en m³/s) par l'approche bayésienne, avec incertitude. Débits observés 24h à la station 051301 (avec ratio superficie), 1981-1996.

Centiles	20ans	100ans	200ans	350ans	500ans	1000ans
10	149	185	201	214	221	235
25	160	203	223	239	250	272
50	174	230	257	282	297	333
75	190	263	300	335	361	416
90	210	307	363	414	450	526

La qualité des données à la station 051301 limite cependant la confiance dans ces résultats. Il est possible que le rejet des données 1970-1980 prive l'analyse d'importantes crues, entraînant une surestimation de la récurrence de la crue du 1^{er} mai 2023. En effet, si la période 1970-1996 était considérée pour l'analyse, la récurrence estimée pour 310 m³/s serait alors inférieure à 100 ans

pour les deux approches. De plus, comme il n'y a aucune période commune entre 051301 et 051305, il est difficile d'évaluer si un transfert de bassin est approprié. Enfin, cette méthode ne permet l'estimation de la récurrence que pour le débit journalier, et non la pointe sous-journalière.

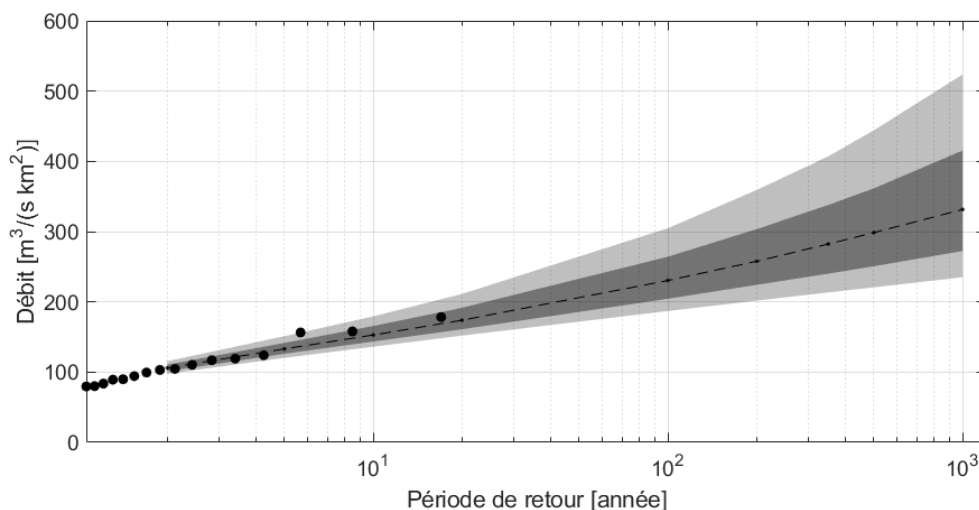


Figure 5. Analyse fréquentielle bayésienne à 051301 (distribution empirique de Weibull).

4.2. Estimation du Portrait de l'Atlas hydroclimatique

Le tableau suivant présente l'estimation du débit journalier pour les récurrences 20 ans, 100 ans et 350 ans, respectivement. Il s'agit des valeurs médianes (50^e centiles) de la période référence de l'outil « Indicateurs » de l'Atlas hydroclimatique, pour le tronçon le plus près de la station (SLNO00199). En comparant la valeur de débit maximum journalier à 051305 (310 m³/s) avec les valeurs de la dernière colonne, cela permet d'estimer la récurrence de la crue du 1^{er} mai à moins de 100 ans. Il est cependant possible que ces valeurs sous-estiment l'ampleur de la crue due à la prise en compte des valeurs trop fortes de 1967-1981 à la station 051301 (qui est utilisé pour l'interpolation optimale des indicateurs de l'Atlas).

Tableau 6. Estimation du Portrait au tronçon SLNO00199, correspondant à 051305.

	SLNO00199	Estimation à la station 051305 (avec ratio superficie*)
Q1MAX20AN (m³/s)	259	243
Q1MAX100AN (m³/s)	367	344
Q1MAX350AN (m³/s)	467	438

* $632,34 \text{ km}^2 / 673,74 \text{ km}^2 = 0,939$

4.3. Estimation par modélisation hydrologique

Débits simulés 3 heures

L'analyse sur les débits simulés au pas de temps 3 heures pour la période 2000-2023 par l'approche bayésienne donne une récurrence d'environ 60 ans pour la crue de mai 2023 (Tableau 7 et Figure 6). Ces valeurs sont pour le tronçon SLNO00199, et non directement à la station 051305 : elles doivent donc être comparées avec le débit 3 h simulé le 1^{er} mai, soit 551 m³/s. À titre comparatif, l'analyse fréquentielle classique arrive à une estimation semblable à celle de l'approche bayésienne : une récurrence d'environ 75 ans ([Annexe B3](#)).

Tableau 7. Estimation des quantiles (en m³/s) par l'approche bayésienne, avec incertitude. Débits simulés 3h au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2023.

Centiles	20ans	100ans	200ans	350ans	500ans	1000ans
10	343	486	546	597	628	694
25	373	547	629	697	746	837
50	421	635	750	847	917	1061
75	477	766	920	1065	1169	1391
90	533	891	1100	1301	1444	1769

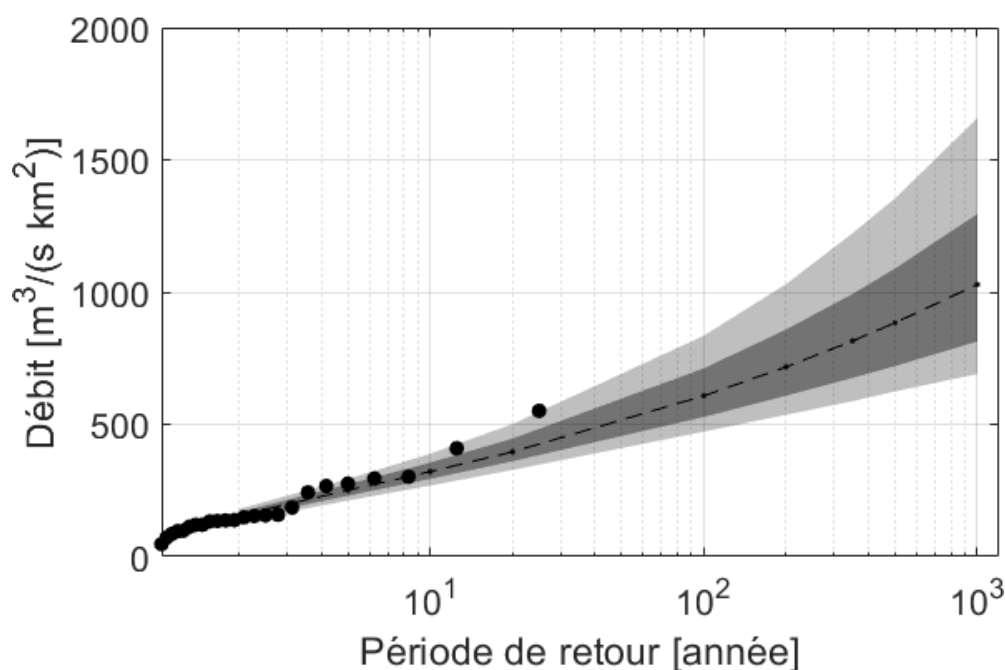


Figure 6. Analyse fréquentielle bayésienne (distribution empirique de Weibull). Débits simulés 3h au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2023.

Débits simulés 24 heures

Les résultats de l'approche bayésienne effectuée sur les débits journaliers maximaux annuels (simulation période 1970-2023) sont présentés au tableau ci-dessous. L'estimation de la récurrence du débit journalier simulé au tronçon SLNO00199 le 1^{er} mai 2023 (319,7 m³/s) est de 150 ans. Le même résultat est obtenu par l'analyse fréquentielle classique ([Annexe B3](#)).

Tableau 8. Estimation des quantiles (en m³/s) par l'approche bayésienne, avec incertitude. Débits simulés 24h au tronçon SLNO00199 (051305), 1970-2023.

Centiles	20ans	100ans	200ans	350ans	500ans	1000ans
10	180	243	272	296	312	342
25	189	263	299	330	350	392
50	201	289	335	375	403	460
75	215	323	382	436	474	559
90	230	363	440	512	563	678

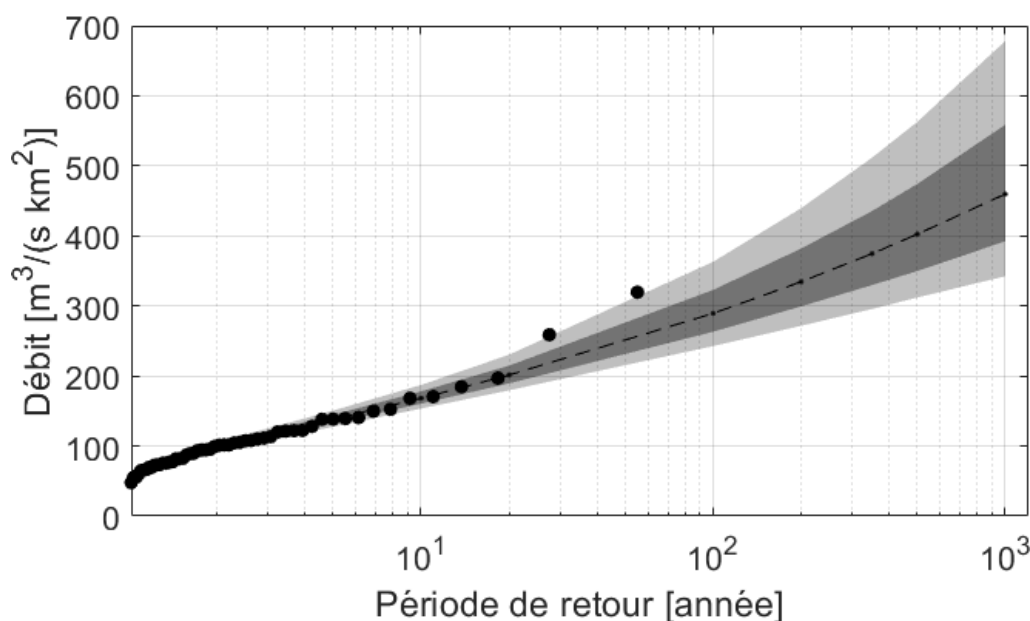


Figure 7. Analyse fréquentielle bayésienne (distribution empirique de Weibull). Débits simulés 24h au tronçon SLNO00199 (051305), 1970-2023.

4.4. Synthèse des résultats

Le Tableau 9 présente la synthèse des estimations, selon les différentes approches pour les pas de temps 3 heures et 24 heures. Les valeurs officielles retenues sont en rouge, soit une récurrence d'environ 60 ans pour le débit maximum 3 heures et d'environ 150 ans pour le débit maximum 24 heures de la crue de mai 2023 à la station 051305.

Tableau 9. Synthèse des estimations des récurrences.

	Section	Approche	Pas de temps 3h	Pas de temps 24h
Transfert de bassin versant (051301), période 1980-2022	B1	Classique	-	Entre 200 et 350 ans.
	4.1	Bayésienne	-	~500 ans
Portrait de l'Atlas hydroclimatique	4.2	Bayésienne	-	Inférieure à 100 ans
Modélisation hydrologique (Analyse excluant 2023)	C2 et C4	Classique	~200 ans	~415 ans
	C1 et C3	Bayésienne	Entre 100 et 200 ans.	~350 ans
Modélisation hydrologique (Analyse incluant 2023)	B2	Classique	~75 ans	~150 ans
	4.3	Bayésienne	~60 ans	~150 ans

4.5. Discussion

Les principaux enjeux de cette analyse de la crue du 1er mai 2023 à la rivière du Gouffre étaient l'absence d'un long historique fiable et le caractère sous-journalier de la crue. Différentes approches ont été utilisées pour pallier ces difficultés (transfert de bassin, données de l'Atlas hydroclimatique, modélisation hydrologique). La modélisation hydrologique sous-journalière (3 heures) a permis de répondre à ces deux enjeux en fournissant les séries temporelles de débits maximaux nécessaires à l'estimation de la récurrence. Les résultats en validation du modèle (KGE élevé) et sa capacité à reproduire à 3% près le débit sous-journalier du 1er mai permettent d'avoir confiance dans cette approche. Bien que la modélisation permette de disposer d'un historique de 24 maximums (débits 3 heures) et de 54 maximums (débits journaliers), il s'agit d'un minimum de données pour développer des modèles statistiques permettant le calcul de récurrence d'événements « rares ». D'ailleurs, les résultats parfois très variables donnent une appréciation de l'incertitude de la modélisation statistique. Néanmoins, les différentes approches convergent suffisamment pour avoir confiance dans les résultats finaux.

Le fait contre-intuitif que les récurrences 3h soit inférieures aux récurrences 24h s'expliquent par deux causes : l'utilisation de modèles hydrologiques différents et l'utilisation d'un historique réduit pour le pas de temps 3h. Premièrement, le modèle hydrologique calibré au pas de temps 3h (MG03HT) est beaucoup plus réactif que celui au pas de temps journalier (MG24HS). Comme le montre la Figure 8, les débits maximums annuels simulés par MG03HT (débits 3h moyennés au pas de temps journalier) sont presque systématiquement plus grand que ceux de MG24HS. Il y a trop peu d'observations pour conclure si c'est MG24HS qui sous-estime ou MG03HT qui surestime les débits. La Figure 9 présente la même comparaison, mais à la station 051502 : il semble que MG03HT présente un biais positif et MG24HS un biais négatif. Deuxièmement, dû à la disponibilité des données météorologiques sous-journalières, les simulations hydrologiques 3h sont limitées à

la période 2000-2023. Pour les simulations 24h, toute la période disponible (1970-2023) a été utilisée pour l'analyse fréquentielle.

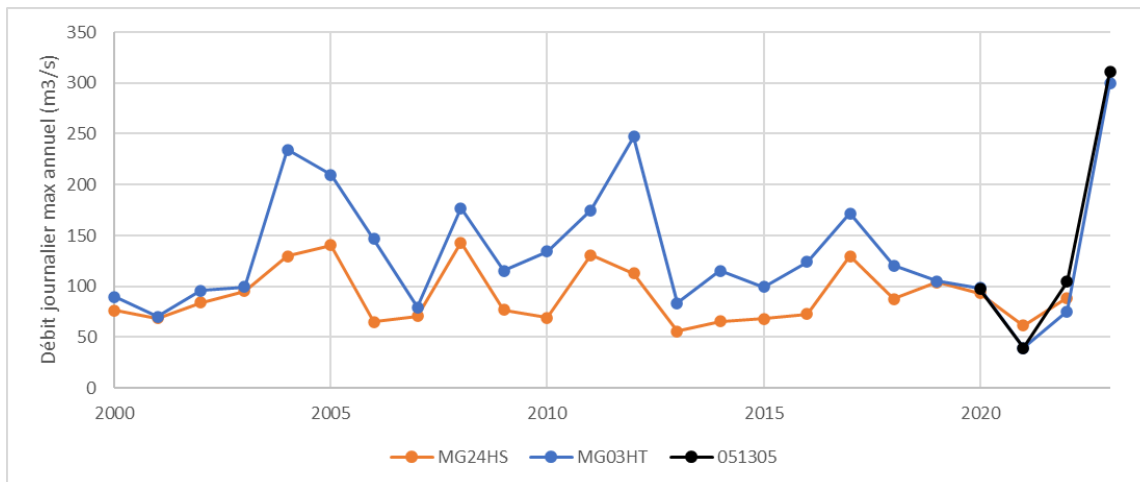


Figure 8. Comparaison des débits journaliers maximaux annuels (Modèle 24h, Modèle 3h moyenné aux 24h, Observations 051305).

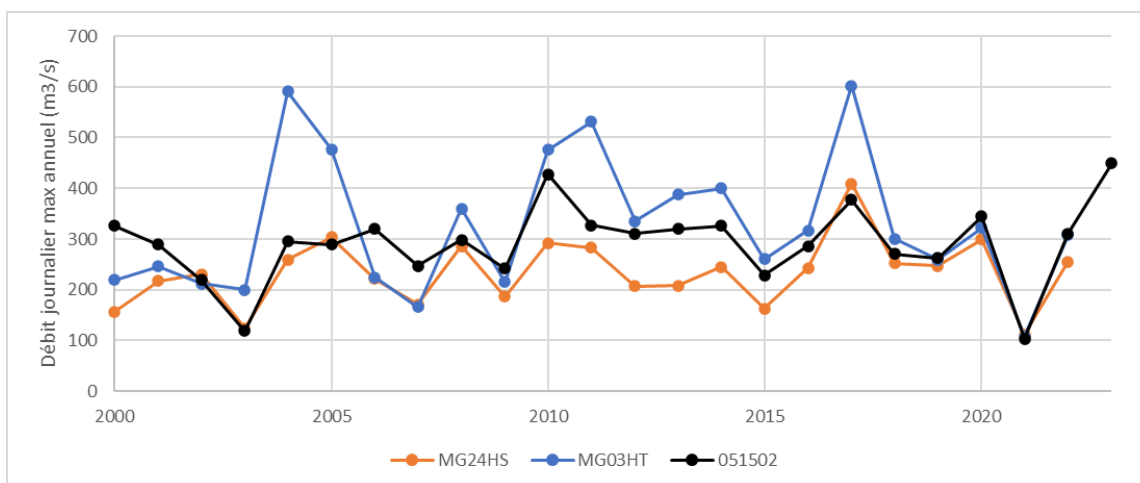


Figure 9. Comparaison des débits journaliers maximaux annuels (Modèle 24h, Modèle 3h moyenné aux 24h, Observations 051502).

Finalement, l'approche bayésienne sur les simulations hydrologiques est jugée la plus robuste pour l'estimation des récurrences de la crue du 1^{er} mai 2023 à la rivière du Gouffre, soit une récurrence d'environ 60 ans pour les 3 heures et d'environ 150 ans pour les 24 heures.

La portée de cette analyse est limitée à l'aléa débit maximal. Les niveaux d'eau, les marées, l'hydrogéomorphologie, etc., dépassent le cadre de cette étude, bien qu'ils s'agissent d'éléments importants pour la compréhension des inondations du 1^{er} mai 2023 dans le bassin de la rivière du Gouffre.

5. Conclusion

La présente note technique donne l'estimation de la récurrence de la crue du 1er mai 2023 à la rivière du Gouffre, à la station 051305. Il y avait deux difficultés majeures à cette estimation : l'absence d'un long historique et le caractère rapide de la crue (quelques heures). Différentes approches ont été mises en place pour contourner ces difficultés. Les différents résultats permettent d'obtenir l'estimation de la récurrence de la crue 2023 au pas de temps 3 heures et 24 heures, soit 60 ans et 150 ans, respectivement.

Charles Malenfant
Charles Malenfant, ing., M. Sc.

No OIQ : 5063383

Annexe A – Séries débits maximums

Toutes les valeurs sont en m³/s.

Débits journaliers observés, maximums annuels

Années	051301	051305	051502
1967	13		30,3
1968	544		320
1969	170		194
1970	385		263
1971	154		300
1972	157		266
1973	513		317
1974	250		399
1975	140		394
1976	578		578
1977	120		187
1978	117		256
1979	302		610
1980	69,3		128
1981	141		221
1982	129		296
1983	214		408
1984	143		243
1985	123		334
1986	136		368
1987	216		313
1988	163		190
1989	244		316
1990	122		228
1991	151		263
1992	108,9		314,5
1993	114,4		224,6
1994	109,4		254,8
1995	169,6		216,4
1996	160		630,7
1997			222
1998			267,4
1999			292,2
2000			326,2

Débits journaliers simulés (MG24HS), maximums annuels

Années	SLNO00094	SLNO00196	SLNO00199
1970	284,0	169,7	121,3
1971	275,7	182,3	128,1
1972	274,4	146,8	107,9
1973	369,6	375,9	258,9
1974	276,8	216,5	140,7
1975	281,8	142,4	87,0
1976	292,8	239,9	168,2
1977	164,9	150,0	105,2
1978	241,3	141,0	104,4
1979	382,7	282,6	197,0
1980	127,3	169,6	107,4
1981	248,1	124,7	77,0
1982	330,6	157,6	109,9
1983	347,6	272,1	170,5
1984	204,7	146,1	89,0
1985	201,3	177,7	101,7
1986	242,2	90,6	65,0
1987	230,9	298,2	184,7
1988	148,3	156,1	95,5
1989	253,1	169,1	101,1
1990	181,0	85,9	55,6
1991	282,7	115,0	82,5
1992	244,9	119,1	75,5
1993	186,0	186,4	122,0
1994	226,7	120,4	66,4
1995	215,6	81,0	55,0
1996	308,4	182,1	113,5
1997	223,7	170,2	122,3
1998	183,8	158,2	94,3
1999	196,2	69,9	47,8
2000	157,0	122,4	81,4
2001	218,4	108,5	73,2
2002	231,5	133,3	89,7
2003	124,2	181,8	101,6

2001			289,1	2004	260,5	221,9	138,1
2002			219,7	2005	304,3	213,7	149,8
2003			119,3	2006	221,9	105,9	69,3
2004			295	2007	171,9	115,4	75,5
2005			288,8	2008	286,9	240,4	152,5
2006			319,7	2009	187,2	114,7	81,9
2007			246,8	2010	292,9	111,9	73,6
2008			298,7	2011	284,0	216,3	139,3
2009			241,8	2012	208,2	183,9	120,2
2010			427,2	2013	208,7	106,8	59,6
2011			327,1	2014	245,8	110,6	69,7
2012			310,8	2015	163,2	113,4	72,6
2013			319,7	2016	243,3	115,3	77,6
2014			325,8	2017	410,6	204,2	138,5
2015			228,4	2018	252,6	137,2	93,4
2016			285,7	2019	248,1	183,2	111,1
2017			377,8	2020	300,4	170,6	99,3
2018			270,5	2021	111,9	100,1	65,7
2019			262,5	2022	256,0	153,3	94,4
2020		97,3	344,6	2023			319,7
2021		39,35	103,8				
2022		104,8	310,8				
2023		311,3	448,8				

**Débits 3 heures observés,
maximums annuels**

	051305	051502
1997		265,7
1998		276,5
1999		299,2
2000		335,9
2001		305,3
2002		230,1
2003		124,8
2004		318,6
2005		308,1
2006		360,0
2007		251,0
2008		348,8

**Débits 3 heures simulés (MG03HT), maximums
annuels**

	SLNO00094	SLNO00196	SLNO00199
2000	239,6	175,7	120,5
2001	263,7	99,9	71,7
2002	249,3	161,9	112,6
2003	235,4	225,1	132,9
2004	772,0	450,1	301,7
2005	694,9	668,7	409,4
2006	243,2	279,4	185,6
2007	191,1	147,7	98,0
2008	524,1	361,7	242,7
2009	234,1	199,8	137,0
2010	666,8	209,1	148,7
2011	798,3	420,5	275,8

2009		261,6	2012	413,8	425,5	295,2
2010		452,4	2013	518,4	166,3	95,8
2011		338,4	2014	527,8	230,1	155,7
2012		337,2	2015	298,9	184,2	120,1
2013		368,5	2016	397,9	241,5	158,1
2014		407,2	2017	802,2	355,4	266,7
2015		239,1	2018	349,7	190,9	134,8
2016		297,1	2019	283,1	217,4	137,9
2017		392,6	2020	381,0	216,0	153,6
2018		281,4	2021	117,5	67,8	47,3
2019		270,6	2022	355,7	117,7	85,6
2020	108,1	359,3	2023			551,4
2021	42,2	113,0				
2022	116,5	329,7				
2023	487,6	516,4				

Annexe B – Analyse fréquentielle classique (résultats)

B1. Estimation par transfert de bassin versant (051301)

Les résultats de l'analyse fréquentielle classique sur les débits obtenus par transfert de bassin depuis la station 051301 sont présentés au tableau ci-dessous. Sans surprise pour un petit échantillon de 16 valeurs, il y a d'importantes différences entre les lois. En sélectionnant selon l'AIC et le BIC (Tableau 11), la loi Pearson à 3 paramètres est utilisée pour estimer la récurrence associée à 310 m³/s, ce qui donne une récurrence entre 200 et 350 ans.

Tableau 10. Estimation des quantiles (en m³/s) pour les 6 lois. Débits observés 24h à la station 051301 (avec ratio superficie), 1981-1996.

Récurrences (années)	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
2	106	102	108	102	97	99
5	129	129	133	131	132	131
10	145	152	149	158	162	161
20	159	180	163	189	193	199
100	192	272	193	280	268	322
200	207	328	205	329	301	396
350	218	383	215	374	327	467
500	225	424	221	404	344	520
1000	239	516	233	470	378	639

Tableau 11. Résumé des métriques pour les 6 lois.

Métriques	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
Vraisemblance	-74,23	-73,61	-74,81	-73,17	-70,10	-72,48
AIC	152,46	153,21	153,62	152,33	146,20	150,96
BIC	154,0	155,5	155,2	154,6	148,5	153,3

B2. Estimation par modélisation hydrologique

Débits simulés 3 heures

Les résultats de l'analyse fréquentielle classique effectuée sur les débits 3 heures maximaux annuels (simulation période 2000-2023) sont présentés au Tableau 12. Ces valeurs sont pour le tronçon SLNO00199 : aucun ratio de superficie n'a été appliqué. Elles doivent donc être comparées avec le débit maximum 3h simulé le 1^{er} mai (551m³/s). En utilisant l'AIC et le BIC (Tableau 13), la loi log-normale est retenue pour estimer la récurrence associée à 551 m³/s, ce qui donne une estimation de 75 ans. À noter que toutes les lois (sauf Gumbel) estiment une récurrence égale ou inférieure à 100 ans pour la crue 3h du 1^{er} mai 2023.

Tableau 12. Estimation des quantiles (en m³/s) pour les 6 lois. Débits simulés 3h au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2023.

Réurrences (années)	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
2	164	153	158	155	158	154
5	247	245	254	254	260	250
10	302	322	326	331	331	325
20	355	410	400	413	399	407
100	474	678	588	628	551	630
200	525	830	678	734	615	743
350	566	973	754	825	666	844
500	592	1075	804	886	699	912
1000	643	1300	907	1011	761	1056

Tableau 13. Résumé des métriques pour les 6 lois. Débits simulés 3h au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2023.

Métriques	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
Vraisemblance	-142,55	-141,21	-141,35	-141,26	-141,46	-141,23
AIC	289,11	288,43	286,71	288,51	288,91	288,46
BIC	291,46	291,96	289,06	292,05	292,45	291,99

Débits simulés 24 heures

Les résultats de l'analyse fréquentielle classique effectuée sur les débits journaliers maximaux annuels (simulation période 1970-2023) sont présentés au Tableau 14. Ces valeurs sont pour le tronçon SLNO00199 : aucun ratio de superficie n'a été appliqué. Elles doivent donc être comparées avec le débit 24 h simulé le 1^{er} mai (319,7 m³/s). La série échoue le test de stationnarité de Mann-Kendall, mais à la suite d'une analyse approfondie des données, celles-ci sont jugées stationnaires et adéquates pour l'analyse fréquentielle.

En se basant sur l'AIC et le BIC (Tableau 15), la loi log-Pearson 3 est utilisée pour estimer la récurrence associée à 319,7 m³/s, ce qui donne une récurrence d'environ 150 ans. Malgré la valeur du BIC, l'ajustement graphique (voir le coefficient de corrélation) de la log-normale n'est pas aussi bon. La GEV donne un résultat comparable à LP3.

Tableau 14. Estimation des quantiles (en m³/s) pour les 6 lois. Débits simulés 24h au tronçon SLNO00199 (051305), 1970-2023.

Réurrences	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
2	101	97	101	98	99	97
5	136	136	140	138	141	137
10	160	166	165	169	170	167
20	182	200	190	201	197	200
100	233	298	246	283	258	288
200	255	350	271	322	283	332
350	272	397	291	355	303	372
500	283	430	304	377	316	399
1000	305	502	330	423	340	455

Tableau 15. Résumé des métriques pour les 6 lois. Débits simulés 24h au tronçon SLNO00199 (051305), 1970-2023.

Métriques	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
Vraisemblance	-273,86	-271,74	-273,50	-271,78	-272,42	-271,72
AIC	551,73	549,48	551,01	549,56	550,84	549,44
BIC	555,71	555,45	554,98	555,52	556,80	555,41
R (coeff.corr)	0,9593	0,9878	0,9622	0,9817	0,9685	0,9845

Annexe C – Analyse fréquentielle (excluant 2023)

Cette annexe reprend les analyses fréquentielles effectuées sur les séries obtenues par modélisation hydrologique, mais en excluant la crue 2023. Ces analyses complémentaires servent à permettre une meilleure comparaison des résultats avec la méthode par transfert de bassin versant et les données du Portrait de l'Atlas hydroclimatique, puisque dans ces deux cas, les données de la crue 2023 n'ont pas pu être intégrées.

C1. Débits simulés 3 heures (approche bayésienne)

Les résultats de l'approche bayésienne effectuée sur les débits 3 heures maximaux annuels (simulation période 2000-2022) sont présentés au tableau ci-dessous. Ces valeurs sont pour le tronçon SLNO00199 : aucun ratio de superficie n'a été appliqué. Elles doivent donc être comparées avec le débit maximum 3h simulé le 1^{er} mai (551m³/s). Ainsi, la récurrence est estimée entre 100 et 200 ans (Tableau 16 et Figure 10) pour la valeur simulée de 551 m³/s.

Tableau 16. Estimation des quantiles (en m³/s) par l'approche bayésienne, avec incertitude. Débits simulés 3h au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2022.

Centiles	20ans	100ans	200ans	350ans	500ans	1000ans
10	294	400	445	479	502	547
25	319	446	505	551	583	643
50	351	507	584	650	695	790
75	392	601	708	807	874	1019
90	436	699	847	986	1085	1313

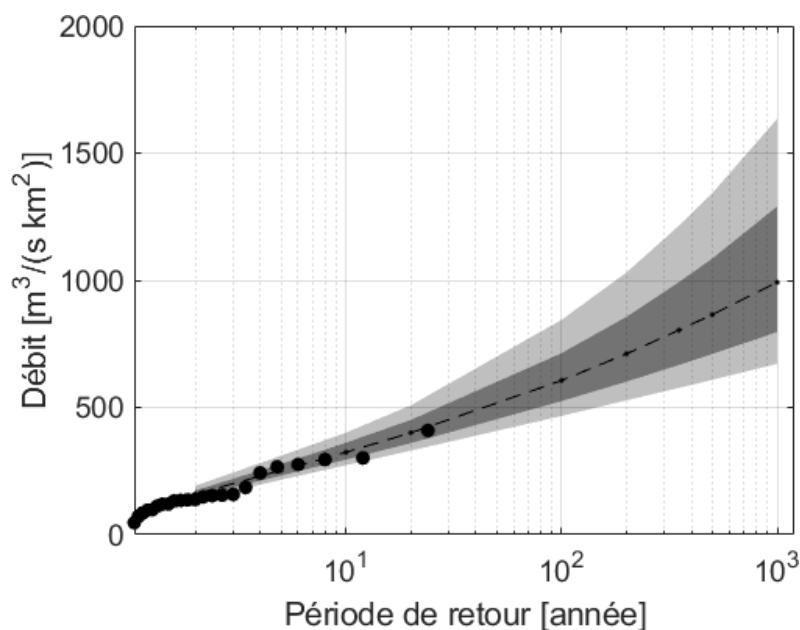


Figure 10. Analyse fréquentielle bayésienne (distribution empirique de Weibull). Débits simulés 3h au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2022.

C2. Débits simulés 3 heures (approche classique)

Les résultats de l'analyse fréquentielle classique effectuée sur les débits 3 heures maximaux annuels (simulation période 2000-2022) sont présentés au Tableau 17. Ces valeurs sont pour le tronçon SLNO00199 : aucun ratio de superficie n'a été appliqué. Elles doivent donc être comparées avec le débit maximum 3h simulé le 1^{er} mai (551 m³/s). En utilisant l'AIC et le BIC (Tableau 18), la loi log-normale est retenue pour estimer la récurrence associée à 551 m³/s, ce qui donne une estimation un peu inférieure à 200 ans. À noter que toutes les lois (sauf Gumbel) estiment une récurrence entre 100 et 500 ans pour la crue 3h du 1^{er} mai 2023.

Tableau 17. Estimation des quantiles (en m³/s) pour les 6 lois. Débits simulés 3h au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2022.

Réurrences (années)	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
2	154	149	149	149	151	150
5	224	224	230	230	232	228
10	271	281	287	287	285	283
20	316	341	346	346	336	338
100	417	499	490	489	446	473
200	460	578	556	556	492	534
350	495	647	612	611	528	585
500	518	693	649	648	551	619
1000	561	790	724	722	596	686

Tableau 18. Résumé des métriques pour les 6 lois. Débits simulés 3h au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2022.

Métriques	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
Vraisemblance	-132,17	-131,85	-131,82	-131,82	-131,80	-131,81
AIC	268,34	269,70	267,65	269,65	269,61	269,62
BIC	270,61	273,11	269,92	273,05	273,02	273,03

C3. Débits simulés 24 heures (approche bayésienne)

Les résultats de l'approche bayésienne effectuée sur les débits journaliers maximaux annuels (simulation période 1970-2022) sont présentés au tableau ci-dessous. Comme pour les débits simulés 3 heures, ces valeurs sont pour le tronçon SLNO00199 : aucun ratio de superficie n'a été appliqué. Elles doivent donc être comparées avec le débit 24 h simulé le 1^{er} mai (319,7 m³/s). La série échoue le test de stationnarité de Mann-Kendall, mais à la suite d'une analyse approfondie des données, celles-ci sont jugées stationnaires et adéquates pour l'analyse fréquentielle. La récurrence est estimée à environ 350 ans (Tableau 19 et Figure 11.). Les résultats (comme ceux de l'approche classique à la section suivante) se révèlent particulièrement sensibles à la période sélectionnée. Par exemple, l'utilisation de la simulation 3h (2000-2022), en moyennant les débits au pas de temps 24h, permet d'estimer à moins de 100 ans la récurrence de la crue du 1er mai (Tableau 20).

Tableau 19. Estimation des quantiles (en m³/s) par l'approche bayésienne, avec incertitude. Débits simulés 24h au tronçon SLNO00199 (051305), 1970-2022.

Centiles	20ans	100ans	200ans	350ans	500ans	1000ans
10	167	217	239	256	266	288
25	175	232	259	280	294	322
50	185	254	287	315	333	372
75	198	283	326	365	392	451
90	211	317	376	430	468	552

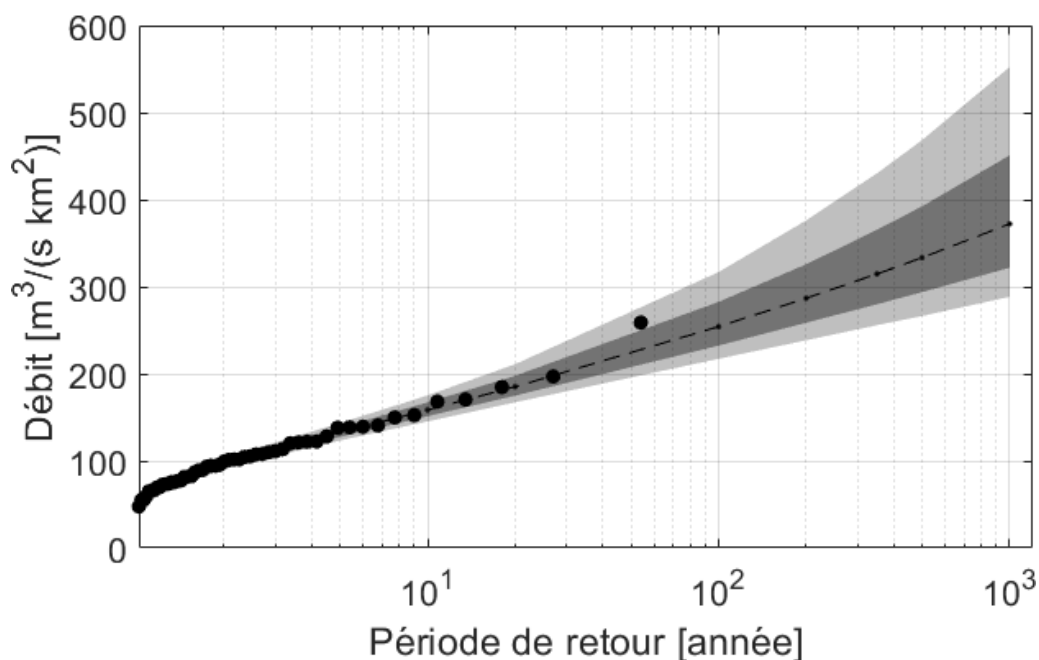


Figure 11. Analyse fréquentielle bayésienne (distribution empirique de Weibull). Débits simulés 24h au tronçon SLNO00199 (051305), 1970-2022.

Tableau 20. Estimation des quantiles (en m^3/s) par l'approche bayésienne, avec incertitude. Débits simulés 3h (moyennés au 24h) au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2022.

Centiles	20ans	100ans	200ans	350ans	500ans	1000ans
10	223	285	309	327	339	360
25	239	311	343	368	383	413
50	259	354	399	437	462	510
75	286	411	473	530	568	645
90	312	473	562	642	696	814

C4. Débits simulés 24 heures (approche classique)

Les résultats de l'analyse fréquentielle classique effectuée sur les débits journaliers maximaux annuels (simulation période 1970-2022) sont présentés au Tableau 21. Ces valeurs sont pour le tronçon SLNO00199 : aucun ratio de superficie n'a été appliqué. Elles doivent donc être comparées avec le débit 24 h simulé le 1^{er} mai (319,7 m^3/s). La série échoue le test de stationnarité de Mann-Kendall, mais à la suite d'une analyse approfondie des données, celles-ci sont jugées stationnaires et adéquates pour l'analyse fréquentielle.

En se basant sur l'AIC et le BIC (Tableau 18), la loi log-normale est utilisée pour estimer la récurrence associée à 319,7 m^3/s , ce qui donne une récurrence supérieure à 1 000 ans.

Ce résultat est cependant très sensible au choix de la distribution, de la période et du modèle. Une comparaison graphique des fonctions de distribution de probabilité théoriques avec les fonctions de distribution de probabilité empiriques montre que l'ajustement de la GEV est meilleur que celui de la loi log-normale (voir aussi le coefficient de corrélation au Tableau 22; l'AIC et le BIC désavantagent la GEV puisqu'elle a 3 paramètres). La récurrence estimée à l'aide de la GEV est d'environ 415 ans.

La sensibilité à la période et au modèle est illustrée en moyennant les simulations 3h au pas de temps 24h et en reprenant l'analyse sur cette série (2000-2022). La récurrence du débit journalier du 1er mai est alors estimée à moins de 200 ans, avec la loi Pearson à 3 paramètres (Tableau 23 et Tableau 24).

Tableau 21. Estimation des quantiles (en m³/s) pour les 6 lois. Débits simulés 24h au tronçon SLNO00199 (051305), 1970-2022.

Récurrences	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
2	99	97	99	97	97	97
5	131	131	133	132	134	131
10	152	156	155	158	158	157
20	173	182	176	183	181	182
100	219	249	224	245	230	247
200	239	282	244	274	251	277
350	255	310	261	298	267	304
500	265	329	272	313	277	321
1000	285	368	293	345	297	357

Tableau 22. Résumé des métriques pour les 6 lois. Débits simulés 24h au tronçon SLNO00199 (051305), 1970-2022.

Métriques	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
Vraisemblance	-262,73	-262,19	-262,71	-262,03	-262,01	-262,09
AIC	529,46	530,38	529,42	530,06	530,02	530,17
BIC	533,40	536,29	533,36	535,97	535,93	536,08
R (coeff.corr)	0,9866	0,9948	0,9860	0,9933	0,9887	0,9941

Tableau 23. Estimation des quantiles (en m³/s) pour les 6 lois. Débits simulés 3h (moyennés au 24h) au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2022.

Réurrences	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
2	125	125	124	126	126	126
5	175	175	177	177	177	177
10	208	208	214	211	209	209
20	239	239	250	243	238	239
100	310	311	335	316	300	304
200	341	342	373	348	325	331
350	365	367	404	373	345	352
500	381	383	425	390	357	365
1000	411	414	465	422	381	391

Tableau 24. Résumé des métriques pour les 6 lois. Débits simulés 3h (moyennés au 24h) au tronçon SLNO00199 (051305), 2000-2022.

Métriques	Gumbel	GEV	LogNormal	LN3	PR3	LP3
Vraisemblance	-107,50	-106,90	-107,80	-106,45	-105,90	-106,49
AIC	219,00	219,80	219,60	218,91	217,79	218,99
BIC	221,27	223,20	221,87	222,32	221,20	222,39

Annexe 4 : Cartes de la zone touchée

