







Université du Québec  
à Rimouski

# **Évaluation préliminaire du risque lié aux aléas HGM des petits cours d'eau dans la région du Bas-Saint-Laurent**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie  
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **Dahoua Virginie Bilé**

**Février 2025**



**Composition du jury :**

**Francis Gauthier, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

**Thomas Buffin-Bélanger, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Pascale Biron, codirectrice de recherche, Université Concordia**

**Daniel Germain, examinateur externe, Université du Québec à Montréal**

Dépôt initial le 08 octobre 2024

Dépôt final le 07 février 2025



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.



À la mémoire de ma mère,  
Gilberte et grand-mère Koua Marthe



## REMERCIEMENTS

Un soupir de soulagement au bout de ce tunnel. Le sentiment que je ressens à cet instant est la gratitude. Ces mots sont insuffisants pour témoigner de cet apport gratifiant dont j'ai pu bénéficier durant mon parcours universitaire au Québec.

Des défis à relever depuis ma première journée de classe jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Aujourd'hui, je suis fière et reconnaissante de mes accomplissements. Mon intégration au Québec et mon chemin parcouru sont le résultat des efforts fournis sous l'assistance de plusieurs personnes.

Le remerciement revient à mon Directeur Mr Thomas Buffin-Bélanger. Je vous remercie de m'avoir accueilli au sein du laboratoire. Merci pour la confiance, la disponibilité, les conseils et la formation de qualité. J'ai appris énormément à vos côtés (rigueur, discipline, organisation, pédagogie). Vous êtes le meilleur professeur et directeur que j'ai pu avoir durant mon parcours. Votre confiance à mon égard a été une graine d'énergie lorsque je me croyais incapable de réaliser certaines choses. Je suis fière d'avoir appris à vos côtés et je pars avec un bagage intellectuel et une perception positive de l'encadrement.

Je tiens également à remercier ma co-directrice, Mme Pascale Biron, pour sa promptitude, sa disponibilité et ses remarques pertinentes dans mon travail.

Mes remerciements vont à l'égard de Mr Francis Gauthier, qui a accepté de présider le jury pour l'évaluation de mes travaux de recherche.

Je remercie Mr Daniel Germain, d'avoir accepté d'être dans le jury d'évaluation de mon travail en tant qu'évaluateur externe.

Je remercie le ministère de la Sécurité publique du Québec pour le financement octroyé dans l'accomplissement de ce projet de recherche.

Merci à mon époux pour la patience et le soutien sans limite.

Merci aux professionnels de recherche Max Maltais, Marie-André et Yann qui ont toujours répondu favorablement à toutes mes sollicitations. Merci pour l'initiation à la compréhension des outils SIG.

Une mention spéciale pour les fluvios. J'ai retrouvé une famille au sein du laboratoire, et cette famille m'a apporté, soutien, force, rire, courage, volonté.

Je remercie également ma famille, mes amis, pour les encouragements et prières à mon égard.

## RÉSUMÉ

Peu d'outils permettent de faire un audit des aléas hydrogéomorphologiques (HGM) auxquels les petits cours d'eau (PCE) sont sujets, pourtant à ces PCE sont associés plusieurs aléas HGM qui compromettent l'intégrité d'enjeux qui y sont exposés. L'objectif du projet vise à appliquer des outils SIG (ExZeco et Geomorphon landform) employés avec un modèle numérique d'élévation à haute résolution, pour l'évaluation préliminaire du risque lié aux aléas HGM des PCE. Cette évaluation préliminaire ne tient pas compte de la probabilité d'occurrence de l'aléa. Elle est plutôt basée sur la position des enjeux par rapport aux aléas HGM simulés sur les cônes alluviaux et les plaines d'inondations. Pour ce faire, quatre bassins versants de la région du Bas-Saint-Laurent ont été identifiés comme sites d'étude. La méthodologie se base dans un premier temps sur l'établissement d'un portrait d'aléa HGM, puis dans un deuxième temps sur la caractérisation de ces aléas en évaluant leur intensité, leur étendue et leur distribution spatiale et finalement, l'évaluation de l'exposition des enjeux vis-à-vis des aléas. Les résultats montrent que des enjeux (parcelle agricole, route, résidences) sont exposés à l'aléa torrentiel sur deux cônes alluviaux cartographiés dans les bassins versants pilotes, et des résidences sont exposées à un débordement probable de cours d'eau. L'analyse du risque a été réalisée avec obstruction probable des ponceaux sur le LiDAR et sans obstruction des ponceaux. L'aléa est de forte intensité dans le risque probable lié aux obstructions, et les enjeux exposés sont notamment les résidences, les routes et des portions de terre agricole. Des témoignages de riverains ont permis de valider l'intensité des aléas prédits par ExZeco.

Mots clés : Aléa HGM, Évaluation préliminaire, cône alluvial, plaine d'inondation, LiDAR



## ABSTRACT

Few tools are available for auditing the hydrogeomorphic hazards (HGM) to which small watercourses (PCE) are subject, yet these PCE are associated with several HGM hazards that compromise the integrity of issues exposed to them. The aim of the project is to apply GIS tools (ExZeco and Geomorphon landform) used in conjunction with a high-resolution digital elevation model, for the preliminary assessment of the risk associated with HGM hazards in PCE. This is an assessment based solely on the position of issues in relation to the HGM hazards to which alluvial fans and floodplains are subject. To this end, four watersheds in the Lower St. Lawrence region were identified as study sites. The methodology is based firstly on the establishment of a HGM hazard profile, then on the characterization of these hazards by assessing their intensity, extent and spatial distribution, and finally on the assessment of the level of exposure of issues to these hazards. The results show that issues (agricultural plots, roads, residences) are exposed to torrential hazards on two alluvial fans mapped in the pilot watersheds, and residences are exposed to probable river overflow. The risk analysis was carried out with probable culvert obstructions on the LiDAR and without culvert obstructions. The probable risk associated with obstructions is of high intensity, and the stakes exposed include residences, roads and portions of agricultural land. Testimonials from residents validated the intensity of the hazards predicted by ExZeco.

*Keywords:* HGM Hazard, Preliminary Assessment, Alluvial Fan, Floodplain, LiDAR



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ix
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
TABLE DES MATIÈRES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES FIGURES.....	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 ETAT DE CONNAISSANCE SUR LES RÔLES ET LES DYNAMIQUES DES PETITS COURS D’EAU.....	7
1.1 NOTION DE PETITS COURS D’EAU.....	7
1.2 LA DYNAMIQUE FLUVIALE ET L’APPROCHE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE (HGM).....	9
1.3 DEFINITION ET CONCEPT DE L’EVALUATION PRELIMINAIRE DU RISQUE.....	19
1.4 CADRE DE GESTION DES COURS D’EAU ET INITIATIVE AU QUEBEC.....	25
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	34
2.1 SITES D’ETUDE.....	34
2.2 DEVELOPPEMENT DE LA TYPOLOGIE D’ALEA HGM.....	35
2.3 CARACTERISATION DES ALEAS HGM DANS LES PETITS COURS D’EAU.....	37
2.3.1 Cartographie des formes fluviales.....	37
2.3.2 Caractérisation de l’intensité des aléas.....	42
2.3.3 Caractérisation et validation terrain.....	51
2.4 EVALUATION DE L’EXPOSITION DES ENJEUX.....	52
CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....	54
3.1 TYPOLOGIE DES ALEAS HGM.....	54
3.2 CARACTERISATION DES ALEAS.....	59

3.2.1	Cartographie des cônes alluviaux .....	59
3.2.2	Délimitation et extraction du fond de vallée.....	61
3.2.3	Évaluation de l'intensité des processus : morphométrie et cartographie des aléas simulés avec ExZeco .....	66
3.2.4	Inventaire terrain.....	77
3.3	ÉVALUATION DE L'EXPOSITION DES ENJEUX.....	84
3.3.1	Carte de l'occupation du sol : localisation des enjeux.....	84
3.3.2	Cartographie préliminaire du risque lié aux aléas HGM des petits cours d'eau .....	88
CHAPITRE 4 DISCUSSION .....		93
4.1	DEVELOPPEMENT DES CONNAISSANCES DES ALEAS HGM ET DU RISQUE.....	93
4.1.1	Aléa HGM probable et intensité : cas des cônes alluviaux.....	93
4.1.2	Aléa HGM probable et intensité : cas des plaines .....	98
4.1.3	Évaluation préliminaire du risque et validation des résultats .....	100
4.2	QUELQUES LIMITES DE L'EVALUATION ET LA GESTION DU RISQUE DANS LES PETITS COURS D'EAU .....	101
4.3	PERFORMANCES ET LIMITES DES DEUX OUTILS SIG UTILISES : EXZECO ET GEOMORPHON LANDFORM .....	105
4.3.1	ExZeco .....	105
4.3.2	Geomorphon landform.....	106
4.4	IMPACT DU PROJET.....	107
CONCLUSION GÉNÉRALE .....		109
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		112

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Facteurs exacerbant la vulnérabilité des éléments exposés © MSP, action 6.....	22
Tableau 2 Paramètres utilisés pour la délimitation du fond de vallée dans les bassins versants étudiés dans l’outil Geomorphon landform.....	40
Tableau 3 Exemple d’outils d’extraction automatique de fond de vallée.....	42
Tableau 4 Présentation des données utilisées pour l’identification des enjeux exposés .....	53
Tableau 5 Morphométrie des cônes alluviaux .....	67
Tableau 6 Morphométrie calculée dans le bassin versant du ruisseau Johnson .....	71
Tableau 7 Morphométrie calculée dans le bassin versant de la rivière Rouge .....	72
Tableau 8 Morphométrie calculée dans le bassin versant de la rivière Centrale.....	73
Tableau 9 Morphométrie calculée dans le bassin versant de la rivière Hâtée .....	74
Tableau 10 Description de l’exposition des enjeux aux aléas HGM selon la forme fluviale et par bassins versants .....	92



## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Distribution de la médiane des aires drainées selon les ordres de Strahler pour cinq bassins versants de la région d'étude. © Besnard, 2023 .....	8
Figure 2. Représentation de l'équilibre d'un cours d'eau. © Adapté de Lane, 1955 .....	10
Figure 3. Schéma conceptuel intégrant les limites de la plaine alluviale et de la plaine inondable. © Adapté de Freinet, 2013 .....	14
Figure 4. A: Cône alluvial formé à l'interface d'une région montagneuse et d'une plaine alluviale, Nouvelle-Zélande. B: La migration latérale du chenal principal, causée par l'aggradation et l'avulsion du cours d'eau, contribue à la formation en éventail. © Buffin-Bélanger et Héту, 2008.....	17
Figure 5. Identification d'un modelé d'incision ou cours d'eau confiné avec Hs : versant et Ch. : chenal. © Fryirs et al., 2016.....	18
Figure 6. Identification des formes fluviales .....	19
Figure 7. Définition du risque. © GIEC, 2014 .....	20
Figure 8. Illustration de l'évaluation préliminaire du risque par exposition d'un enjeu présent sur un cône alluvial. © Adapté de Garitte, 2006. ....	21
Figure 9. Waterbuurt (quartier de l'eau), Ijburg, Amsterdam, 2011 .....	25
Figure 10. Archive concernant l'inaction de la MRC Charlevoix-Est sur la rupture de barrage à l'été 2005.....	29
Figure 11. Archive concernant l'inaction de la MRC Charlevoix-Est pour le second dommage à l'été 2011. ....	30
Figure 12. A : Fondation d'entreprise de pêche détruite. B : Dépôt important de sédiments dans le ruisseau Côté près de la route 132 à Rimouski. Perte de terrain par le recul de la berge. © Buffin-Bélanger et Héту, 2008.....	32
Figure 13. Classification des principaux types de préoccupations énumérées par les six MRC du projet constrictor. © Besnard, 2023.....	33
Figure 14. Localisation et présentation des bassins versants à l'étude : (1) Localisation des bassins versants ; (2) Présentation des bassins versants. A : Bassin versant de la rivière Centrale, B : Bassin versant de la rivière Hâtée, C : Bassin versant de la rivière Rouge, D : Bassin versant du ruisseau Johnson.....	35

Figure 15. Identification d'un cône alluvial par ajustement symbolique et mis en exergue des courbes de niveau. ....	38
Figure 16. Délimitation du fond de vallée en bleu après application de l'outil Geomorphon landform dans le bassin versant du ruisseau Johnson.....	41
Figure 17. Étendue de recherche des paramètres <i>search distance</i> et <i>skip distance</i> . ....	41
Figure 18. Chaîne d'exécution du protocole ExZeco. © Inspiré de Pons, 2010. ....	44
Figure 19. Seuil de classification de puissance spécifique. © Brookes,1988 in Wasson et al., 1995.....	50
Figure 20. Principe de croisement de l'EPRI. © Benacchio et al., 2022 .....	52
Figure 21. Proposition d'une typologie d'aléa HGM dans les petits cours d'eau du Bas-Saint-Laurent .....	54
Figure 22. Exemple de débordement dans la rivière des Bois Brûlé survenu en 2008.....	55
Figure 23. E: Localisation d'un torrent à Rimouski. A, B, C et D présentent des images de l'activité torrentielle survenue. A : Source de l'écoulement, B : Présence d'embâcle dans le chenal, C : Délimitation du chenal et érosion des berges, D : Dépôt de sédiments .....	55
Figure 24. Identification du processus d'incision dans le cours d'eau Branche Xavier-Boucher à Rimouski. A : Localisation du site visité, B et C : Section du cours d'eau incisée.....	56
Figure 25. Identification du processus de migration latérale dans la Rivière Rouge située à Saint-Angèle de Merci. A : Localisation du site visité, B et C : Section du cours d'eau sujet au processus de migration latérale.....	57
Figure 26. Identification du processus de mobilité à partir du LiDAR sur un cône alluvial où deux points GPS 1 et 2 ont été validés sur le terrain dans la rivière Chaude située dans la MRC Kamouraska. A: Présentation du cône alluvial avec présence de chenaux multiples, B: Zoom sur le site visité et observation d'une avulsion au point GPS2, C: Processus d'érosion et d'accumulation observés au point GPS 1, D: Processus d'avulsion validé par l'observation d'un chenal abandonné au point GPS 2.....	58
Figure 27. Processus d'érosion par mouvement de masse et décrochement dans le ruisseau Levasseur à Rimouski. A : Localisation du site visité, B et C : Section du cours d'eau sujet au processus d'érosion.....	59

Figure 28. Distribution spatiale des cônes alluviaux dans la région du Bas-Saint-Laurent. Avec B et D représentant les deux bassins versants étudiés où sont localisés les cônes alluviaux.....	60
Figure 29. Cartographie des cônes alluviaux par ajustement symbologique du LiDAR. B: Cône alluvial dans le bassin versant de la rivière Hâtée, D: Cône alluvial du Ruisseau Johnson .....	61
Figure 30. Cartographie du fond de vallée dans le bassin versant de la rivière Centrale. A: Gros plan sur un secteur de fond de vallée extrait, B: Localisation de la zone agrandie dans le bassin versant .....	62
Figure 31. Cartographie des tronçons homogènes du fond de vallée du cours d'eau principal du bassin versant de la rivière Hâtée (Branche Hâtée). .....	63
Figure 32. Cartographie du fond de vallée dans le bassin versant de la rivière Rouge. ....	64
Figure 33. Cartographie du fond de vallée dans le bassin versant du ruisseau Johnson. ....	65
Figure 34. Diagramme de distribution du coefficient de Melton en fonction de la longueur du bassin versant des 197 cônes alluviaux cartographiés dans la région du Bas-Saint-Laurent. Les points en rouge représentent les cinq cônes étudiés dans ce projet. ....	66
Figure 35. Cartographie des avulsions potentielles et surface probable d'expansion du flux sur les quatre cônes alluviaux du bassin versant de la rivière Hâtée pour une variation topographique du protocole ExZeco de 1 m (bleu) et 2 m (rouge). ....	69
Figure 36. Cartographie des avulsions probables sur le cône du bassin versant du ruisseau Johnson pour une variation topographique du protocole ExZeco de 1 m (bleu) et 2 m (rouge). ....	70
Figure 37. Cartographie d'une surface d'expansion de flux pour une variation topographique de 1 m dans le bassin versant de la rivière Centrale. ....	75
Figure 38. Cartographie des zones de mobilité probable pour une variation topographique de 1 m dans le bassin versant du ruisseau Johnson.....	76
Figure 39. Cartographie des zones de mobilité probable pour une variation topographique de 1 m dans le bassin versant de la rivière Rouge.....	77
Figure 40. Photographie des facteurs aggravants naturels observés sur site. A : Remontée du niveau des eaux par la présence de deux barrages de castors, ponceau immergé à l'endroit de la flèche rouge; B : Obstruction par la présence de bois mort dans le chenal. ....	78

Figure 41. Photographie des facteurs aggravants anthropiques observés sur site. A : Artificialisation du cours d'eau, B : Construction de cabanon sur les berges d'un cours d'eau, C, D et E : Obstruction sédimentaire du ponceau par l'activité humaine .....	79
Figure 42. Photographie du ponceau où débute l'avulsion sur le cône 2. A : La flèche indique la présence du ponceau sous une traverse. B : Affaissement de la traverse et totale immersion du ponceau en aval, ponceau non visible. ....	80
Figure 43. Photographie des indices d'une dynamique fluviale en amont du cours d'eau sur le cône 2 dans le bassin versant de la rivière Hâtée. A : Processus d'incision qui a eu lieu en amont du ponceau, B : Processus d'érosion des berges. ....	80
Figure 44. Photographie des indices d'accumulation en aval du cours d'eau, zone d'immersion du ponceau.....	81
Figure 45. A : Photographie du ponceau localisé sur le cône 3, dont le retrait n'a pas été réalisé sur le LiDAR, B : cours d'eau du cône 3.....	81
Figure 46. Photographie des troncs d'arbres sur le cône Johnson. ....	82
Figure 47. Processus de validation d'ExZeco sur un cône en processus de restauration passive pour une variation topographique de 1 m (bleu) et 2 m (rouge).....	83
Figure 48. Photographie des brèches potentielles en formation prédites par ExZeco pour une variation topographique de 2 m. ....	83
Figure 49. Carte de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Centrale. ....	84
Figure 50. Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Hâtée. ....	85
Figure 51. Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Rouge. ....	86
Figure 52. Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin versant du ruisseau Johnson. ....	87
Figure 53. Cartographie des enjeux exposés à l'aléa avulsion sur les cônes alluviaux dans le bassin versant de la rivière Hâtée. ....	88
Figure 54. Cartographie des enjeux exposés à l'aléa avulsion sur le cône alluvial du ruisseau Johnson. ....	89
Figure 55. Cartographie des enjeux exposés à l'aléa inondation par un tributaire de la rivière Centrale. ....	90

Figure 56. Cartographie probable des enjeux exposés aux aléas HGM (migration latérale, surface d'inondation) dans le bassin versant de la rivière Rouge. ....	91
Figure 57. Image aérienne datant de 2015 d'un tronçon du ruisseau Johnson en amont du cône. Présence d'embâcles de bois et une accumulation de sédiments. ....	95
Figure 58. Localisation de la résidence indexée par la riveraine.....	96
Figure 59. A et B : Localisation du ponceau identifié par le riverain, C : Identification du réseau souterrain.....	99
Figure 60. Récapitulatif de la caractérisation des aléas HGM réalisés.....	103
Figure 61. Diagramme conceptuel de l'évaluation préliminaire du risque lié aux aléas HGM des petits cours d'eau. ....	105



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

<b>AESN</b>	Agence de l'eau Seine-Normandie
<b>AGRCQ</b>	Association des Gestionnaires Régionaux des cours d'eau du Québec
<b>AZI</b>	Atlas des Zones Inondables
<b>CM</b>	Code municipal
<b>GRHQ</b>	Géobase du Réseau Hydrographique du Québec
<b>IHT</b>	Indice d'Humidité Topographique
<b>INSPQ</b>	Institut National de Santé publique du Québec
<b>ISQ</b>	Institut de la statistique du Québec
<b>LGDF</b>	Laboratoire de Géomorphologie et de Dynamique Fluviale
<b>MAMH</b>	Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation
<b>MSP</b>	Ministère de la Sécurité publique
<b>MRC</b>	Municipalité Régionale de Comté
<b>MRNF</b>	Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts
<b>MELCCFP</b>	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
<b>MNT</b>	Modèle Numérique de Terrain
<b>MPO</b>	Pêches et Océans Canada
<b>OBV</b>	Organismes de Bassins Versants
<b>PCE</b>	Petit Cours d'Eau

**PDE** Plan Directeur de l'Eau

**PPRI** Plan de Prévention des Risques d'Inondation





## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les petits cours d'eau (PCE) ou cours d'eau en tête de bassin versant sont reconnus pour leur rôle sur l'ensemble du réseau fluvial. Ils représentent plus de 50 % du réseau et ont un impact significatif dans le transit sédimentaire (Gravel, 2021). L'état de connaissance actuelle concernant leur réponse hydrologique et leur résilience vis-à-vis des perturbations climatiques et anthropiques demeure limité (Wohl, 2017). Au Québec, les travaux de Parent (2013) et Fontaine et al. (2013) traitent respectivement de la réponse hydrogéomorphologique (HGM) des PCE dans un contexte d'aménagement et de processus torrentiels en vue de comprendre la réponse de ces cours d'eau vis-à-vis des perturbations. Ces recherches à l'échelle locale contribuent au développement de connaissances, mais le contexte climatique actuel évolutif pousse les réflexions sur des études à plus grande échelle. En France, les projets à grande échelle sont davantage développés, notamment le projet HYDRODEMO qui vise à évaluer le risque lié à l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord. Pour l'heure, au Québec, les initiatives existantes sur la gestion du risque lié aux aléas HGM à grande échelle sont orientées vers les grands cours d'eau. Cet intérêt pour ces grands cours d'eau semble naturel et logique, car la majorité de la population au Québec vit dans les basses terres et proches de grands cours d'eau (Besnard et al., 2023). De plus, à ces grands cours d'eau sont associés des événements majeurs tels que les inondations printanières vécues en 2017, 2019 et 2023 au sud du Québec. Ces événements ont marqué la société québécoise en exposant les lacunes importantes dans la gestion des inondations et leurs conséquences. Ils ont conduit à une réflexion profonde sur les outils d'évaluation et législatifs disponibles au Québec tout en suscitant plusieurs intérêts scientifiques et politiques ayant contribué à la mise en place de projets à l'échelle provinciale. Ces projets sont INFO-Crue, mené par le ministère de l'Environnement, de la Lutte aux Changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) et EPRI (Évaluation préliminaire du risque lié aux inondations), mené par le ministère de la Sécurité publique (MSP). Ces projets provinciaux portent sur les tronçons de rivières avec des aires drainées de plus de 50 km<sup>2</sup>. INFO-Crue a pour objectif de cartographier les zones inondables et de développer des connaissances sur la mobilité des cours d'eau (MELCCFP, s. d.). Quant au

projet EPRI, il vise à évaluer le niveau d'exposition des enjeux aux aléas d'inondation et à établir une carte de l'exposition en croisant l'aléa et les enjeux (Benacchio et al., 2022).

Concernant les PCE, plusieurs chercheurs mettent également en exergue des événements dommageables auxquels ils sont associés autant que les grands cours d'eau, et l'intérêt de développer des connaissances sur ces aléas (Payraastre et al., 2006 ; Buffin-Bélanger et Hétu, 2008 ; Lelièvre et al., 2008 ; Dumont et Buffin-Belanger, 2022 ). Il apparaît donc important de mener des études à large échelle sur les PCE, surtout dans un contexte où l'étalement urbain ne cesse de croître au profit des espaces naturels (Besnard, 2022). En effet, « ce qui n'a pas encore été documenté ne veut pas dire que cela n'existe pas » (Besnard, 2023, p.1) c'est-à-dire qu'il n'y a pas de logique de prétendre que le risque est moindre ou quasi inexistant dans les PCE en se basant sur la carence en documentation les concernant.

Au regard de ce contexte, le laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale (LGDF) a été mandaté par le MSP pour mener le projet de recherche Constrictor, qui se veut un complément aux projets INFO-Crue et EPRI pour déterminer une évaluation préliminaire des risques fluviaux sur l'ensemble des PCE des bassins versants du sud du Québec, avec une emphase plus particulière sur les obstructions présentes dans les PCE. Ce projet vise à développer un outil semi-automatisé pour identifier les tronçons des PCE sujets à des obstructions. L'un des objectifs de Constrictor est de cartographier le risque lié aux aléas fluviaux dans les PCE. À cet objectif est associé le présent travail constituant une phase de recherche exploratoire sur l'évaluation préliminaire du risque lié aux aléas HGM des PCE dans la région du Bas-Saint-Laurent.

## **PROBLÉMATIQUE**

Dans les 20 dernières années, l'est du Québec a connu des événements à fort impact sur les communautés riveraines causées par les PCE (Buffin-Bélanger et Hétu, 2008 ; Dumont et Buffin-Bélanger, 2022) . Pendant la crise torrentielle du Bic en 2002, 90 mm de pluie ont transformé des PCE en torrents qui ont dévasté une entreprise de pêche, emporté des ponceaux et inondé des résidences (Buffin-Bélanger et Hétu, 2008). La période d'août 2007 a également marqué la mémoire des résidents de la Rivière-au-Renard en Gaspésie. La rivière a emporté sur son passage une dizaine de résidences et des infrastructures routières.

De plus, deux pertes en vies humaines ont été enregistrées (Lelièvre et al., 2008). La région du Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie possèdent de nombreux cours d'eau de bassins versants de petite et moyenne taille, dont la plupart se trouvent en région montagneuse (Buffin-Bélanger et Dubé, 2008). Parmi ces bassins versants de montagnes, on y recense des bassins sujets à des crues dites torrentielles avec un transport élevé de sédiments (Kaitna et Huebl, 2013 ; Hugerot, 2020) .

Une étude récente de Dumont et Buffin-Bélanger (2022) sur les données d'aides financières accordées après les sinistres liés aux inondations, aux mouvements de terrain et à l'érosion des berges dans deux bassins versants dans le sud du Québec, montre que près de deux tiers des événements ayant causé des dommages se sont déroulés à proximité des PCE. L'intensité des aléas dans les PCE renvoie à l'énergie de l'écoulement ainsi qu'à la capacité à éroder des berges et à causer des dégâts. Cette intensité se définit comme étant la puissance spécifique qui est le potentiel énergétique de l'écoulement se traduisant par la capacité de transport que le cours d'eau peut effectuer (Petit et al., 2007). 73 % des bâtiments de la MRC de la Mitis ont été inondés par un affluent de la rivière Mitis. En dehors du caractère torrentiel que peuvent avoir certains PCE, ces derniers présentent une sensibilité morphologique et anthropique ; tel a été le cas de la rivière Bonhomme-Morency situé dans la municipalité Notre-Dame-Des-Neiges, au Bas-Saint-Laurent. Dans les années 1970, une partie de la rivière Renouf a été détournée dans le bassin versant de la rivière Bonhomme-Morency pour limiter les inondations causées par la rivière Renouf au centre-ville de Trois-Pistoles (Parent et al., 2015). Plusieurs années plus tard, cette action a provoqué une forte incision du lit de la Bonhomme-Morency, une augmentation de son aire de drainage, d'importants décrochements de berge et un important transport sédimentaire constituant une menace pour l'écosystème aquatique. Ces effets sont provoqués par l'augmentation du débit de la rivière Bonhomme-Morency qui a entraîné un changement morphologique important. Un aménagement drastique a été effectué et aujourd'hui, la rivière Bonhomme-Morency a été « étouffée » par des enrochements (Parent et al., 2015). Ces faits démontrent la présence du risque associé aux PCE et l'importance particulière de prévoir les événements à venir en tenant compte des aléas HGM dans les PCE. De plus, les projections climatiques annoncent

un impact sur l'occurrence et l'intensité des aléas, dont une augmentation des pluies, des crues et les processus d'érosion (INSPQ, 2021 ; Gravel, 2021). Les changements climatiques entraînent un certain nombre d'implications dans la compréhension géomorphologique des rivières, car la plupart des scénarios hydroclimatiques existants ne prennent pas en compte les changements géomorphologiques pouvant survenir dans les systèmes fluviaux (Goudies, 2006). Il convient donc de mener des études pour comprendre non seulement la fonction physique, mais aussi la capacité de résistance et résilience des PCE vis-à-vis des perturbations naturelles et anthropiques (Wohl, 2017). La connaissance et les données sur la gestion du risque lié aux aléas HGM des PCE demeurent limitées. Pourtant, les avulsions (changement de position du chenal), les crues éclaires (crues rapides chargées en débris de toutes tailles) et les inondations sont autant d'aléas HGM présents dans ces PCE et qui mettent en péril les enjeux (routes, bâtiments, terres agricoles) qui y sont exposés (Lelièvre et al., 2008). Le manque de documentation qui traite des aléas liés aux PCE de façon exhaustive et du risque doit être résolu. En effet, il est difficile de retracer dans le temps les différents événements de crue qui ont lieu dans ces PCE situés en amont du bassin versant, par manque de données les concernant (Payraastre et al., 2006). Ceci est en partie dû au grand nombre de PCE à l'échelle territoriale et au manque de données à haute résolution permettant de les caractériser sans avoir à se déplacer sur le terrain.

Aujourd'hui, cependant, il est possible de combler ces lacunes grâce aux modèle numérique d'élévation (MNE) LiDAR (Light Detection And Ranging) de haute résolution (1 mètre) et les données qui en résultent pour l'ensemble du Québec méridional. Des outils SIG sont de plus en plus développés pour traiter les données LiDAR et aider à une prise de décision, ce qui n'était pas le cas autrefois. Face aux progrès technologiques, comment combler les lacunes actuelles dans la compréhension du risque lié aux aléas HGM des PCE ? Le présent projet de recherche porte sur l'évaluation préliminaire du risque lié aux aléas HGM des PCE dans la région du Bas-Saint-Laurent et répond à plusieurs besoins scientifiques et sociétaux.

## **OBJECTIF PRINCIPAL**

L'objectif général du projet est d'évaluer le risque lié aux aléas HGM dans les PCE du Bas-Saint-Laurent. De l'objectif principal résultent trois objectifs spécifiques :

**1.** Proposer une typologie des aléas hydrogéomorphologiques (HGM).

Cet objectif a pour but d'établir un portrait des aléas HGM présent dans les PCE du Bas-Saint-Laurent. Cette étape préliminaire permet d'identifier les événements susceptibles de se produire et anticiper les actions à mener.

**2.** Caractériser les aléas en déterminant leur étendue, leur distribution spatiale et l'intensité des processus auxquelles ils sont associés. Cet objectif vise à appliquer des outils SIG ainsi que des paramètres morphométriques en vue d'une meilleure connaissance de l'intensité et de l'étendue des processus HGM. Cette étape passe avant tout par la cartographie des formes fluviales auxquels sont associés les processus HGM.

**3.** Évaluer l'exposition des enjeux aux aléas hydrogéomorphologiques (HGM) dans le Bas-Saint-Laurent. Cet objectif spécifique a pour but d'identifier les enjeux qui pourraient être exposés aux aléas et la connaissance du risque prévalant sur certains sites pour une meilleure gestion et aménagement du territoire.

Ce travail se subdivise en quatre chapitres. Le chapitre 1 traite de l'état des connaissances sur les PCE et la conception de l'évaluation préliminaire du risque. Il a pour but de mieux comprendre l'intérêt de ce projet d'étude. Le chapitre 2 présente les sites d'études et la méthodologie adoptée. Le chapitre 3 présente les résultats issus de la méthodologie appliquée. Le chapitre 4 concerne la discussion des résultats suivie des limites et recommandations du projet.

\*\*\*



# **CHAPITRE 1**

## **ÉTAT DE CONNAISSANCE SUR LES RÔLES ET LES DYNAMIQUES DES PETITS COURS D'EAU**

L'existence du risque, lié aux aléas HGM dans les PCE, relève d'une connaissance sur la dynamique à laquelle ils sont associés. Ce premier chapitre permet de comprendre l'approche utilisée pour l'évaluation préliminaire du risque. Il expose un apport de connaissances sur les PCE en abordant leurs sensibilités, leurs dynamiques, leurs gestions en contexte québécois et l'intérêt de ce projet de maîtrise.

### **1.1 NOTION DE PETITS COURS D'EAU**

Les PCE sont fréquemment employés sous les termes de cours d'eau en tête de bassin versant (Wohl, 2017), rivière de faible ordre (Ferreira et al., 2023), rivière de faible énergie (Jugie, 2018), chaque expression étant utilisée dans un contexte spécifique d'étude et d'analyse. Wohl (2017) définit les PCE comme étant des cours d'amont de premier et second ordre selon la classification de Strahler (Strahler, 1954a), dont les fonctions chimiques, physiques et biologiques sont d'une forte importance dans un réseau fluvial. Dans sa thèse qui porte sur les PCE franciliens périurbains, Jugie (2018) caractérise les petits cours d'eau de faible énergie, de chenaux de dimension modeste d'une largeur moyenne de 10 m et dont le bassin versant est inférieur à 1 000 km<sup>2</sup>. Jugie (2018) les définit comme d'ordre de Strahler de 1 à 4. La difficulté de définir les PCE réside dans la variabilité des contextes topographiques et hydrographiques (Lespez et al., 2017). On reconnaît généralement que les PCE prennent leurs sources dans les lacs, des étangs ou un endroit où le ruissellement est assez important et capable d'éroder pour obtenir un canal (Wohl, 2017). La définition adoptée dans ce présent travail est tout cours d'eau d'ordre de Strahler variant entre 1 et 3 et d'une superficie du bassin versant inférieure à 50 km<sup>2</sup>. Cette définition correspond aux attentes du projet Constrictor, car celui-ci tient compte de la moyenne des médianes des aires drainées selon les ordres de Strahler pour les principaux bassins versants des MRC à l'étude (figure 1). Aussi, il se veut être un complément aux projets EPRI et INFO-Crue qui concernent particulièrement les bassins versants d'une superficie supérieure de 50 km<sup>2</sup>.

Par ailleurs, la faible taille des PCE et de leur bassin versant constitue une limite dans la cartographie de la plaine inondable (Ballais et al., 2007). Pourtant, aux cours d'eau est associée une dynamique fluviale qui évolue dans le temps. Les cours d'eau enclenchent des processus géomorphologiques dont l'intensité et la durée peuvent varier. L'intensité de ces processus peut diminuer ou augmenter jusqu'à une stabilisation de l'activité géomorphologique enclenchée (Maltais et al., 2021). La dynamique fluviale de certains PCE incite à davantage d'interventions humaines. Cependant, la rectification du cours d'eau et une condition météorologique extrême peuvent faire en sorte que ce cours d'eau reprenne son espace initial, provoquant ainsi des dégâts considérables pour les aménagements présents dans la zone à risque. En dépit des perturbations et de la pression que les PCE subissent, ils jouent un rôle majeur et exercent une importante influence dans l'équilibre écosystémique (Wohl, 2017). Les PCE assurent des fonctions écosystémiques, hydrologiques et économiques (Jugie, 2018 ; Gravel, 2021). Les bassins versants des PCE sont en général des territoires peu habités, mais prisés pour la villégiature estivale et hivernale (Landon, 2007).

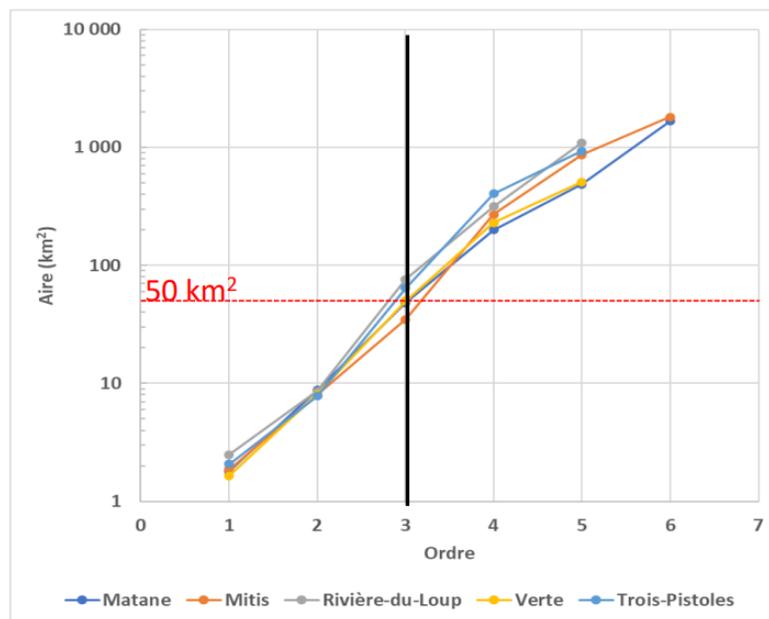


Figure 1. Distribution de la médiane des aires drainées selon les ordres de Strahler pour cinq bassins versants de la région d'étude. © Besnard, 2023

## **1.2 LA DYNAMIQUE FLUVIALE ET L'APPROCHE HYDROGEOMORPHOLOGIQUE (HGM)**

La dynamique fluviale a longtemps été contrôlée en vue de limiter les aléas HGM (Schmidt et al., 2013). L'aléa HGM se définit comme étant tout évènement lié à la dynamique fluviale d'un cours d'eau et son bassin versant. La mobilité du cours d'eau (migration latérale et verticale) et les débordements des cours d'eau sont autant d'aléas HGM qui mettent en péril les infrastructures qui y sont exposées ( Masson et al., 1996 ; Lelièvre et al., 2008). Ces aléas qui, à la base, représentent des processus géomorphologiques qui contribuent à l'équilibre de l'écosystème représentent une menace pour l'humain. Les PCE ont connu d'énormes pressions à travers la canalisation, la rétention des flux solides et liquides qui ont modifié leur équilibre naturel. Cet équilibre, Lane (1955) le représente à travers une balance qui met en relation d'un côté le débit liquide et de l'autre côté le débit solide (figure 2). La modification d'une composante de cette balance peut entraîner une influence morphologique sur le cours d'eau et le système fluvial (Maltais et al., 2021). Cet équilibre perturbé met en relief la sensibilité du cours d'eau face à des facteurs externes qui peuvent être naturels ou anthropiques. En cherchant à contrôler le débit et le transfert de sédiments pour limiter les crues et les stabiliser, l'humain a créé un déséquilibre morphologique des cours d'eau (eau France.sd ; Landon et Piégay, 1994). Il en ressort que l'érosion et la migration verticale (enfouissement du lit) sont les conséquences des actions humaines susceptibles de se produire (Bravard, 1994; Landon et Piégay, 1994; Schmidt et al., 2013).

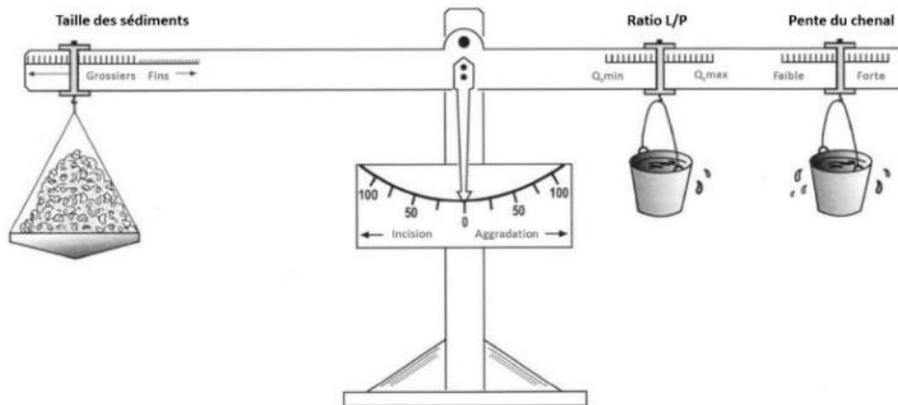


Figure 2. Représentation de l'équilibre d'un cours d'eau. © Adapté de Lane, 1955

La résilience ou la sensibilité du système fluvial face à une perturbation demeure un sujet encore complexe à expliciter (Fryirs, 2017). Cette sensibilité traduit une caractéristique de réponse décrivant l'ampleur d'une perturbation et de son intensité. En écologie, elle exprime la susceptibilité aux perturbations qui est perceptible à l'échelle d'un tronçon ou du bassin versant de la rivière (Fryirs, 2017). Il est courant de se poser des questions lorsqu'un système fluvial doit faire face à un changement, par exemple : quel serait l'impact d'une telle activité dans ce bassin versant ? À quoi s'attendre face à un tel évènement pluvieux ? Les variables de contrôle et les variables de réponse permettent d'expliquer les interrogations soulevées. Les variables de contrôle sont influencées par le climat, la couverture du sol et la géologie où le débit liquide et le débit solide représentent les variables primaires de contrôle. Les variables de réponse décrivent la géométrie du cours d'eau (largeur, pente, profondeur...) et sont conditionnées par les variables de contrôle (Malavoi et Souchon, 1996 ; Malavoi et Bravard, 2011; Schmidt et al., 2013). La pente, la puissance spécifique et l'indice de confinement constituent des variables déterminantes dans la réponse d'un cours d'eau lorsque son équilibre est perturbé. De plus, la morphologie du bassin versant associée à la pente et d'autres facteurs (précipitations intenses, faible capacité d'infiltration du sol) interviennent dans la réponse hydrologique rapide des petits bassins versants de montagne

(Harader, 2015). En effet, un sol végétalisé peut limiter le ruissellement, contrairement à un sol anthropisé qui présente un ruissellement important (Garitte, 2006).

La reconnaissance des processus HGM contribue à mieux comprendre les aléas HGM et proposer des outils de gestion du risque (Maltais et al., 2021). Les aménagements conçus pour la stabilisation des cours d'eau et la réduction des risques liés aux aléas HGM ont fonctionné jusqu'à ce jour (Schmidt et al., 2013). Cependant, cette stabilisation s'est intensifiée dans la moitié du 20<sup>e</sup> siècle et a contribué à changer l'évolution des cours d'eau pour qu'ils passent d'un état dynamique à un état moins mobile et statique (Biron et al., 2013b). La pression de l'urbanisation et le changement de l'utilisation des espaces exposent davantage le nombre d'individus et d'infrastructures aux aléas HGM. L'intensification des événements météorologiques extrêmes et les crues sont susceptibles de se produire de plus en plus selon les prévisions climatiques futures. La gestion du risque devient alors une discipline importante au regard de la démographie grandissante et du changement climatique. La prévention de ces événements passe par une évaluation préliminaire du risque à travers la cartographie HGM des zones exposées (Lelièvre et al., 2008). De cette optique, la question que l'on se pose est comment le risque s'évalue-t-il au travers de la cartographie HGM ?

L'approche hydrogéomorphologique (HGM) repose sur la reconnaissance des formes et des processus influencés et influençant les cours d'eau, et sur l'analyse de l'évolution historique de ces formes, des processus et des facteurs contrôlant cette évolution pour mieux anticiper leur évolution future pour un aménagement et une gestion durable du territoire et de ses ressources (Buffin-Bélanger et al., 2023). Elle se base sur l'observation, l'interprétation et la cartographie des formes induites par la dynamique fluviale telles que les cônes alluviaux, la plaine alluviale et les modelés d'incisions. Elle peut ainsi contribuer à la détermination et la cartographie des zones inondables des cours d'eau. La méthode HGM a fait partie intégrante des méthodes préconisées dans la mise en place de l'atlas des zones inondables (AZI) et du plan de prévention des risques d'inondation (PPRI) en France (Ballais et al., 2007; Montané et al., 2015). La cartographie des unités du paysage s'est graduellement imposée à travers son efficacité et sa réalisation à faible coût. Huit rivières du Québec méridional dont la Rivière-au-Renard ont contribué au développement et à la pertinence d'utiliser cette

approche. Ainsi, depuis 2007, la cartographie HGM s'est révélée très efficace, et s'est soldée notamment par son intégration dans le schéma d'aménagement de la rivière Bonaventure. Aujourd'hui, l'approche HGM dépasse le contexte simple de la cartographie HGM pour les zones inondables. Elle constitue une approche pertinente dans la compréhension qualitative et quantitative des aléas HGM à l'échelle des bassins versants et des corridors fluviaux (Besnard, 2016).

L'approche HGM peut se décliner en trois composantes : la reconnaissance, la trajectoire et finalement l'anticipation de l'évolution des formes et processus fluviaux. La reconnaissance des formes fluviales (cône alluvial, plaine alluviale, modelés d'incision), témoins de la dynamique des cours d'eau, demeure la phase préliminaire à réaliser dans la mise en place de cette approche. Chaque forme fluviale est sujette à des processus dont l'intensité, la récurrence, l'environnement fluvial et les facteurs de contrôle au sein du bassin versant varient (Maltais et al., 2021). L'aggradation, la torrentialité et l'avulsion pour les cônes alluviaux ; la migration latérale et l'inondation pour la plaine alluviale sont autant de processus auxquels ces formes fluviales sont sujettes. Les inondations dans une plaine alluviale sont fréquentes et dommageables en raison de l'utilisation et l'aménagement du territoire qui sont généralement importants dans cet espace (Bourgault et al., 2022). Cependant, un cône alluvial de pente forte aura tendance à avoir des crues torrentielles plus courtes dans le temps avec une étendue spatiale limitée (Bourgault et al., 2022). La caractérisation de ces processus et de leur intensité sur chaque forme fluviale participe à l'évaluation du risque lié aux aléas HGM. Celle-ci passe par une approche HGM approfondie qui nécessite des travaux sur le terrain pour caractériser les variabilités spatiales des variables morphométriques clés : largeur, débit, pente, etc (Biron et al., 2013a).

Cependant, compte tenu du fait que l'inventaire terrain mobilise des fonds et du temps considérables pour couvrir un territoire, des moyens ont été déployés pour le développement d'outils au cours des dernières années pour la détermination de ces variables (Biron et al., 2013a). Parmi ces outils, les SIG (système d'information géographique) et les modèles numériques de terrain (MNT), dérivés de LiDAR permettent de réaliser une première évaluation du cours d'eau et son bassin versant. Une panoplie d'outils et de méthodes ont

émergé pour caractériser le réseau fluvial. Parmi les méthodes figurent celles associées à la caractérisation du fond de vallée, siège de mobilité du cours d'eau (Alber et Piégay, 2011; Roux et al., 2015; O'Brien et al., 2019; Sechu et al., 2021; Stepinski et Jasiewicz, 2012) . Ensuite, Yochum et al. (2017) ; Sholtes et al. (2018) et Mazgareanu et al. (2020), identifient l'importance de la puissance spécifique (l'énergie de l'écoulement d'une rivière), le confinement (l'espace disponible dans lequel un cours d'eau se déplace) et la largeur du chenal comme étant des variables clés dans la réponse du chenal. Dans cette optique, Maltais et al. (2021) mettent l'accent sur deux outils HGM dont la segmentation fluviale par tronçon homogène et la cartographie de la mobilité pour la caractérisation morphologique et géométrique du chenal. La caractérisation du réseau fluvial et de l'intensité des processus se déroulant sur chacune des formes fluviales suscite une démarche scientifique. Elle est axée sur la reconnaissance, la cartographie des unités du paysage et la détermination des variables morphométriques où l'extraction du fond de vallée représente une étape maîtresse dans la caractérisation du corridor fluvial (Roux et al., 2015). Le fond de vallée se définit comme étant la plaine alluviale fonctionnelle et le siège des interactions des processus HGM, où son évolution est le produit de la puissance spécifique du cours d'eau et de la nature des sédiments qui la compose (Nanson et Croke, 1992).

La plaine alluviale est une forme fluviale qui résulte d'une succession de crues d'intensités variables survenues dans le passé, mais susceptibles de se reproduire dans le futur (Lelièvre et al., 2008). Elle est le siège de fluctuations du dynamisme du cours d'eau où la migration latérale et l'accrétion verticale représentent les processus qui conditionnent sa formation (Lelièvre et al., 2008). Elle se subdivise en deux unités, la plaine alluviale fonctionnelle et la plaine alluviale non fonctionnelle (figure 3). La plaine alluviale fonctionnelle est communément connue sous l'expression de plaine d'inondation, car elle représente la zone de la plaine alluviale exposée à l'aléa inondation (Demers et al., 2014). Selon Nanson et Croke (1992), son développement résulte du produit entre la puissance spécifique et la nature des sédiments. La puissance spécifique apparaît comme un critère tangible de classifications des cours d'eau (Brookes, 1987 ; Nanson et Croke, 1992 ; AESN, 2007), et un moyen

d'appréhension de l'activité et de la dynamique du cours d'eau par la détermination du seuil qu'il faut atteindre ou non pour qu'il y ait un transport de la charge de fond (Petit et al., 2007). Dans une optique où les cours d'eau sont associés à une mobilité et répondent de manière radicale aux perturbations climatiques et anthropiques, il devient impératif de déterminer la puissance spécifique de ces cours d'eau, car les espaces occupés sont exposés à l'érosion (Demers et Buffin-Bélanger, 2011).

La cartographie de la plaine d'inondation passe par l'extraction du fond de vallée. C'est une cartographie assez délicate, car cette limite ne concorde pas souvent aux limites morphologiques visibles. Sa délimitation se situe au premier talus où apparaît une discontinuité topographique qui présente une certaine stabilité géomorphologique (Demers et al., 2014). La délimitation est réalisable automatiquement par le biais d'outils SIG (Stepinski et Jasiewicz, 2012 ; Roux et al., 2015).

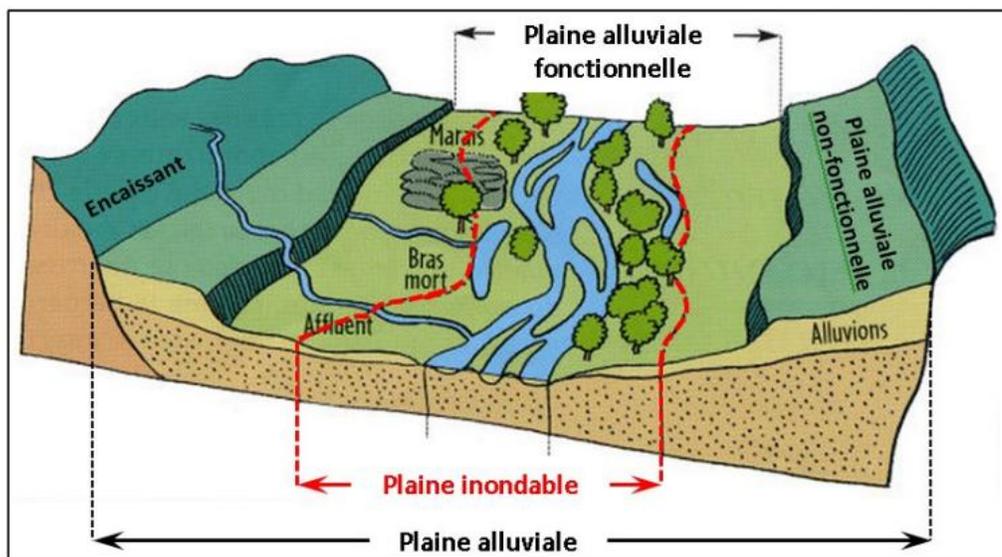


Figure 3. Schéma conceptuel intégrant les limites de la plaine alluviale et de la plaine inondable. © Adapté de Freinet, 2013

Les cônes alluviaux sont quant à eux des formes issues d'une accumulation de sédiments et d'une brusque rupture de pente d'un cours d'eau (figure 4). Les critères d'identification des

cônes sont affiliés à leur forme (conique ou en éventail avec l'apex situé en amont), ce qui facilite parfois leur cartographie. Ils sont présents dans différentes régions climatiques et sont favorables au développement des cultures et de l'habitat (Hugerot, 2020). Cependant, ils sont soumis à des aléas torrentiels (lave torrentielle, crue torrentielle) qui représentent un risque important pour les infrastructures (Buffin-Bélangier et Héту, 2008 ; Kaitna et Huebl, 2013). Les laves torrentielles sont alimentées par des coulées boueuses (Hugerot, 2020). Ces coulées sont associées aux processus de versants et surviennent à des périodes variables selon des conditions météorologiques complexes (Boulet et al., 2022). La dynamique torrentielle sur les cônes alluviaux constitue le facteur primaire de risque pour les activités humaines (Girardin, 1910; Bertrand et al., 2017 ; Morel et al., 2022). L'évolution des cônes est conditionnée par deux processus : aggradation et avulsion, et sont à l'origine de leur forme d'éventail à une allure bombée (Buffin-Bélangier et Héту, 2008). L'aggradation est une accumulation des sédiments charriés provoquant une accrétion verticale du lit du cours d'eau. Ce processus HGM s'accompagne parfois d'autres processus tels que l'élargissement du lit ou l'augmentation de l'intensité des inondations (Maltais et al., 2021). Quant à l'avulsion, c'est un processus de déplacement du chenal. Lors d'un débordement de cours d'eau, l'eau peut emprunter un autre chemin (changement du lit). Il survient lorsque les sédiments accumulés (processus d'aggradation) contraignent le cours d'eau à emprunter un autre lit (Hugerot, 2020). Cette accumulation de sédiments réduit l'aire de la section transversale, ce qui favorise une hausse du risque d'inondation et de débordement lors d'intempéries climatiques (Bourgault et al., 2022). Inversement, dans une plaine alluviale, un déficit sédimentaire entraîne une incision du lit, augmente l'aire de la section transversale et réduit par la même occasion le risque d'inondation. Cependant, il favorise une certaine instabilité des berges et augmente le risque de migration latérale (National Research Council, 1996 ; Bourgault et al., 2022). L'activité sur un cône renvoie à la présence des processus témoins du dynamisme, ce qui permet de distinguer la zone active et non active sur le cône (Maltais et al., 2021). L'identification d'une activité sur un cône renvoie à la détermination d'indices morphologiques qui se caractérisent soit par une revégétalisation lente, modification de la morphologie du chenal, présence d'incision, d'érosion et d'aggradation, etc. (Hugerot, 2020).

À l’opposé, le développement de la végétation, des mousses, reflète d’une activité torrentielle limitée (Morel et al., 2022). Par conséquent, un cône inactif se définit comme étant un cône où aucun processus HGM n’est susceptible de survenir (National Research Council, 1996). La zone active du cône peut être déterminée à partir d’outils SIG tels que ExZeco (Massé et al., 2020 ; Maltais et al., 2021 ; Cerema, 2020). C’est un outil qui simule des événements et prédit les trajectoires potentielles que peut prendre l’écoulement. Les chemins empruntés délimitent les zones actives probables et représentent la zone à risque élevé pour les infrastructures présentes (Massé et al., 2020). Cet outil a été appliqué dans ce projet d’étude pour la caractérisation des processus torrentiels.

La caractérisation des processus torrentiels est possible à partir des caractéristiques morphométriques du bassin versant (Melton, 1965; Jackson et al., 1987; Marchi et Brochot, 2000; Wilford et al., 2004 ; Rickenmann et Scheidl, 2013; Bertrand et al., 2017). Ces processus torrentiels se distinguent majoritairement par leur charge sédimentaire qui implique une disponibilité sédimentaire dans le bassin versant.

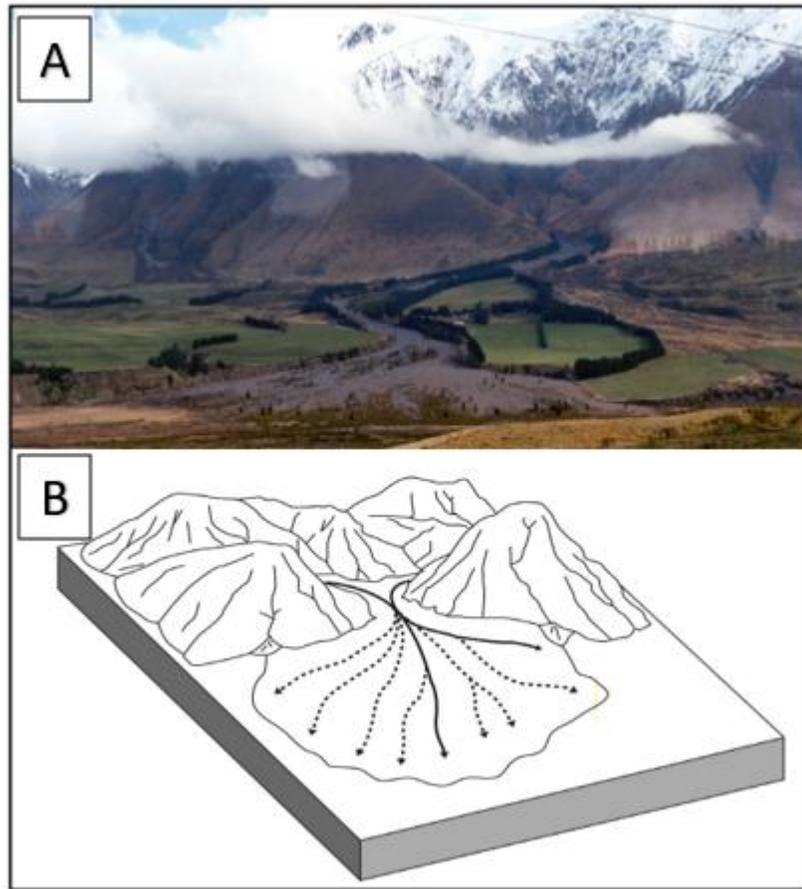


Figure 4. A: Cône alluvial formé à l'interface d'une région montagneuse et d'une plaine alluviale, Nouvelle-Zélande. B: La migration latérale du chenal principal, causée par l'aggradation et l'avulsion du cours d'eau, contribue à la formation en éventail. © Buffin-Bélanger et Héту, 2008

Les modelés d'incisions sont des formes associées aux processus de ravinement et d'incision sous l'effet d'un fort ruissellement. Ce sont des cours d'eau qui constituent généralement des sources de sédiments ou de transport de sédiments. Ils sont aussi sous la contrainte de la forme de la vallée qui lui impose une morphologie de confinement (figure 5), et présentent de ce fait une mobilité réduite (Fryirs et al., 2016). Ils se retrouvent souvent encaissés et dépourvus de plaines les conditionnant à des processus de versant. Dans la littérature, ils sont connus sous le nom de cours d'eau confinés (Sholtes et al., 2018). La caractérisation des

processus auxquels les modelés d'incisions sont associés passe par l'extraction du fond de vallée afin d'évaluer le degré de confinement et l'intensité des processus auxquels ils sont sujets.

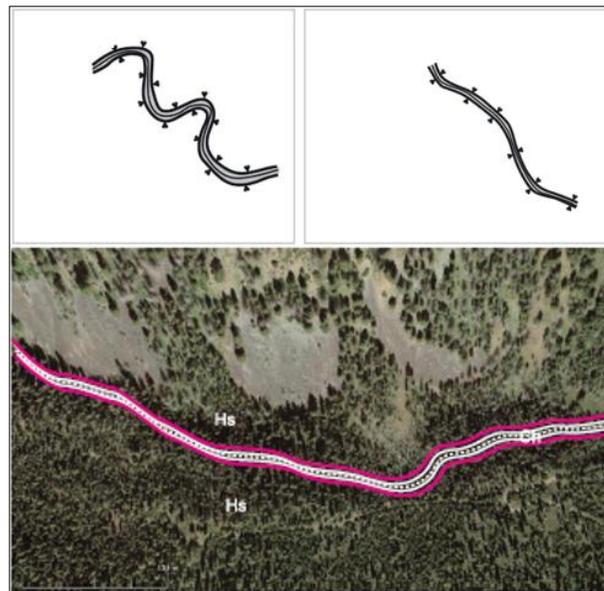


Figure 5. Identification d'un modelé d'incision ou cours d'eau confiné avec Hs : versant et Ch. : chenal. © Fryirs et al., 2016.

Ainsi, la cartographie de la plaine d'inondation, des cônes alluviaux et des modelés d'incisions constitue une étape préliminaire à réaliser dans la caractérisation des aléas HGM. L'identification de ces formes sur le territoire permet d'orienter et de sélectionner les actions à mener dans la gestion de l'aménagement en tenant compte des processus fluviaux opérants. La figure 6 présente une cartographie de ces trois formes dans un bassin versant et révèle que l'espace fluvial peut se diviser selon les processus opérants et façonnant ces formes.

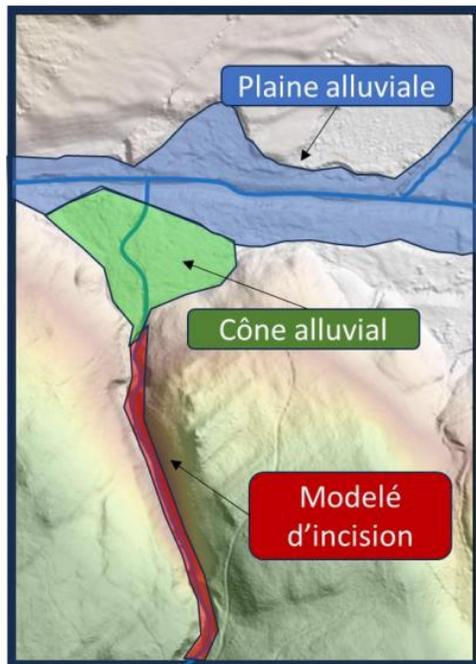


Figure 6. Identification des formes fluviales

### 1.3 DEFINITION ET CONCEPT DE L'EVALUATION PRELIMINAIRE DU RISQUE

Selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le risque résulte de l'interaction entre l'aléa, la vulnérabilité et l'exposition des enjeux (figure 7) (GIEC, 2014). Le risque se définit aussi comme étant la probabilité qu'un événement se produise (aléa naturel ou anthropique) dans une zone exposée à des enjeux d'ordre humains et/ou matériels (Frini et al., 2019). La vulnérabilité est perçue comme « la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique » (d'Ercole et al., 1994, p. 88-89). La scission entre l'aléa et la vulnérabilité favorise une approche fragmentée des deux concepts dans la gestion du risque (Meschinet De Richemond et Reghezza, 2010). L'aléa renvoie à l'éventualité qu'un événement naturel ou anthropique se produise et qu'il soit susceptible d'entraîner des pertes en vies humaines, des pertes matérielles et touchant les moyens de subsistance et les ressources environnementales (GIEC, 2014).

De l'autre côté, la vulnérabilité se définit comme la prédisposition à subir des dommages. Elle englobe plusieurs concepts, notamment la fragilité ou la sensibilité à faire face à un évènement (GIEC, 2014). Elle représente aussi le degré d'endommagement et l'exposition des enjeux (infrastructures routières ou bâtiments, des pertes de terre), ce qui contribue à insister sur la répartition spatiale des enjeux (Veyret et Reghezza, 2005 ; Demers-Bouffard, 2021).

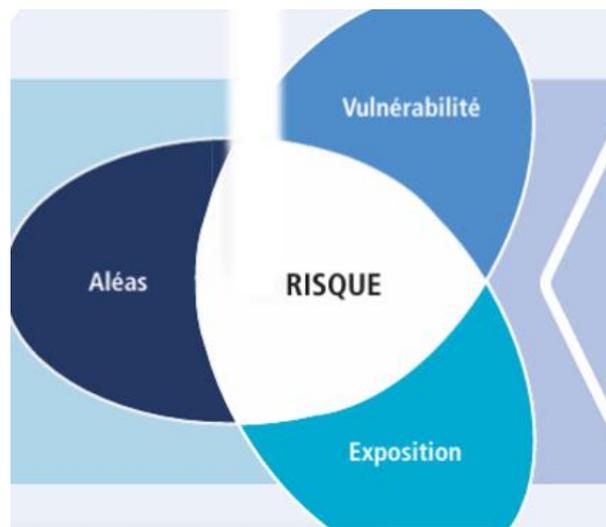
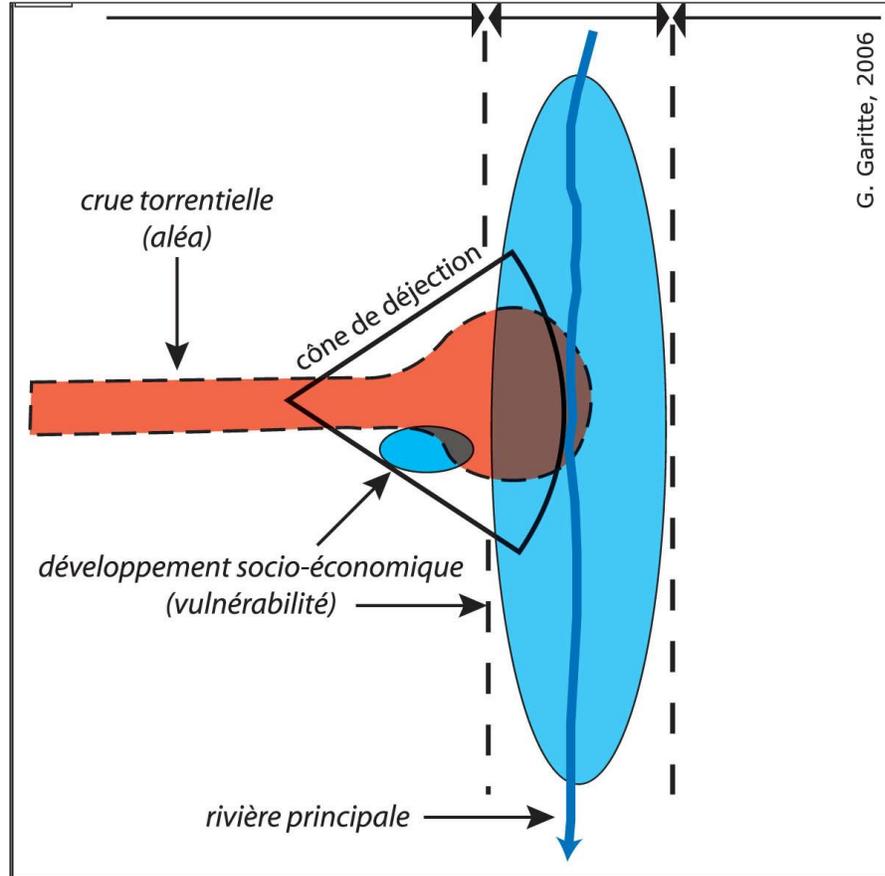


Figure 7. Définition du risque. © GIEC, 2014

Frini et al. (2019) évoquent deux concepts de l'analyse du risque en lien avec l'aléa inondation. L'un d'entre eux concerne l'évaluation préliminaire et constitue le cadre d'analyse dans ce projet d'étude (figure 8). L'évaluation préliminaire met l'accent sur les facteurs tels que l'étendue et l'intensité de l'aléa, puis l'exposition des enjeux comme variable d'analyse pour la vulnérabilité. Elle vise à établir un premier diagnostic du risque et s'arrime au projet EPRI (évaluation préliminaire du risque lié aux inondations) (Choné et al., 2017). En effet, le risque survient en présence d'enjeux qui sont exposés à un aléa. La vulnérabilité des enjeux exposés est influencée par la proximité avec l'aléa et de son intensité. Le tableau 1 présente les facteurs exacerbant la vulnérabilité des enjeux. Ainsi, le recensement des enjeux exposés permet d'anticiper les coûts liés aux pertes économiques lorsqu'un évènement peut être dommageable.



G. Garitte, 2006

Figure 8. Illustration de l'évaluation préliminaire du risque par exposition d'un enjeu présent sur un cône alluvial. © Adapté de Garitte, 2006.

Tableau 1

Facteurs exacerbant la vulnérabilité des éléments exposés © MSP, action 6

Éléments du milieu	Facteurs accentuant le degré d'exposition
Population (secteurs)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secteur à forte concentration de population</li> <li>• Secteur situé près du point d'origine de l'aléa</li> <li>• Secteur exposé de façon continue à l'aléa</li> </ul>
Bâtiments à vocation particulière	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bâtiment, réseau ou infrastructure, activité économique ou milieu naturel situés près du point d'origine de l'aléa</li> <li>• Bâtiment, réseau ou infrastructure, activité économique ou milieu naturel exposés en continu à l'aléa</li> </ul>
Réseaux et infrastructures	
Activités économiques	
Milieux naturels sensibles et autres composantes environnementales particulières	

Cependant, la notion du risque reste difficile à cerner du point de vue ontologique, car le risque est « virtuel ». D'une conception plus quantitative de la définition du risque, il s'agit de mesurer les potentiels dommages que peut occasionner un évènement futur. C'est un concept qui est étroitement lié à la réalité et à la prédiction (Kermisch, 2012). Il importe donc de déterminer une méthodologie appropriée se rapprochant davantage de la réalité pour évaluer le risque préliminaire par le biais d'outils adéquats.

Par ailleurs, l'évaluation du risque peut être perçue comme un ensemble de stratégies du point de vue politique, technique, scientifique, culturel et social dans l'objectif de réduire le plus possible les impacts d'un aléa. La gestion du risque se caractérise par trois phases :

Phase 1 : Prévention, préparation, préalerte

Phase 2 : Intervention

### Phase 3 : Reconstruction

La mise en place de chaque phase varie selon le pays confronté à une catastrophe donnée, ses capacités financières à y faire face, son niveau d'expertise et de connaissance à déployer les moyens. Trois grandes méthodes sont utilisées pour mener à bien les phases de prévention et préparation en lien avec l'aléa inondation.

La première méthode se base sur le concept de résilience. Cette approche permet d'avoir un autre regard sur l'aléa et aide à renforcer la capacité de la société à résister et se reconstruire malgré le choc. La résilience est composée de plusieurs éléments et connaît une évolution dans le temps. Elle fait partie intégrante de la phase de prévention, mais pourrait intégrer les deux autres phases (intervention et reconstruction). Le concept de résilience exige une connaissance permettant de mettre en place des solutions autant dans la prévention que dans la reconstruction. De manière préventive, les stratégies antérieures utilisées en vue d'une réduction de l'impact reposaient sur la mise en place d'ouvrages dimensionnés par des ingénieurs tels que la construction de digue, de barrage, etc (Dauphiné et Provitolo, 2007). Cependant, cette approche met souvent en danger la vie de la population en cas d'ouvrage mal entretenu et mal dimensionné. On assiste parfois à des ruptures de digue et de barrages montrant un aspect de défaillance dans la construction de ces infrastructures (Vinet, 2018). Face à cela, la résilience apparaît comme une alternative de prévention. Selon Dauphiné et Provitolo (2007), la résilience consiste à accepter l'aléa et mettre tout en œuvre pour réduire l'impact. Cependant, la résilience est soumise à plusieurs défis. L'absence d'approche pour la mesurer et la promouvoir limite son efficacité et son exécution (Graveline et Germain, 2022).

La seconde méthode repose sur la mise en place d'une cartographie et elle est de plus en plus utilisée à l'échelle internationale. Sa réalisation reste malgré tout différente selon les juridictions, mais toutes ont le même objectif qui est de délimiter les zones inondables dans le cas de l'aléa inondation pour contraindre l'aménagement dans ces zones. Les trois méthodes de réalisations de cartographie sont la méthode satellitaire, la méthode hydrogéomorphologique (HGM) et la méthode hydraulique (Taous et al., 2010; Tanguy, 2012; Vinet, 2018; Maltais et al., 2021). Toute une réflexion scientifique est associée à la

cartographie et à la connaissance de l'aléa. La cartographie est employée souvent sous le terme de cartographie réglementaire (Hubert et Vanssay, 2005). Cependant, il arrive qu'elle soit utilisée dans un contexte de communication envers le public et peut intervenir dans chacune des phases mentionnées précédemment (prévention, préparation, préalerte ; intervention ; reconstruction). Selon Hubert et Vanssay (2005), la cartographie réglementaire n'a pas seulement une fonction coercitive (contrôler l'occupation des sols et interdire l'urbanisation des zones les plus sensibles aux inondations). Force est de constater que les aménagements dans ces zones persistent à telle enseigne que l'on s'interroge sur la perception du risque de la population (Demers-Bouffard, 2021). En somme, la cartographie des zones inondables est un outil de gestion des risques d'inondation et permet de spatialiser l'aléa selon l'objectif visé, l'expertise dans l'approche adoptée et les données à acquérir pour sa réalisation.

Le concept d'adaptation en aménagement du territoire représente la troisième méthode pour mener à bien les phases de prévention et de préparation dans la gestion du risque. Le concept d'aménagement repose sur des techniques architecturales intégrant la gestion de l'eau. Il se base également sur la résilience et la cartographie afin d'avoir une autre perception des inondations. L'adaptation vise à accepter l'eau et apprendre à vivre avec (Gascon, 2019) et utiliser la ressource eau comme étant un avantage paysagiste et architectural. Cette perception a conduit à la réalisation de plusieurs infrastructures dans certains pays, notamment à Amsterdam aux Pays-Bas, où des maisons flottantes ont été installées dans un bassin de rétention d'eau dans la ville de Ijburg (figure 9) (Gascon, 2019). Aujourd'hui, l'on assiste à un essor d'infrastructures modernes, notamment des maisons flottantes et des parcs récréatifs végétalisés de plus en plus répandus dans les villes. Ces méthodes favorisent une meilleure perméabilisation du sol par la présence de végétation et réduisent ainsi le taux de ruissellement lors des inondations (Gascon, 2019).

Par ailleurs, la gestion du risque lié aux aléas HGM dans les PCE est un concept en pleine expansion au Québec, car dans un contexte de changement climatique, les scientifiques se rendent compte des enjeux économiques associés à la perte des biens matériels et la reconstruction des infrastructures endommagées. Cependant, la pénurie

d'outils adaptés au contexte des PCE maintient un tel projet d'étude dans une phase d'essai et d'expérimentation. Elle aboutit vers une analyse préliminaire du risque à grande échelle des PCE et ce projet de maîtrise se classe dans l'ordre de prévention à travers la mise en place d'une cartographie préliminaire du risque.



Figure 9. Waterbuurt (quartier de l'eau), Ijburg, Amsterdam, 2011  
© Gascon, 2019.

#### **1.4 CADRE DE GESTION DES COURS D'EAU ET INITIATIVE AU QUEBEC**

La gestion du cours d'eau dans la province reste complexe, car elle implique plusieurs paliers de gouvernance qui sollicitent un grand effort de communication (AGRCQ, 2017). Plusieurs ministères provinciaux, dont le ministère de la Sécurité publique (MSP), le ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation (MAMH), le ministère de l'Environnement de la Lutte contre les changements climatiques de la Faune et des Parcs

(MELCCFP), interviennent dans la réduction de la vulnérabilité de la population québécoise face aux sinistres. Ils émettent des mandats en vue de connaître ces sinistres, les prévenir et anticiper sur leurs conséquences et dommages qu'ils peuvent occasionner. En dehors des ministères, les MRC (Municipalité Régionale de Comté), les municipalités et divers organismes participent à la réduction de la vulnérabilité des populations. Les MRC ont été créées en 1979 et se sont vu attribuer tout pouvoir en ce qui concerne l'aménagement du territoire ainsi que de la gestion des cours d'eau le 1<sup>er</sup> janvier 2006. Elles sont assujetties à la loi sur les compétences municipales (LCM) où les articles 103 à 110 traitent de ces compétences. Parmi ces articles, on peut en tirer certains rôles, notamment :

- Développer les connaissances sur le risque présent au sein du territoire ;
- Mettre en place des mesures pour prévenir les sinistres et réduire les conséquences ;
- Tenir compte des risques probables dans l'aménagement et le développement du territoire.

Les MRC regroupent les municipalités régies par les lois sur les villes et les cités (LCV) et le code municipal (CM). Parmi les organismes impliqués dans la gestion des cours d'eau du Québec, on compte aussi les organismes de bassin versant (OBV) qui veillent à la sécurité et la santé de l'eau tout en mettant en place le plan directeur de l'eau (PDE). Ce plan aide à la prise de décision sur la protection et la restauration des écosystèmes d'un bassin versant, car il renseigne sur ces problématiques d'ordre hydrique et environnemental.

En ce qui concerne les initiatives de gestion du risque, elles sont nombreuses à avoir été mises en place au Québec à la suite des événements dommageables liés aux inondations qu'a connus la population québécoise. Ces événements ont marqué l'esprit des populations riveraines ainsi que les autorités provinciales. À la suite de ces événements ont émergé plusieurs investigations et projets dans une optique de sécurité publique, notamment le congrès provincial : Agir en amont en 2018. Après ce congrès, une liste d'actions a été élaborée pour aider à comprendre l'aléa, réduire les vulnérabilités des collectivités et éduquer à la culture du risque (ROBVQ, 2018). Cette démarche favorise une bonne cohésion et un

plan directeur à suivre pour la bonne marche de la gestion du risque. Cette section aborde deux principaux projets initiés par le gouvernement du Québec (INFO-Crue et EPRI) en vue d'une gestion du risque lié à l'aléa inondation à l'échelle provinciale. L'accent sera mis également sur les préoccupations des MRC concernées par le projet Constrictor débouchant sur ce projet d'étude.

- **PROJET INFO-Crue** : Des dommages considérables ont été recensés à la suite des inondations qu'a connues le Québec depuis ces 20 dernières années, notamment ceux causés lors de la crue de la Rivière-au-Renard en 2007 et les inondations printanières de 2017 et 2019. Ces dernières inondations ont engendré plus de 5 300 sinistrés et coûté plus de 25,9 millions de dollars (Frini et al., 2019). Ces événements ont conduit à plusieurs réflexions quant à la gestion du risque lié aux inondations. Il était important de repenser à une stratégie qui favoriserait la protection des personnes et des biens, mais aussi anticiper les événements futurs dans un contexte de changement climatique. La cartographie HGM verra le jour pour la première fois à la suite de la crue causée par la Rivière-au-Renard. Cette cartographie demeurait cependant à l'échelle locale et couvrait un territoire réduit. À la suite des événements de 2017 et 2019, il était question de couvrir cette fois-ci un plus grand territoire. C'est ainsi qu'est né le projet INFO-Crue pour garantir la protection des personnes et la réduction des dommages et des pertes économiques. Pour y arriver, le gouvernement souhaite alors cartographier l'aléa inondation dans certaines zones dites prioritaires pour leurs fortes vulnérabilités marquées par la densité de population et la dangerosité des cours d'eau de ces zones face à certains épisodes pluvieux (Frini et al., 2019). C'est un projet qui réunit plusieurs acteurs, notamment le gouvernement, des chercheurs universitaires, Ouranos et les propriétaires riverains, etc. Cependant, ce projet s'intéresse uniquement aux grands cours d'eau dont la taille des bassins versants est supérieure à 50 km<sup>2</sup>, d'où l'initiative de la mise en place d'un projet portant sur les petits bassins versants.

- EPRI (Évaluation préliminaire du risque d'inondation) : L'évaluation préliminaire du risque lié aux inondations (EPRI) est une directive européenne qui concerne tous ses états membres. Elle vise à réaliser un portrait général du risque à l'échelle nationale par l'identification des territoires à risques (Choné et al., 2017). Ainsi, en 2016, le MSP a initié le projet EPRI dans la province du Québec. Cette décision vient du fait que, malgré la présence du risque d'inondation, il n'existe pas de portrait exhaustif sur le risque d'inondation de la province et les projets réalisés jusqu'à ce jour se font uniquement de manière fragmentaire, région par région (Choné et al., 2020). Ainsi, le projet EPRI vise à renforcer la résilience des Québécois. C'est un projet qui se déroulera sur plusieurs mandats donnant naissance à EPRI I (2016-2017), EPRI II (2018-2020) puis EPRI III (2020-2025). Les phases I et II du projet EPRI avaient pour objectif de développer davantage les connaissances sur l'aléa en proposant des méthodes de cartographie à large échelle des zones inondables. L'approche retenue et recommandée fut la mise en place de modèle hydraulique Lisflood (Choné et al., 2020) à partir d'estimation de la bathymétrie basée sur des données LiDAR. Quant à EPRI III, il est plus accentué sur l'évaluation de la composante exposition de la vulnérabilité en croisant les cartes d'inondabilité à large échelle produite avec les données du cadre bâti et des recensements des personnes dans les logements.

Les projets EPRI et INFO-Crue sont tous deux des projets à l'échelle provinciale qui traitent des aléas liés aux cours d'eau dont la taille du bassin versant est de 50 km<sup>2</sup> et plus.

- Genèse du projet Constrictor

En 2018, la MRC de Rivière-du-Loup (RDL) sollicite le laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale (LGDF), pour un appui dans le plan de prévention et de gestion du cours d'eau. En effet, les MRC sont assujetties à la loi sur les compétences municipales (LCM), par ricochet sur l'article 105 de cette loi qui stipule que la MRC doit réaliser les travaux requis pour rétablir l'écoulement en cas d'obstruction qui menacerait la sécurité des personnes ou des biens (AGRCQ, 2017). En plus de cette responsabilité attribuée aux MRC, la situation de jurisprudence survenue lors de la décision de justice sur le cas de Port-au-

Persil dans la MRC Charlevoix-Est à l'été 2005 et 2011 a motivé la MRC de RDL dans cette démarche préventive. En effet, en 2005 à la suite de l'ouragan Katrina, la rupture d'un barrage de castor situé dans un tributaire en amont du bassin versant a été considérée comme responsable de dommages à l'embouchure du cours d'eau. La MRC informée de l'existence de ce barrage de castor, est accusée de ne pas l'avoir démantelé et devra payer de ce fait la somme d'environ 500 000 dollars (figure 10). Puis en 2017, la somme de 620 000 dollars supplémentaires a été imposée lorsque la rivière Port-au-Persil est sortie de son lit et a débordé sur le terrain du propriétaire, inondant sa propriété et son sous-sol à l'été 2011 (figure 11). La MRC a été tenue responsable de n'avoir pas pris des moyens nécessaires pour prévenir ou minimiser les dégâts (Cour Supérieure du Québec, 2017).



The image shows a screenshot of a news article from 'le journal de montréal'. The title is 'À cause de Katrina et des castors!'. The author is Eric Thibault, and the article was published on Monday, March 1, 2010, at 17:24. The article discusses the inaction of the MRC Charlevoix-Est to dismantle beaver dams on the Port-au-Persil river in 2005, which cost about half a million dollars. It also mentions a court ruling on August 31, 2005, ordering the regional municipality to pay 450,000 dollars to the owners of a lodge damaged by flooding.

**le journal de montréal**

## À cause de Katrina et des castors!

**PARTAGE**

**ERIC THIBAULT**  
Lundi, 1 mars 2010 17:24  
MISE À JOUR Lundi, 1 mars 2010 17:24

L'inaction de la MRC Charlevoix-Est à démanteler des barrages de castors sur la rivière Port-au-Persil, à l'été 2005, lui coûtera environ un demi-million de dollars.

La Cour d'appel a en effet condamné la municipalité régionale de comté, lundi, à verser quelque 450 000 \$ - en plus des intérêts - aux propriétaires d'une auberge de Port-au-Persil, l'Oasis du Port, qui a été lourdement endommagée par des inondations, le 31 août 2005.

Figure 10. Archive concernant l'inaction de la MRC Charlevoix-Est sur la rupture de barrage à l'été 2005.



Figure 11. Archive concernant l'inaction de la MRC Charlevoix-Est pour le second dommage à l'été 2011.

Au regard de ces événements et des investigations menées au sein du LGDF en lien aux dommages que pourraient engendrer les PCE, le laboratoire LGDF répond favorablement et décide d'étendre le projet à l'échelle régionale.

En ce qui concerne les investigations, des rencontres ont été organisées avec les six MRC de la région bas-laurentienne dans le but d'identifier leurs besoins et répondre à leurs préoccupations dans la gestion des cours d'eau. Parmi ces préoccupations, les barrages de castors occupent la première place et la torrencialité occupe la quatrième place (figure 12). La poursuite des investigations a porté sur une étude de six grands bassins versants dans ladite région en vue d'évaluer la répartition des petits cours d'eau dans le réseau fluvial. Ces investigations ont porté également sur le dépouillement des demandes d'aides financières aux sinistres à travers le projet AZIDAF et l'historique des événements dommageables dans la région. Il résulte de ces démarches non seulement l'importance des petits cours d'eau dans le système fluvial, mais aussi l'existence de plusieurs sinistres et dommages auxquels ils sont associés. Parmi ces événements, on peut citer ceux occasionnés par l'aléa torrentiel. Selon

Buffin-Bélangier et Héту (2008), le risque est présent, car plusieurs cônes sont occupés par des infrastructures et résidences. La destruction de certaines résidences et d'autres infrastructures telles que l'entreprise de pêche lors de la crise torrentielle au Bic en 2002 témoigne des faits (figure 13). D'autres événements recensés dans la région incitent à une réflexion concernant la présence du risque dans certains PCE.

Avant l'année 2020, des événements ont été signalés au MSP par les six MRC du projet (Rimouski-Neigette, Les Basques, la Mitis, Rivière-du-Loup, la Matanie, Kamouraska). Sur 99 événements recensés, 66 sont situés près des PCE, et près de la moitié se sont déroulés dans la MRC de la Matanie (Besnard et al., 2023).

Tous ces faits témoignent de la présence du risque dans la région et renforcent la mise en place du projet Constrictor. Le laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), et le laboratoire de gestion des rivières de l'Université Concordia ont donc été mandatés par le MSP à travers le projet Constrictor pour soutenir les MRC dans la gestion des cours d'eau à travers la mise en place d'outils SIG d'aide à la décision. Les principaux objectifs s'articulent autour de trois axes, (1) détecter les constriction et obstructions à l'écoulement, (2) identifier les tronçons sensibles aux avulsions et aux inondations, (3) cartographier le risque lié aux aléas fluviaux. La dynamique glacielle ne sera pas considérée comme cadre d'analyse dans ce projet.

Au regard de ce qui précède, ce projet de maîtrise constitue un projet complémentaire à celui d'INFO-Crue et EPRI. Il représente également une phase pilote du projet Constrictor. En effet, ce projet vise à appliquer des outils SIG (ExZeco et Geomorphon landform) sur quatre bassins versants tests. Geomorphon landform est un outil qui permet de délimiter les unités du paysage, notamment le fond de vallée (Stepinski et Jasiewicz, 2012). ExZeco est un outil qui permet de simuler des événements. La méthode est basée sur une variation topographique définie par son utilisateur (Pons, 2010). Cette phase pilote du projet constrictor a pour but d'évaluer le risque lié aux aléas HGM dans les PCE. Cette étape permettra de relever les limites et performances de chaque outil avant leur application à l'échelle régionale.



Figure 12. A : Fondation d'entreprise de pêche détruite. B : Dépôt important de sédiments dans le ruisseau Côté près de la route 132 à Rimouski. Perte de terrain par le recul de la berge. © Buffin-Bélanger et Héту, 2008.

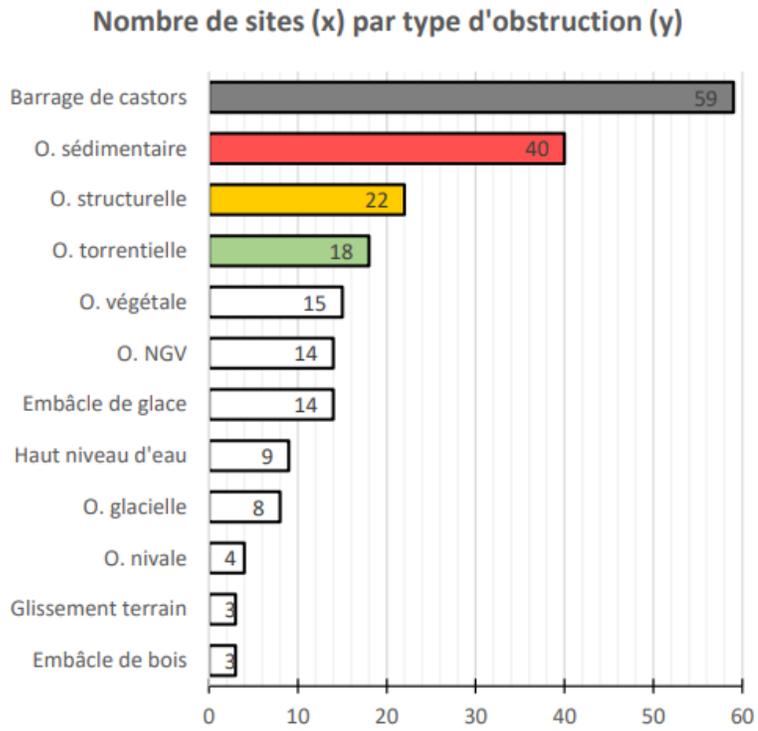


Figure 13. Classification des principaux types de préoccupations énumérées par les six MRC du projet constrictor. © Besnard, 2023.

## **CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE**

La reconnaissance et la délimitation des formes fluviales (cône alluvial, plaine alluviale, modelé d'incision) constituent la première étape dans l'approche HGM. À ces formes sont affiliés des processus HGM qui se transforment en aléas selon la dynamique fluviale. Le risque est lié à la présence des enjeux, lorsque ceux-ci se situent dans la zone des processus HGM associés à chaque forme fluviale. L'intensité du risque dépend de celui de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux. Dans ce projet, cette vulnérabilité est examinée sous la loupe de l'exposition uniquement, c'est-à-dire de la position de l'enjeu vis-à-vis de l'aléa. De ce fait, il importe de caractériser l'aléa en évaluant l'intensité et l'étendue des processus associés aux formes fluviales, puis de déterminer les enjeux qui y sont exposés. La méthodologie est également basée sur la collecte d'information pouvant permettre d'identifier et de cartographier les risques auxquels les populations et collectivités pourraient être exposées. Elle comprend trois parties : le développement de la typologie des aléas, la caractérisation des aléas HGM et l'évaluation de l'exposition des enjeux aux aléas HGM. Des inventaires terrain permettront de valider les résultats obtenus. Pour atteindre les objectifs fixés, le choix s'est porté sur quatre bassins versants de la région du Bas-Saint-Laurent dont les contextes topographiques et d'occupations du sol diffèrent. Les formes fluviales caractérisées pour cette étude sont les cônes alluviaux et la plaine alluviale.

### **2.1 SITES D'ETUDE**

Six grands bassins versants de la région révèlent qu'en moyenne 70 % de leurs territoires sont drainés par les PCE (Besnard, 2023). Des zones proches des PCE peuvent alors être exploitées pour répondre aux besoins des humains. Quatre bassins versants (rivière Centrale, rivière Hâtée, rivière Rouge et Ruisseau Johnson) situés dans la région bas-laurentienne feront l'objet de cette étude (figure 14). Le choix s'est porté sur ces bassins en raison de la disparité de l'occupation du sol, et des événements historiques répertoriés. La région appartient à la province géologique des Appalaches avec des formations rocheuses sédimentaires et métamorphiques plissées qui datent du Paléozoïque (Malo et al., 2015). La

roche sédimentaire est recouverte de dépôt meubles variés. On retrouve généralement dans le fond des vallées des sédiments d'origine fluvio-glaciaire et des dépôts organiques qui ont été déposés au cours des derniers milliers d'années et sur les sommets et versants des tills indifférenciés et des manteaux d'altération de la roche sédimentaire en place (OBVNEBSL, 2015).

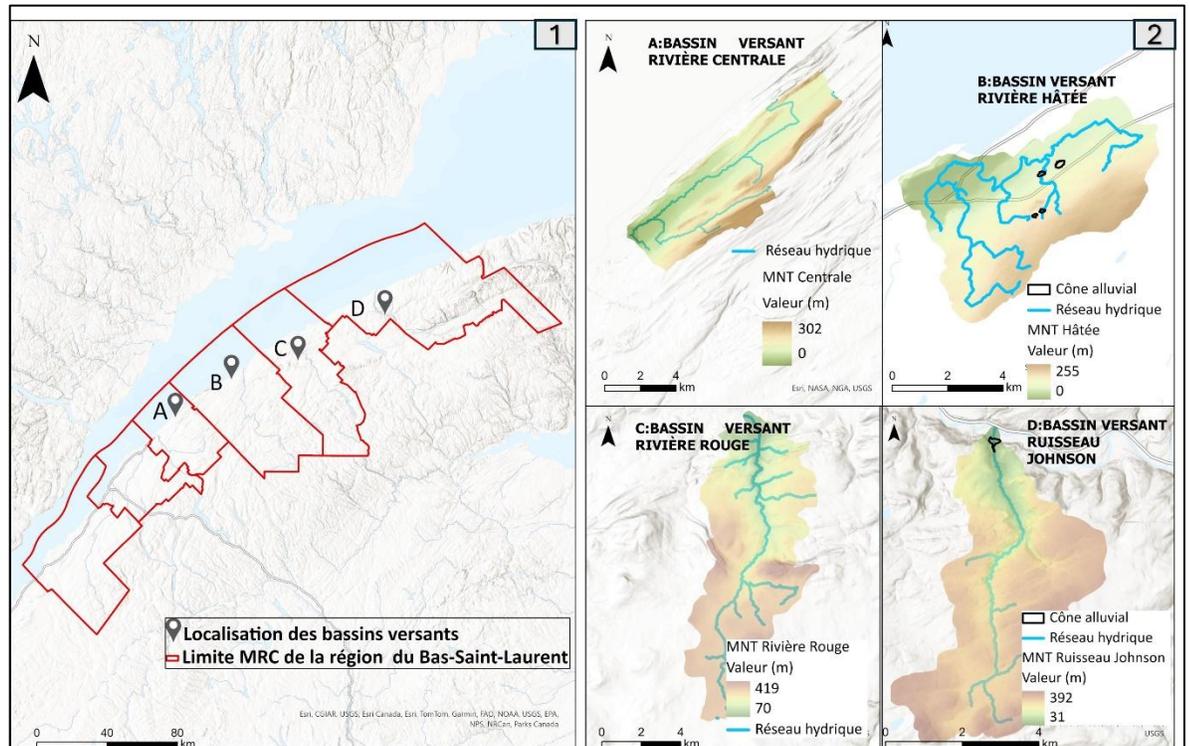


Figure 14. Localisation et présentation des bassins versants à l'étude : (1) Localisation des bassins versants ; (2) Présentation des bassins versants. A : Bassin versant de la rivière Centrale, B : Bassin versant de la rivière Hâtée, C : Bassin versant de la rivière Rouge, D : Bassin versant du ruisseau Johnson.

## 2.2 DEVELOPPEMENT DE LA TYPOLOGIE D'ALÉA HGM

Cette section vise à proposer une typologie d'aléa HGM existant dans les PCE du Bas-Saint-Laurent. La proposition d'aléa HGM établie à cet effet résulte d'une approche qualitative suivant les recommandations du MSP portant sur l'identification et la caractérisation des

aléas (MSP, s. d.). Cette proposition de typologie passe avant tout par la reconnaissance des formes fluviales associées à une gamme de processus HGM. La reconnaissance des formes fluviales et des processus HGM a été réalisée à partir des données LiDAR, puis validée lors de l'inventaire terrain. Certains processus n'ont pas pu être observés sur le LiDAR, mais la reconnaissance des formes et des sites préidentifiés par les six MRC a permis de réaliser une prospection terrain et d'identifier ces processus HGM. L'analyse et l'interprétation du LiDAR ont consisté à identifier les chenaux multiples qui témoignent de la mobilité du cours d'eau à une période donnée. De plus, les indices tels que l'existence d'une accumulation de sédiments, d'érosion et le peu de végétation le long d'une berge autant sur les images aériennes et sur le terrain ont contribué à valider l'hypothèse selon laquelle cette section du cours d'eau est sujette à des processus actifs. La visite sur le terrain a été impérative dans cette démarche, car elle a contribué à valider les observations du LiDAR et des images aériennes. Cependant, il n'est pas toujours évident d'observer ces indices sur le LiDAR et les images aériennes, surtout dans les zones anthropisées. De ce fait, les sites identifiés au préalable par les six MRC concernées par Constrictor ont participé à la détermination des tronçons de certains PCE qui présentent les indices des processus HGM. Cette approche originale, basée sur la reconnaissance des formes pour aboutir à la détermination des processus HGM, a permis non seulement de constituer une base de données des formes fluviales, d'identifier les potentiels processus HGM auxquels ces formes sont sujettes, mais aussi d'analyser un vaste territoire à partir du LiDAR.

En parallèle de cette méthodologie, une revue de littérature traitant des processus auxquels les différentes formes fluviales identifiées sont sujettes a été réalisée (Buffin-Bélanger et Héту, 2008 ; Lelièvre et al., 2008 ; Kaitna et Huebl, 2013 ; Héту et al., 2016 ; Maltais et al., 2021). Cette revue de littérature a permis de comprendre le fonctionnement de ces processus, d'identifier certains facteurs (facteurs aggravants naturels et anthropiques) capables d'exacerber ces processus, mais aussi a été un choix de critère pour la sélection des bassins versants pilotes. Il ressort de ces informations une proposition de typologie d'aléas HGM présentée dans la section résultat. Cette typologie est une synthèse d'aléas HGM soutenue par la littérature et les observations réalisées.

## **2.3 CARACTERISATION DES ALEAS HGM DANS LES PETITS COURS D'EAU**

La caractérisation des aléas a été réalisée selon la forme fluviale, et elle comporte deux étapes. La première étape vise à cartographier les formes fluviales (cône alluvial et plaine d'inondation), suivie d'une première phase terrain sur les sites identifiés par les MRC. Cette première phase terrain a pour objectif de valider les cônes alluviaux cartographiés. La seconde étape consiste à évaluer l'intensité des aléas et comprend deux parties : (1) la simulation des aléas sur les cônes alluviaux et la plaine d'inondation à partir de l'outil ExZeco (Pons, 2010) et, (2) la détermination des paramètres morphométriques, notamment le coefficient de Melton et la puissance spécifique. Une seconde phase terrain a été effectuée à l'issue de la simulation des aléas à partir d'ExZeco dans l'objectif de valider les résultats. Chaque étape de la caractérisation est explicitement détaillée dans les prochains paragraphes.

### **2.3.1 Cartographie des formes fluviales**

L'élaboration de la cartographie des cônes alluviaux a suscité l'utilisation de plusieurs données notamment : le LiDAR (MNT) de résolution 1 m datant de 2021 du (ministère des ressources naturelles et des forêts (MRNF), le réseau hydrique de la GRHQ (Géobase du réseau hydrographique du Québec), la mosaïque d'orthophotographies aériennes de l'inventaire écoforestier du Québec méridional du MRNF, les lits d'écoulements potentiels du MRNF et les limites administratives de la BDGA (Base de données géographiques et administratives). La cartographie des plaines d'inondations des cours d'eau et de leurs tributaires dans les bassins versants pilotes a été réalisée par le biais de l'outil Geomorphon landform (Stepinski et Jasiewicz, 2012).

#### **2.3.1.1 Cartographie des cônes alluviaux**

Au même titre que les autres formes alluviales, les cônes alluviaux peuvent subir des transformations dans le temps par l'action érosive d'agents morphogènes plus ou moins

naturels (végétalisation, anthropisation, perturbation des processus hydrosédimentaires) qui finissent par les rendre moins visibles (Maltais et al., 2021). La cartographie des cônes alluviaux s'est faite manuellement par l'interprétation du LiDAR et a suscité la superposition des différentes couches citées précédemment. Un ajustement symbologique du MNT basé sur l'affichage des courbes de niveau permet de mettre en relief la forme en éventail associée aux cônes alluviaux (figure 15). Cette cartographie a été réalisée à l'échelle régionale en vue de constituer une base de données. La vectorisation des polygones des cônes a ainsi été réalisée dans le logiciel SIG ArcGIS version 10.6 avant d'être analysée dans le logiciel SIG ArcGIS Pro ; logiciel sur lequel le reste de l'étude a été effectuée.

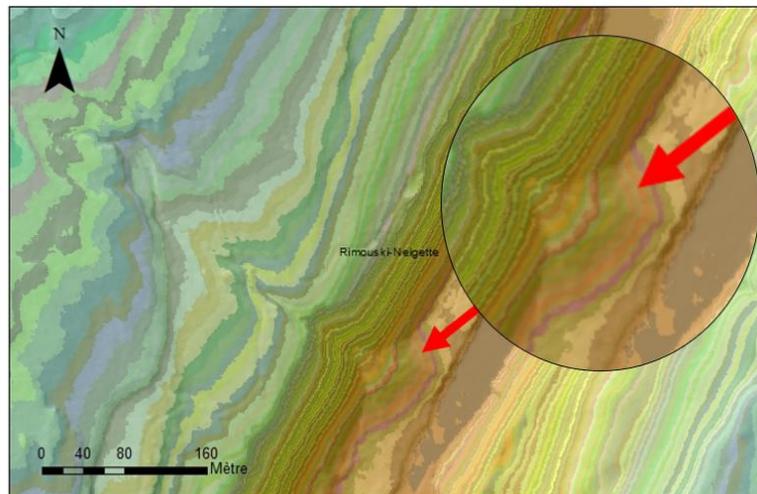


Figure 15. Identification d'un cône alluvial par ajustement symbologique et mis en exergue des courbes de niveau.

### 2.3.1.2 Cartographie des plaines d'inondations dans les cours d'eau principaux et leurs tributaires

La cartographie de la plaine d'inondation s'est effectuée avec l'outil Geomorphon landform intégré dans la boîte à outils du logiciel SIG ArcGIS PRO (Stepinski et Jasiewicz, 2012). Geomorphon landform est un outil doté d'une fonction qualitative qui classe les formes du relief en dix unités du paysage, notamment la vallée et le chenal dénommé dépression dans l'outil. Les deux unités du paysage qui font l'objet de cette étude occupent

respectivement la 9<sup>e</sup> et la 10<sup>e</sup> place dans la classification et sont représentées par les couleurs bleu et noir (figure 16). Deux étapes sont à considérer dans l'utilisation de cet outil, la délimitation du fond de vallée à partir des paramètres (*search distance* et *skip distance*), et l'extraction du fond de vallée à partir d'outil de traitement et d'édition intégré dans l'interface SIG notamment ArcGIS PRO. En ce qui concerne la délimitation à partir des principaux paramètres d'utilisation *search*, *distance* et le *skip distance* (figure 17), le choix de ces paramètres s'est fait systématiquement en appliquant plusieurs valeurs. Le critère de choix du paramètre idéal a été la délimitation du premier talus et/ou la non-considération des fossés de drainage comme fond de vallée surtout en milieu agricole, un lissage optimal de la délimitation (unification et moins de présence de zone pixélisée). Le *search distance* cible la zone à délimiter et plus sa valeur est grande, plus l'étendue de recherche s'amplifie pour une reconnaissance de la forme du paysage souhaité. Dans le même temps, il peut omettre le paysage recherché. Les paramètres de *search distance* peuvent différer d'une zone à une autre. Cette différence peut être observée dans un milieu agricole, un milieu forestier et un cours d'eau linéarisé. En effet, dans une zone agricole plus le *search distance* est grand, plus il aura tendance à identifier les fossés de drainage, ce qui va complexifier l'extraction et l'unification du polygone de sortie du fond de vallée. Dans un cours d'eau incisé, le *search distance* doit être plus grand, car il aura tendance à sous-estimer le fond de vallée et ne se limiter qu'au chenal. Dans ce cas de figure, il est possible de ne pas avoir une délimitation parfaite, il faudra éditer manuellement le polygone de fond de vallée après son extraction. Des valeurs distinctes du *search distance* peuvent être appliquées au sein d'un même bassin versant. Cette méthode est appliquée lorsque la largeur du fond de vallée du bassin versant varie considérablement de l'amont vers l'aval. Comme exemple, dans un cours d'eau dont la section en aval a une largeur de fond de vallée de 164 m et la section en amont a une largeur de 61 m, on constate que la section aval fait plus de 2 fois la section amont. Dans ce cas, deux valeurs de *search distance* peuvent être appliquées dans les deux sections du cours d'eau. En ce qui concerne le *skip distance*, il est possible d'utiliser une même valeur quelle que soit l'hétérogénéité morphologique du cours d'eau à l'échelle du bassin versant. Le paramètre *skip distance* permet d'affiner l'unité du paysage délimité, et de réduire le bruit des cellules

voisines. Les paramètres de *search distance* utilisés dans les quatre bassins versants pilotes sont consignés dans le tableau 2. Une fois le fond de vallée délimité par les paramètres fixés selon l'utilisateur, l'étape de l'extraction du polygone se fera via les outils *spatial analyst* d'ArcGIS. Les unités du paysage à extraire sont classifiées, puis converties en polygone. Par la suite, d'autres outils d'ArcGIS ont été utilisés pour affiner le polygone et l'exporter.

Tableau 2

Paramètres utilisés pour la délimitation du fond de vallée dans les bassins versants étudiés dans l'outil Geomorphon landform

	Rivière Hâtée	Rivière Centrale	Rivière Rouge	Ruisseau Johnson
Search distance (m)	2000	1000	2 500 (Aval) 250 (Amont)	200

Ce tableau présente les différents paramètres utilisés dans chaque bassin versant. La valeur du *skip distance* est identique dans chaque bassin versant et sa valeur est 10. En revanche, les valeurs de *search distance* qui ont été appliquées sont distinctes. Cette variabilité est due à la variabilité morphologique rencontrée dans chaque bassin versant. Dans la rivière Rouge, deux valeurs de *search distance* ont été appliquées en raison d'une plus grande variabilité morphologique du fond de vallée de l'amont vers l'aval. Cette variabilité a conduit à une segmentation en tronçon homogène de son fond de vallée.

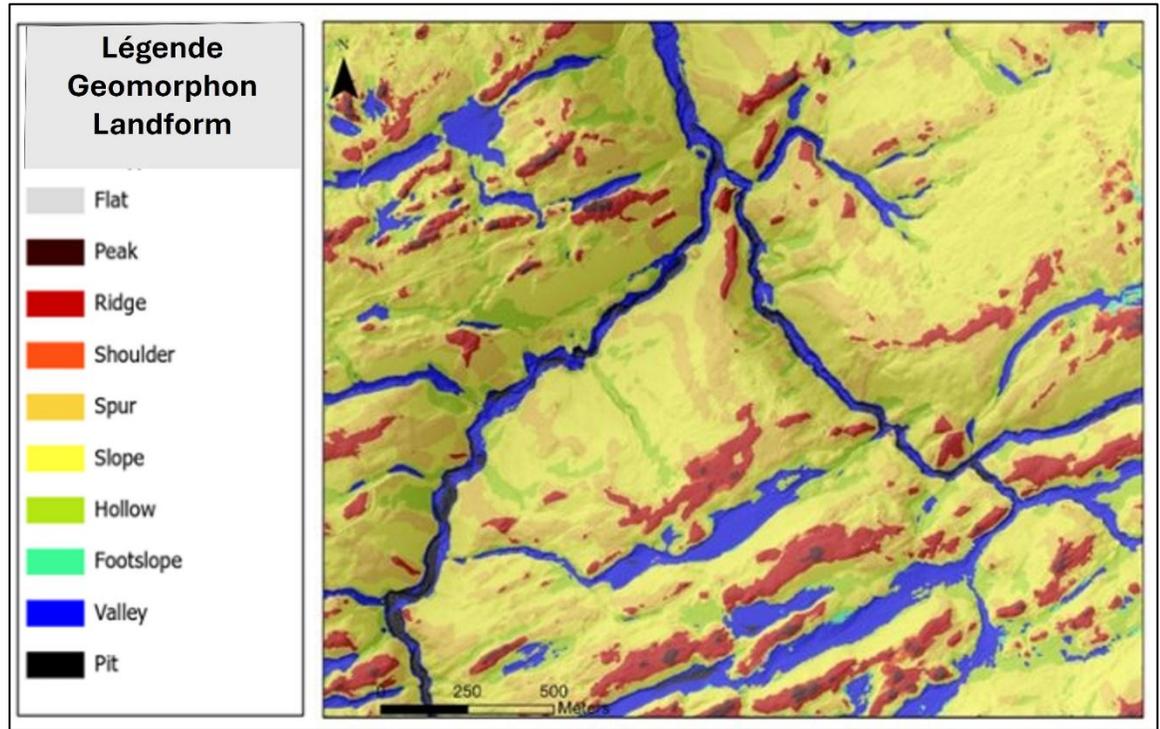


Figure 16. Délimitation du fond de vallée en bleu après application de l'outil Geomorphon landform dans le bassin versant du ruisseau Johnson.

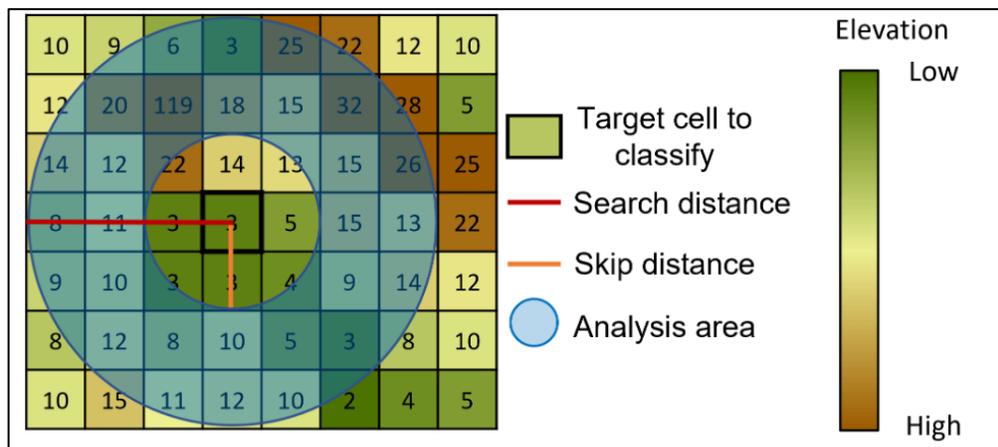


Figure 17. Étendue de recherche des paramètres *search distance* et *skip distance*.

D'autres outils sont disponibles pour réaliser la cartographie du fond de vallée, voir le tableau 3. Cependant, ces derniers présentent certains inconvénients qui ont orienté notre choix vers l'outil Geomorphon landform.

Tableau 3  
Exemple d'outils d'extraction automatique de fond de vallée

<b>Outils</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Valley Bottom (Roux et al., 2015)	Délimiter et extraire automatiquement le fond de vallée Outil facile à utiliser Application à large échelle	Fonctionne uniquement sur la version ArcGIS 10.6 Non applicable sur ArcGIS PRO
Méthode de ZI H-Fixe (Frini et al., 2019)	Délimiter et extraire automatiquement le fond de vallée Application à large échelle	Utilisation complexe Incertitude élevée Moins adapté au contexte agricole
IHT (Indice d'humidité topographique) (MELCCFP, 2021)	Délimiter automatiquement le fond de vallée Application à large échelle Mise en relief des zones humides	Délimitation peu précise Moins adapté en contexte agricole Extraction du fond de vallée exige plusieurs étapes à réaliser

### 2.3.2 Caractérisation de l'intensité des aléas

L'évaluation de l'intensité des aléas a été réalisée en deux étapes : l'application de l'outil ExZeco et la détermination des paramètres morphométriques.

### 2.3.2.1 Description du protocole ExZeco

Le protocole ExZeco a été développé en France par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) pour extraire les zones sujettes aux inondations par ruissellement. Depuis lors, c'est un outil qui a été utilisé dans de nombreux contextes autres que sa fonction principale. Au Québec, l'outil a été testé pour la détection, l'identification des zones actives, la prédiction des corridors fluviaux d'avulsion sur les cônes alluviaux (Massé et al., 2020 ; Maltais et al., 2021 ; Pruneau, 2022) et la délimitation de l'espace de mobilité dans un delta (Massé et al., 2020). C'est un outil qui permet de réaliser une analyse préliminaire du risque (Maltais et al., 2021). Dans ce projet, il est utilisé sur les cônes alluviaux et dans les plaines des cours d'eau. De plus, il a servi à estimer la largeur du chenal dans chaque bassin versant. Le fonctionnement du protocole ExZeco (extraction de zones d'écoulement) est basé sur un processus itératif qui a été codé dans ArcGIS Model Builder (figure 18). Le nombre d'itérations est fixé à 1 000, car à ce stade il apparaît une surface potentiellement inondable. La chaîne d'opération comporte deux entrées. La première est un point de départ en format matriciel qui correspond à l'endroit où débute la trajectoire de l'écoulement. La seconde est le MNT de la zone d'étude. Ce dernier doit être préalablement brêché ou corrigé (retrait des ponts et ponceaux). Les ponts et ponceaux ont été identifiés et vectorisés manuellement, puis à l'aide d'un model builder inspiré de la méthodologie du laboratoire d'hydrologie forestière de l'Université Laval, les ponts et ponceaux ont été retirés automatiquement du MNT (S. Jutras, comm. pers., 2020). La chaîne d'opération d'ExZeco vise à altérer le MNT en lui imposant des valeurs de hauteur topographique définie par son utilisateur à partir de l'outil *raster to calculator*. Cette opération appelée également bruitage du MNT a pour but de modifier la topographie de celui-ci. Par défaut, la valeur du bruitage du MNT est comprise entre 0 et 1 m. Il en résulte un nouveau MNT avec des valeurs de pixel imposées. Ensuite, à l'aide de l'algorithme de direction de flux, un réseau de drainage sera calculé. Cela suscite au préalable le remplissage des dépressions présentes sur le MNT avec l'outil Fill et la trajectoire de l'écoulement est ensuite déterminée par les outils Flow direction et Flow accumulation. Le processus est

répété à 1 000 reprises et il en résulte 1 000 lignes d'écoulement qui indiquent des endroits potentiels où l'écoulement de la rivière pourrait se faire. L'emprise probable d'inondation apparaît à la suite des 1 000 lignes simulées (Pons et al., 2020).

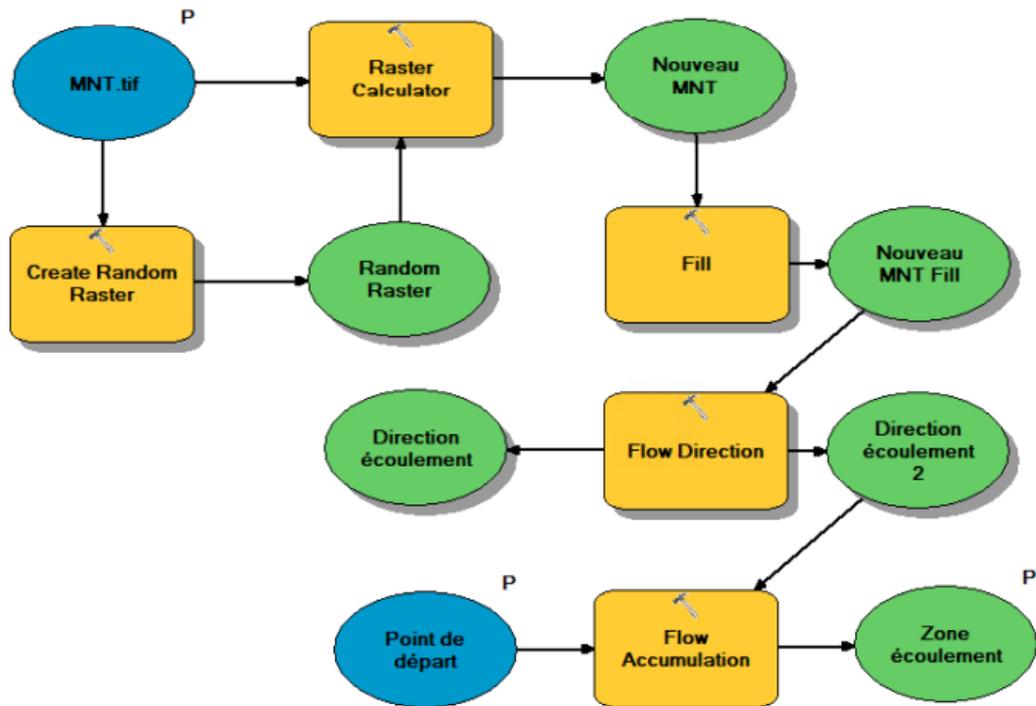


Figure 18. Chaîne d'exécution du protocole ExZeco. © Inspiré de Pons, 2010.

Le bleu représente les entrées du modèle, le jaune représente les traitements et le vert représente les résultats issus des traitements. Le « P » sur les intrants représente les paramètres fixés pour le processus d'itération de la méthode.

### 2.3.2.2 Applicabilité d'ExZeco sur les cônes alluviaux

ExZeco peut être utilisé dans plusieurs contextes, notamment pour la détermination probable des corridors d'avulsions sur les cônes alluviaux. Dans le cadre de ce projet, il a contribué à déterminer la surface probable d'expansion des flux à partir des corridors

d'avulsions. Pour ce faire, les variations de hauteur imposées dans la chaîne d'opération d'ExZeco sont 1 et 2 m. Ces choix permettront d'évaluer et de cartographier des niveaux de risque distincts. L'utilisation de la valeur topographique de 1 m constitue une valeur fortement recommandée, car efficace pour la détection des cônes et le fonctionnement du protocole ExZeco (Maltais et al., 2021). La valeur de 2 m quant à elle est suffisante pour évaluer l'étendue et l'ampleur de l'activité torrentielle. Ils ont été appliqués sur les cônes alluviaux cartographiés dans le bassin de la rivière Hâtée et le bassin versant du ruisseau Johnson. En résumé, deux séries de simulations ont été effectuées sur chaque cône alluvial. Une première série de simulations en amont de chaque cours d'eau principal des cônes a été effectuée pour une hauteur de 1 m et une seconde série de simulations pour une hauteur de 2 m. Le point de départ a été localisé à une distance minimale de 1 000 m de l'apex du cône présent sur chacun des bassins versants. Dans l'objectif d'optimiser le traitement et faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats, les 1 000 rasters en sortie ont été compilés dans un seul fichier vectoriel. Il en résulte deux fichiers vectoriels (bruit aléatoire de 1 m et de 2 m) pour chaque cône alluvial présent sur les bassins versants. Par ailleurs, en vue d'une validation des prédictions du résultat ExZeco, ce dernier a été appliqué sur un cône alluvial en processus de restauration passive dans la MRC les Basques.

Le cône de la Neigette, localisé dans la MRC Les Basques, est réputé pour son fort dynamisme et a subi plusieurs aménagements dans le passé, dont la mise en place d'une digue le long de sa rive gauche et droite. Aujourd'hui, cependant, il subit un processus de restauration passive qui a pour but de laisser le cours d'eau trouver son équilibre sans aucune intervention (Delorme et Gariépy-Girouard, 2024). Cette action a favorisé la création de deux brèches dans la digue en rive droite du cône. L'application d'ExZeco sur ce cône a pour but de prédire les trajectoires potentielles que pourrait prendre l'écoulement dans l'avenir qui seront observées par la suite sur le site. Les résultats de cette validation sont présentés dans la section résultat.

### 2.3.2.3 Applicabilité d'ExZeco dans les plaines d'inondations des PCE

Les plaines d'inondations représentent le siège de mobilité des cours d'eau. Elles offrent pour certains cours d'eau un large spectre de déplacement du chenal limitant ainsi le contact versant-chenal. Jusqu'à ce jour, aucun outil n'est disponible pour cartographier la mobilité des processus fluviaux dans les PCE (Massé et al., 2020). Ainsi, ExZeco a été appliqué dans les plaines d'inondations des cours d'eau principaux et de leurs tributaires des quatre bassins versants pilotes. Cette approche est une première au Québec, et elle a pour but d'évaluer la performance d'ExZeco dans les plaines des PCE. L'application d'ExZeco dans les plaines d'inondations a pour but d'estimer les trajectoires probables de mobilité dans les PCE. Les questions que l'on se pose sont : est-il possible d'observer une probable mobilité du cours d'eau, notamment le recouplement de méandre et la migration latérale ? Aussi, dans un contexte d'une analyse préliminaire du risque, y a-t-il des enjeux exposés à cette mobilité potentielle ? La hauteur de simulation fixée dans les plaines d'inondations des PCE est de 1 m en raison de l'exigence de l'outil dans le traitement des données à l'échelle d'un bassin versant, aussi en raison de la première application du protocole ExZeco dans les plaines qui demeure une phase d'essai. Le point de départ de la simulation se situe en amont des cours d'eau principaux et de leurs tributaires cartographiés. Au vu de l'exigence de traitement de l'outil, les 1 000 fichiers en sortie de chaque bassin versant ont été assemblés en un seul fichier vectoriel. En somme, on obtient quatre fichiers vectoriels en raison d'un fichier par bassin versant.

### 2.3.2.4 Détermination des indices et paramètres morphométriques

La détermination de l'étendue et l'intensité de l'aléa se sont basées sur l'estimation d'indices et de paramètres morphométriques. Il s'agit du coefficient de Melton, l'indice de confinement et la puissance spécifique. De nombreuses études ( Jackson et al., 1987; Wilford et al., 2004 ; Fryirs et al., 2016; Bertrand et al., 2017; Yoshun et al., 2017 ; Sholtes et al., 2018 ; Biron et al., 2020), ont montré la pertinence de ces indices et paramètres comme outil de prédiction de l'intensité des processus associés à la dynamique des cours d'eau. Pour ce

faire, certains cours d'eau ont été segmentés en tronçons homogènes. Les cours d'eau concernés par la segmentation sont la Branche Hâtée (cours d'eau principal du bassin versant de la rivière Hâtée) et la rivière Rouge (cours d'eau principal du bassin versant de la rivière Rouge). Le critère de découpage en sections homogènes a été la variation de la largeur de la vallée, la configuration du chenal ou la confluence avec un tributaire (Biron et al., 2020). Au total, deux tronçons ont été déterminés dans la rivière Rouge (Tr. R1 et Tr. R2) et quatre tronçons (Tr.H1 ; Tr.H2 ; Tr.H3 et Tr.H4) dans la rivière principale Branche Hâtée. La puissance spécifique, l'indice de confinement et le coefficient de Melton ont été déterminés dans chaque tronçon de cours d'eau segmenté et les tributaires.

Le coefficient de Melton a pour but de différencier les activités torrentielles des cônes alluviaux à l'échelle du bassin versant. Il se définit par l'équation 1 :

$$M = (Z_{\max} - Z_{\min}) / A^{1/2} \quad (1)$$

Avec  $Z_{\max}$  et  $Z_{\min}$  qui sont respectivement l'altitude maximale et l'altitude à l'exutoire du bassin versant et  $A$  l'aire drainée. Les études menées par Jackson et al. (1987) dans le sud des montagnes Rocheuses canadiennes aboutissent à des seuils de Melton pour caractériser les bassins versants. On distingue donc deux seuils, celui des bassins versants sujets aux crues avec Melton  $< 0,3$  et les bassins versants sujets aux activités de coulées de débris avec Melton  $> 0,3$ . L'approche adoptée dans ce projet a consisté à déterminer le coefficient de Melton sur les cônes alluviaux cartographiés dans le Bas-Saint-Laurent. Ceci a pour but d'avoir un portrait général des activités torrentielles auxquelles les cônes de la région sont sujets en plus des cinq cônes localisés dans les bassins versants pilotes de la rivière Hâtée et du ruisseau Johnson.

L'indice de confinement : Il existe plusieurs indicateurs pour exprimer le confinement, notamment le degré de confinement (Brierley et Fryirs, 2005) et l'indice de confinement (Rinaldi et al., 2013 ; Sholtes et al., 2018). Pour Fryirs et al. (2016), le confinement renvoie au pourcentage de la longueur d'une portion du chenal qui est juxtaposée à une marge de confinement. Cette marge de confinement peut être la marge de vallée, la marge de fond de vallée ou une marge anthropique. Dans ce contexte d'analyse, il est possible d'identifier le type de contrainte exercée sur le cours d'eau. En revanche, l'indice

de confinement selon Sholtes et al. (2018) se définit comme étant le rapport de la largeur du fond de vallée par la largeur du chenal. En tenant compte de la forte importance géomorphologique de l'indice de confinement mis en exergue par Mazgareanu et al. (2020), ce projet d'étude s'est basé sur cette approche afin d'évaluer l'intensité des processus HGM. De plus, la combinaison de l'indice de confinement et de la puissance spécifique apparaît comme une approche maîtresse dans la compréhension du processus d'érosion et de dépôt de sédiments le long du cours d'eau (Mazgareanu et al., 2020). L'indice de confinement se définit donc selon l'équation 2 suivante :

$$IC = W_v/W_{ce} \quad (2)$$

Où IC représente l'indice de confinement,  $W_v$  est la largeur du fond de vallée et  $W_{ce}$  la largeur du chenal. Pour les cours d'eau confinés,  $IC \leq 3$ , pour ceux partiellement confinés

$3 < IC \leq 7$  et  $IC > 7$  pour ceux non confinés.

Les valeurs de largeur du chenal ont été estimées après leurs numérisations. Les couches ayant servi à la numérisation sont des rasters Hillshade générés et la couche d'ExZeco à 1 m de hauteur. La numérisation s'est faite dans le logiciel SIG ArcGIS PRO à une échelle comprise entre 1 : 750 et 1 : 1 250. Seuls les contours du chenal principal ont été numérisés afin d'éviter les zones d'hétérogénéité pouvant influencer l'interprétation des limites numérisées. Ces zones d'hétérogénéité sont l'avulsion et le recoupement de méandre. Des transects transversaux équidistants de 50 m ont été générés le long des tronçons au moyen de l'outil SIG *Transect Tools* intégré dans le logiciel ArcGIS PRO (Delisle, 2020). Un minimum de 5 valeurs a été utilisé pour déterminer les largeurs moyennes de fond de vallée et du chenal des tributaires en raison de leur longueur de tronçons issus de la cartographie effectuée, et un minimum de 15 valeurs a été utilisé pour déterminer la largeur moyenne de fond de vallée et chenal des cours d'eau principaux. La longueur de chaque tronçon étudié a été définie selon les longueurs de fond de vallée qui ont été extraites automatiquement.

La puissance spécifique du cours d'eau a été déterminée selon l'équation 3 suivante :

$$\omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \frac{S}{w} \quad (3)$$

$\omega$  représente la puissance spécifique ( $W/m^2$ ),  $\rho$  la densité de l'eau ( $1\,000\text{ kg/m}^3$ ),  $g$  l'accélération due à la gravité ( $9,8\text{ m/s}^2$ ),  $Q$ = débit plein bord ( $m^3/s$ ),  $S$  pente du cours d'eau ( $m/m$ ),  $w$  la largeur de cours d'eau ( $m$ ). Le débit plein bord a été déterminé selon la formule suivante :

$$Q_{pb} = 0,31 Ad^{0,83} \quad (4)$$

où  $Ad$  correspond à l'aire de drainage (Dubé, 2006)

Les pentes moyennes des cours d'eau ont été estimées à partir de l'outil développé par Biron et al. (2013a). L'outil permet d'obtenir une valeur ponctuelle sur une distance fixée par l'utilisateur à partir d'un linéaire de cours d'eau généré. Une moyenne des valeurs est réalisée dans les tronçons du cours d'eau. L'interprétation des puissances déterminées est basée sur le seuil de classification de puissance spécifique issu de Brookes (1988) (figure 19).

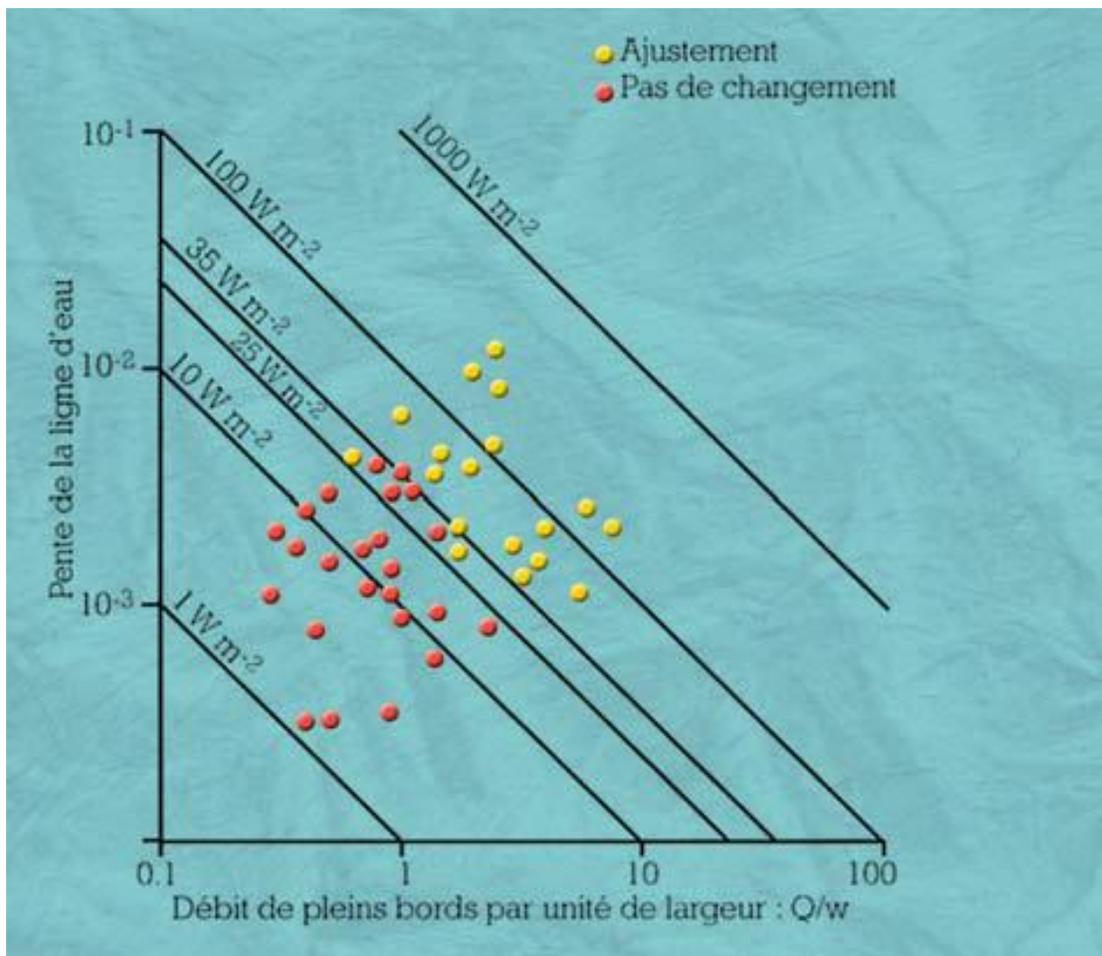


Figure 19. Seuil de classification de puissance spécifique. © Brookes, 1988 in

Wasson et al., 1995

Les travaux de Brookes (1988) ont été effectués sur des cours d'eau à lit de sédiment sableux. Ces seuils ont été appliqués en contexte québécois (Guillou, 2012 ; Dugré, 2019 ; Biron et al., 2020). La classification de Brookes (1988) identifie deux seuils de puissance spécifique, un seuil majeur à partir de  $35 \text{ W/m}^2$  au-dessus duquel le cours d'eau a la possibilité de se réajuster en érodant les berges, puis un seuil mineur de  $25 \text{ W/m}^2$  en dessous duquel on n'observe pas d'érosion. L'objectif de ce projet est de se baser sur cette classification afin d'estimer le pouvoir érosif des cours d'eau à l'étude et l'intensité des processus HGM pouvant résulter de ce pouvoir érosif.

### **2.3.3 Caractérisation et validation terrain**

#### **2.3.3.1 Caractérisation terrain**

La caractérisation terrain s'est faite en deux périodes. La première s'est déroulée à l'été 2022 à la suite de la réalisation de la cartographie des cônes alluviaux à l'échelle régionale. La seconde s'est déroulée à l'automne 2023. La première phase terrain appelée phase d'observation et de prospection avait pour but d'effectuer une prospection morphologique sur le terrain. Cette prospection a été basée sur l'observation du dynamisme de certains cours d'eau. Elle a aussi servi à identifier des indices de facteurs aggravants potentiels. Les indices de repères étaient nécessairement la présence du cours d'eau, la granulométrie, des ouvrages anthropiques (digues ou autres signes de restaurations du cours d'eau), des barrages de castors. Le terrain s'est déroulé dans plusieurs sites qui avaient été identifiés par les MRC associées au projet Constrictor. Des photos ont été prises à l'issue de ce terrain. Aucune donnée n'a été récoltée en dehors des photos. La seconde phase de terrain a été réalisée dans les quatre bassins versants pilotes et sur le cône en processus de restauration passive pour la validation d'ExZeco. Ce terrain avait pour but de documenter l'environnement des sites en incluant l'utilisation du sol par les activités humaines.

### 2.3.3.2 Validation terrain

La validation terrain a été réalisée lors des deux périodes de caractérisation de terrain mentionnée précédemment. Elle a concerné, la validation des cônes alluviaux cartographiés à l'échelle régionale et la validation des résultats d'ExZeco ainsi que des enjeux exposés. L'identification du cours d'eau, des chenaux abandonnés, des signes d'érosion et la granulométrie ont permis de valider les cônes alluviaux cartographiés.

La validation des résultats issus d'ExZeco avait pour but de comprendre et de documenter les conditions préexistantes et les évènements qui pourraient expliquer les résultats prédits par l'outil. Elle a concerné la caractérisation et la validation des ponts et ponceaux qui ont été corrigés sur le LiDAR. Ensuite, il s'agissait de valider les trajectoires probables de l'écoulement de l'outil ExZeco. Enfin, d'identifier et de valider la position des enjeux (bâtiments, routes, terres agricoles) exposés à l'aléa probable issu d'ExZeco.

## 2.4 EVALUATION DE L'EXPOSITION DES ENJEUX

La méthodologie utilisée en vue de l'évaluation de l'exposition des enjeux exposés est inspirée de la méthode de croisement du projet EPRI (Benacchio et al., 2022). Cette méthode vise dans un premier temps à extraire d'une base de données les enjeux exposés et dans un second temps, de croiser ces données avec l'aléa via l'interface d'un outil SIG (figure 20).

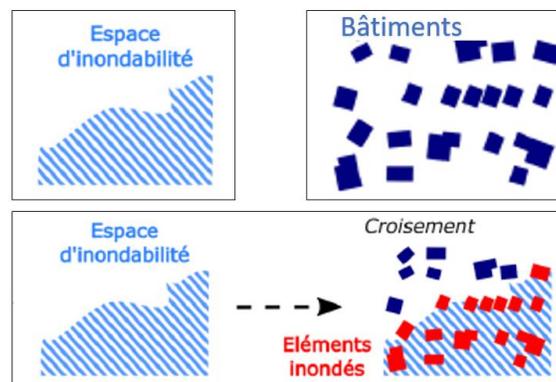


Figure 20. Principe de croisement de l'EPRI. © Benacchio et al., 2022

L'évaluation préliminaire du risque ainsi réalisée tient compte uniquement de l'étendue, l'intensité de l'aléa et de la position de l'enjeu par rapport à l'aléa. Les données utilisées pour la réalisation de cette étape sont AQGéobati, AQRéseau, et la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD) (voir tableau 4). En parallèle de ces données, les empreintes des bâtiments (polygone des bâtiments) et la mosaïque d'orthophotographies aériennes de l'inventaire écoforestier du Québec méridional du MRNF ont permis de réaliser respectivement la cartographie de l'occupation du sol par les enjeux et la cartographie des enjeux exposés (croisement entre l'aléa et la position des enjeux). Les enjeux identifiés ont été validés pendant la seconde phase terrain. Le croisement entre les données d'aléas et des enjeux a été réalisé dans ArcGIS PRO.

Tableau 4  
Présentation des données utilisées pour l'identification des enjeux exposés

Type	Données extraites	Informations supplémentaires recueillies
AQRéseau plus	Réseau routier	Nom de la route
AQGéobati	AQ Adresse	Catégorie de l'adresse (résidence, commerce, institution)
BDPPAD	Polygone des parcelles agricoles	Type de culture

## CHAPITRE 3 RÉSULTATS

### 3.1 TYPOLOGIE DES ALEAS HGM

L'analyse du LiDAR pour l'identification des processus HGM sur les formes cartographiées (cône alluvial, plaine d'inondation), la visite sur le terrain et la revue de littérature ont permis de proposer une liste d'aléas HGM susceptibles de se produire dans les PCE du Bas-Saint-Laurent. Les témoignages de riverains rencontrés lors de la campagne de terrain ont contribué également à l'identification des aléas HGM. Cette liste constitue le premier objectif spécifique du mémoire et présente deux groupes d'aléas HGM, ceux associés à l'inondation et ceux associés à la mobilité (figure 21).

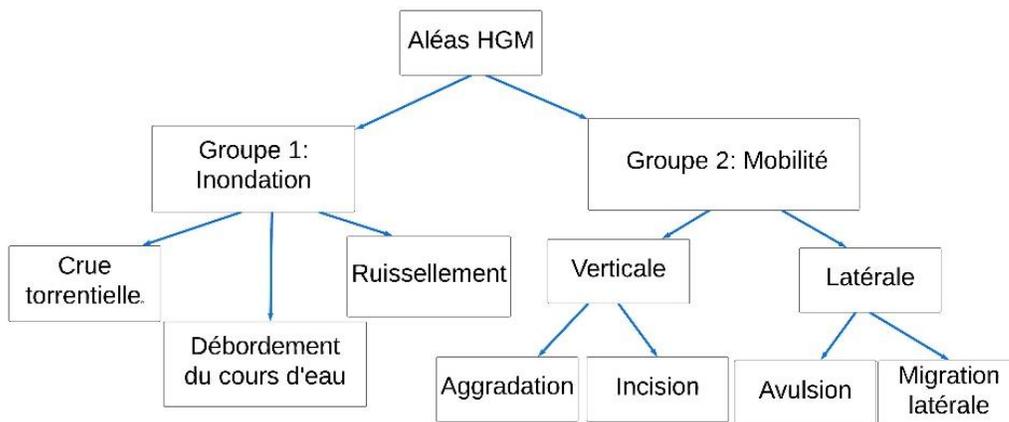


Figure 21. Proposition d'une typologie d'aléa HGM dans les petits cours d'eau du Bas-Saint-Laurent

La typologie d'inondation répertoriée concerne les inondations par débordement, l'inondation par ruissellement et les crues torrentielles. Les figures 22 et 23 présentent respectivement un cas de débordement et une activité torrentielle qui s'est déroulée dans la région. Le débordement survient généralement lorsque le débit excède les capacités d'écoulement du chenal comme le montre le débordement sur la rivière des Bois Brûlé (figure 22). Il est assez difficile d'obtenir une image d'un PCE sujet à l'aléa inondation durant

le cadre d'un projet de maîtrise, car cela demande d'être sur les lieux lorsque l'évènement se produit. L'activité torrentielle sur la figure 23 est matérialisée par la présence d'embâcle de bois dans le chenal, l'érosion de la berge du chenal et du dépôt de sédiments en aval du cours d'eau.



Figure 22. Exemple de débordement dans la rivière des Bois Brûlé survenu en 2008

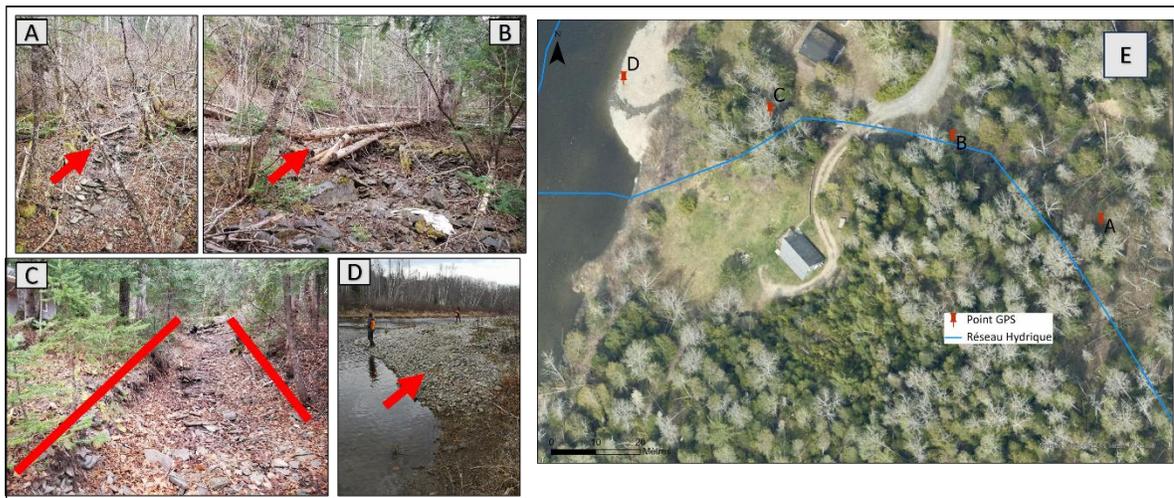


Figure 23. E: Localisation d'un torrent à Rimouski. A, B, C et D présentent des images de l'activité torrentielle survenue. A : Source de l'écoulement, B : Présence d'embâcle dans le chenal, C : Délimitation du chenal et érosion des berges, D : Dépôt de sédiments

Les figures 24, 25 et 26 présentent des cas de mobilité de la seconde catégorie d'aléas HGM proposés dans la typologie. La figure 24 présente un cas de mobilité verticale (incision) observée lors de l'inventaire terrain. Les cas observés sur site se sont déroulés autant dans la plaine que sur un cône alluvial. Des investigations supplémentaires permettraient de comprendre les raisons de ces processus.

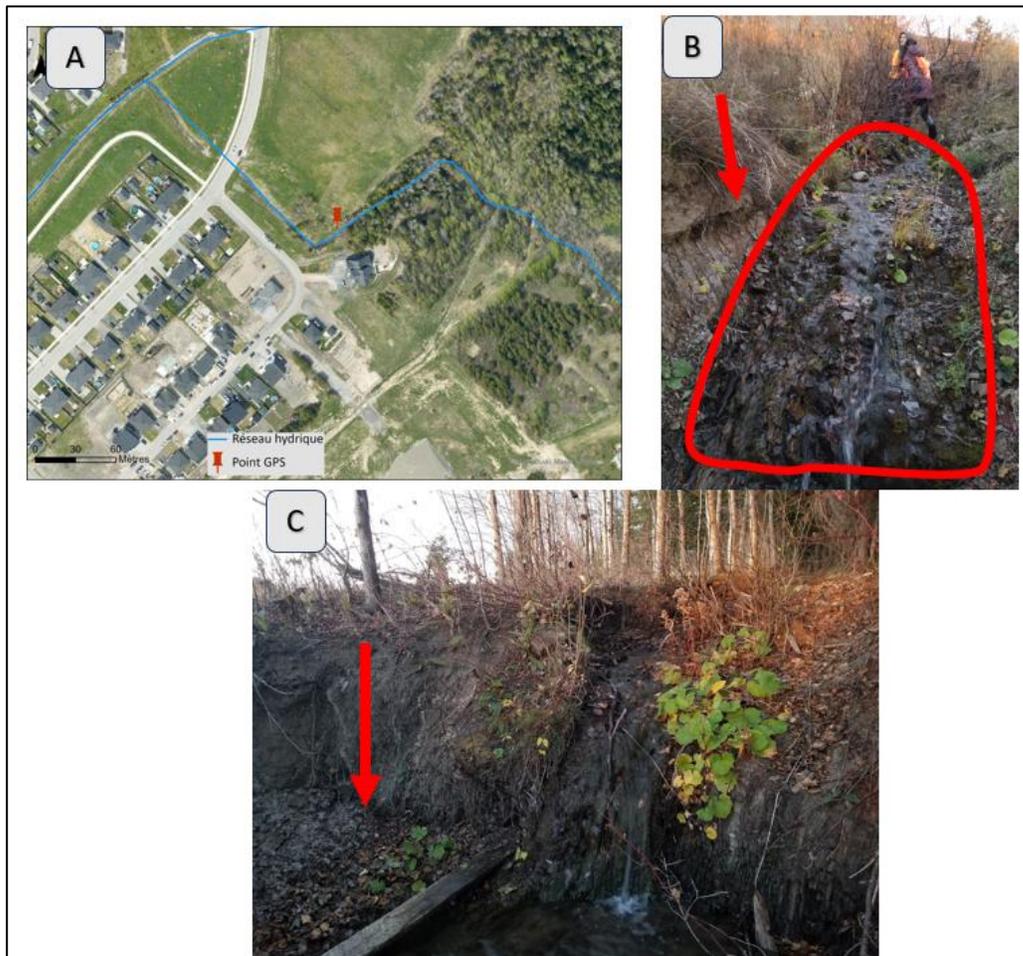


Figure 24. Identification du processus d'incision dans le cours d'eau Branche Xavier-Boucher à Rimouski. A : Localisation du site visité, B et C : Section du cours d'eau incisée

La mobilité latérale implique les processus d'avulsion et de migration latérale. Ces processus survenus dans les cônes alluviaux et les plaines ont été identifiés sur le LiDAR et validés sur site (figures 25 et 26).

La méthodologie appliquée pour l'identification des processus ne renseigne pas sur les conditions dans lesquelles sont survenus ces aléas. Seule une étude approfondie pourrait répondre au mode de mise en place de cette mobilité dans les PCE.

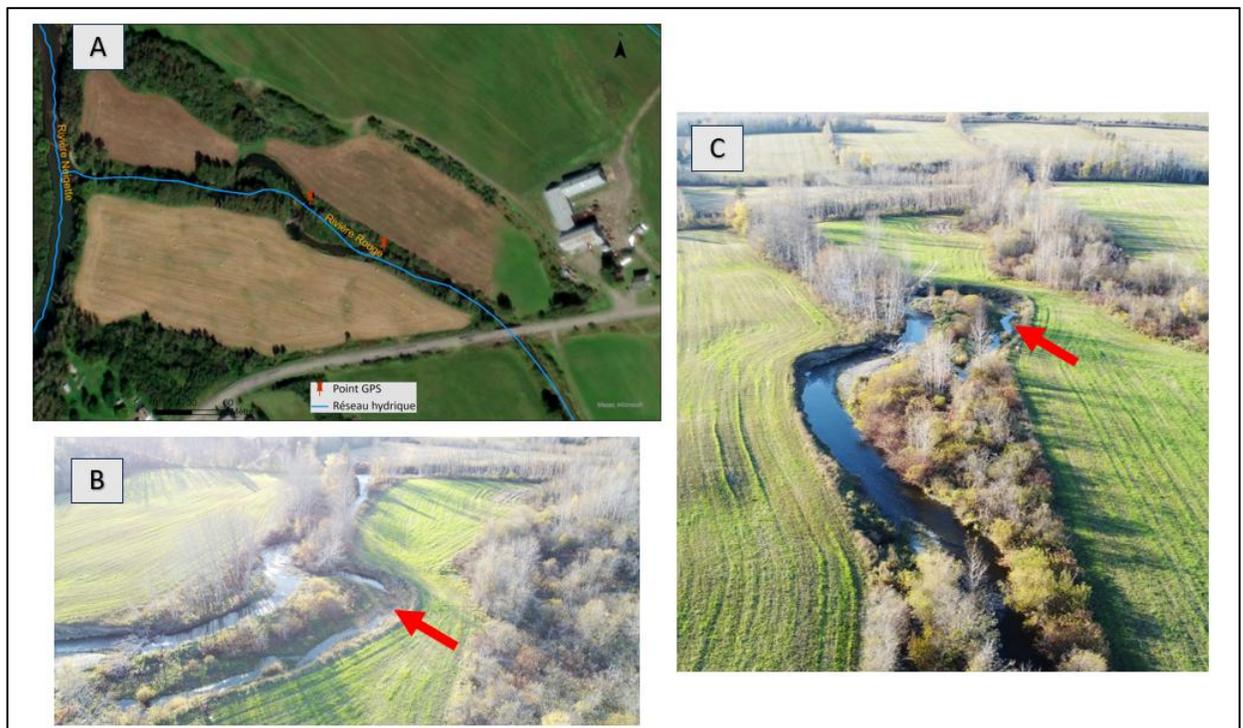


Figure 25. Identification du processus de migration latérale dans la Rivière Rouge située à Saint-Angèle de Merci. A : Localisation du site visité, B et C : Section du cours d'eau sujet au processus de migration latérale

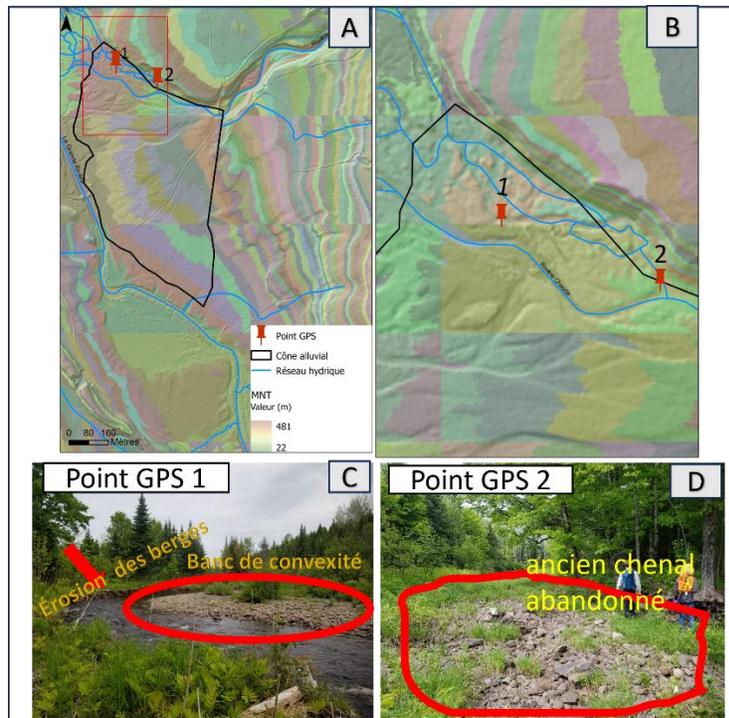


Figure 26. Identification du processus de mobilité à partir du LiDAR sur un cône alluvial où deux points GPS 1 et 2 ont été validés sur le terrain dans la rivière Chaude située dans la MRC Kamouraska. A: Présentation du cône alluvial avec présence de chenaux multiples, B: Zoom sur le site visité et observation d'une avulsion au point GPS2, C: Processus d'érosion et d'accumulation observés au point GPS 1, D: Processus d'avulsion validé par l'observation d'un chenal abandonné au point GPS 2

Des mouvements de masse et de décrochement ont été observés dans certains PCE (figure 27). Ce processus d'érosion observé peut découler d'évènements naturels et/ou anthropiques, toutefois leur existence témoigne du dynamisme de certains PCE du Bas-Saint-Laurent.



Figure 27. Processus d'érosion par mouvement de masse et décrochement dans le ruisseau Levasseur à Rimouski. A : Localisation du site visité, B et C : Section du cours d'eau sujet au processus d'érosion

## 3.2 CARACTERISATION DES ALEAS

### 3.2.1 Cartographie des cônes alluviaux

À l'issue de l'interprétation des relevés LiDAR, 197 cônes alluviaux ont été cartographiés sur l'ensemble du territoire des six MRCs (figure 28). La cartographie révèle que 41 % d'entre eux se trouvent dans la MRC de la Matanie, 29 % dans la MRC de Rimouski-Neigette, 15 % dans la MRC de la Mitis, 7 % dans la MRC Les Basques, 5 % dans la MRC de Kamouraska et 3 % dans la MRC de Rivière-du-Loup. Parmi les cônes cartographiés, cinq d'entre eux sont localisés dans deux bassins versants à l'étude, en raison de quatre cônes

localisés dans le bassin versant de la rivière Hâtée et un cône dans le bassin versant du ruisseau Johnson (figure 29).

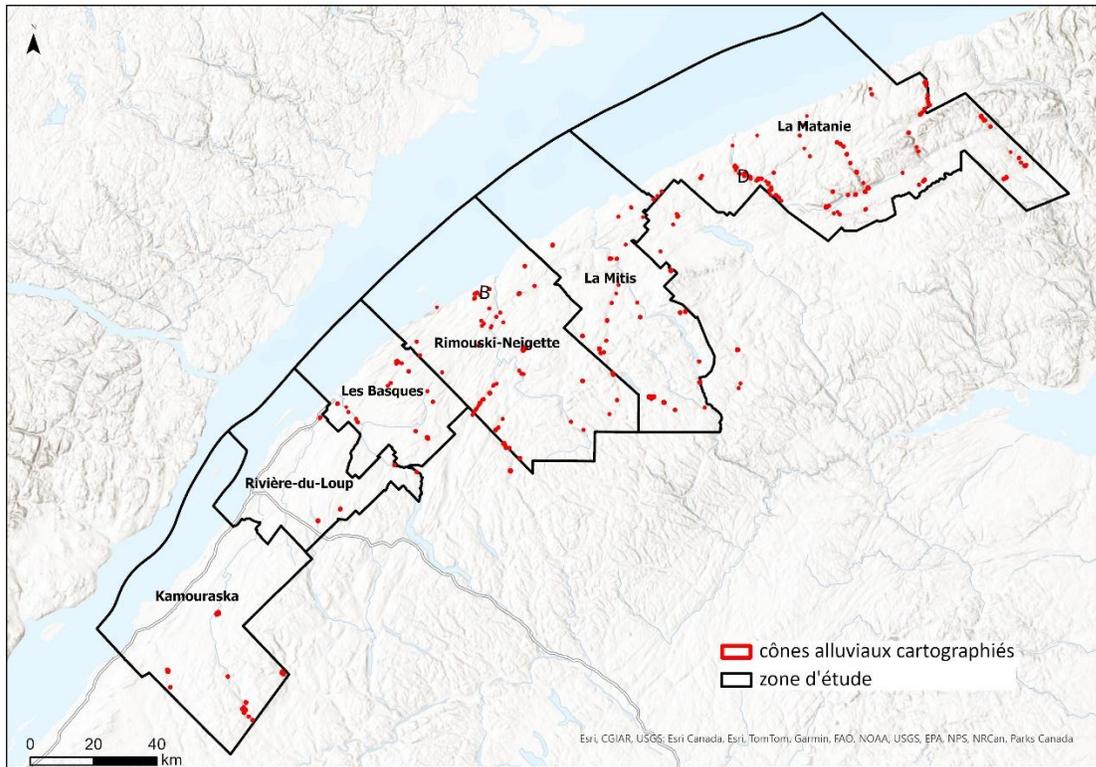


Figure 28. Distribution spatiale des cônes alluviaux dans la région du Bas-Saint-Laurent. Avec B et D représentant les deux bassins versants étudiés où sont localisés les cônes alluviaux.

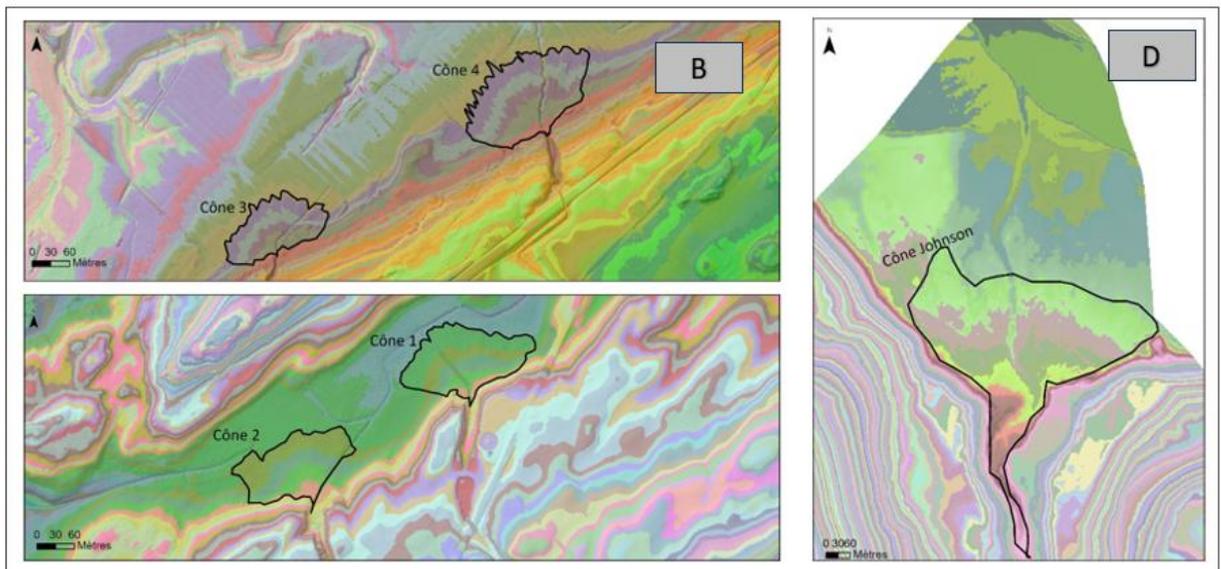


Figure 29. Cartographie des cônes alluviaux par ajustement symbolique du LiDAR. B: Cône alluvial dans le bassin versant de la rivière Hâtée, D: Cône alluvial du Ruisseau Johnson

### 3.2.2 Délimitation et extraction du fond de vallée

L'application de l'outil Geomorphon landform dans les quatre bassins versants a permis de délimiter et extraire le fond de vallée dans les cours d'eau principaux ainsi que leurs tributaires. Les figures 30, 31, 32 et 33 présentent les différentes cartographies de fond de vallée dans chaque bassin versant.

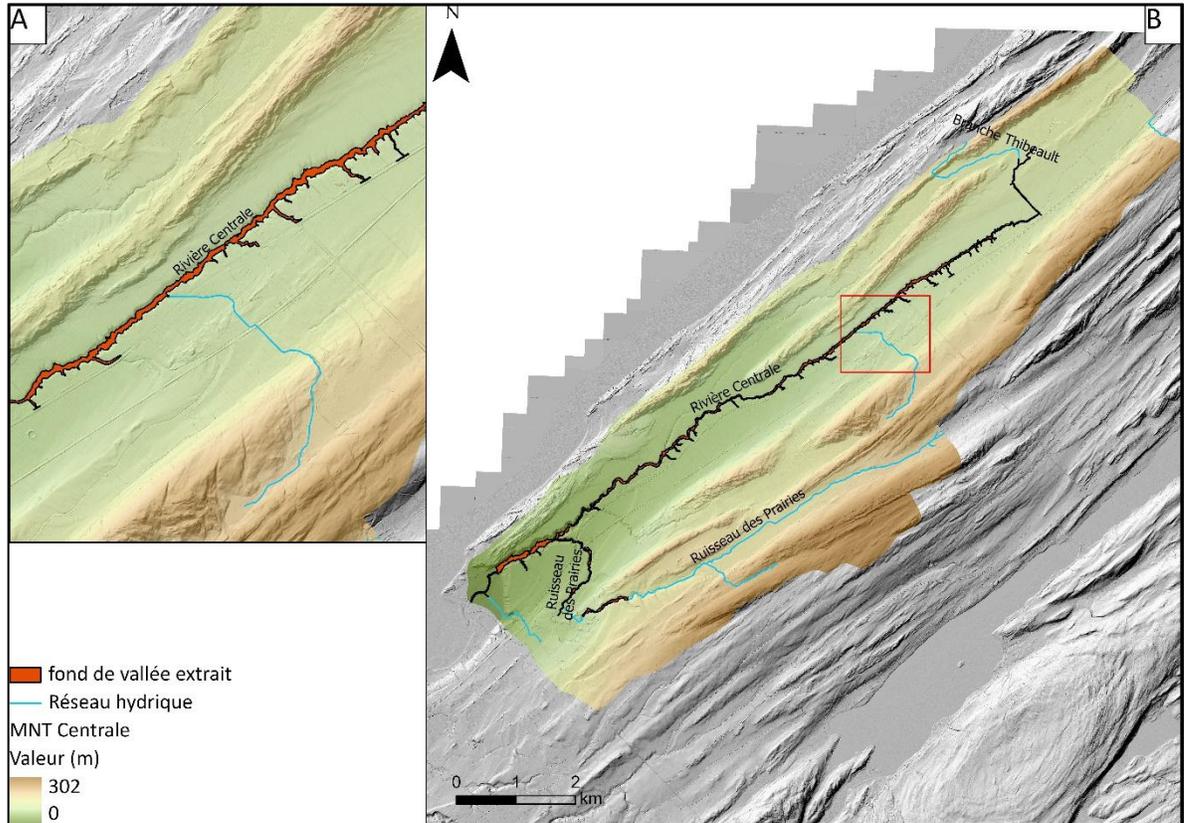


Figure 30. Cartographie du fond de vallée dans le bassin versant de la rivière Centrale. A: Gros plan sur un secteur de fond de vallée extrait, B: Localisation de la zone agrandie dans le bassin versant

La délimitation ainsi que l'extraction du fond de vallée dans le bassin versant de la rivière Centrale se sont effectuées dans le cours d'eau principal (rivière Centrale) et dans deux de ses tributaires (Branche Thibeault et Ruisseau des Prairies). Les tronçons situés dans les zones à relief plat n'ont pas pu être délimités. Le fond de vallée de la rivière Centrale s'étend sur une distance de 36,8 km. Concernant la rivière branche Thibeault et le ruisseau des Prairies, les distances sont respectivement de 3,8 km et 6,7 km.

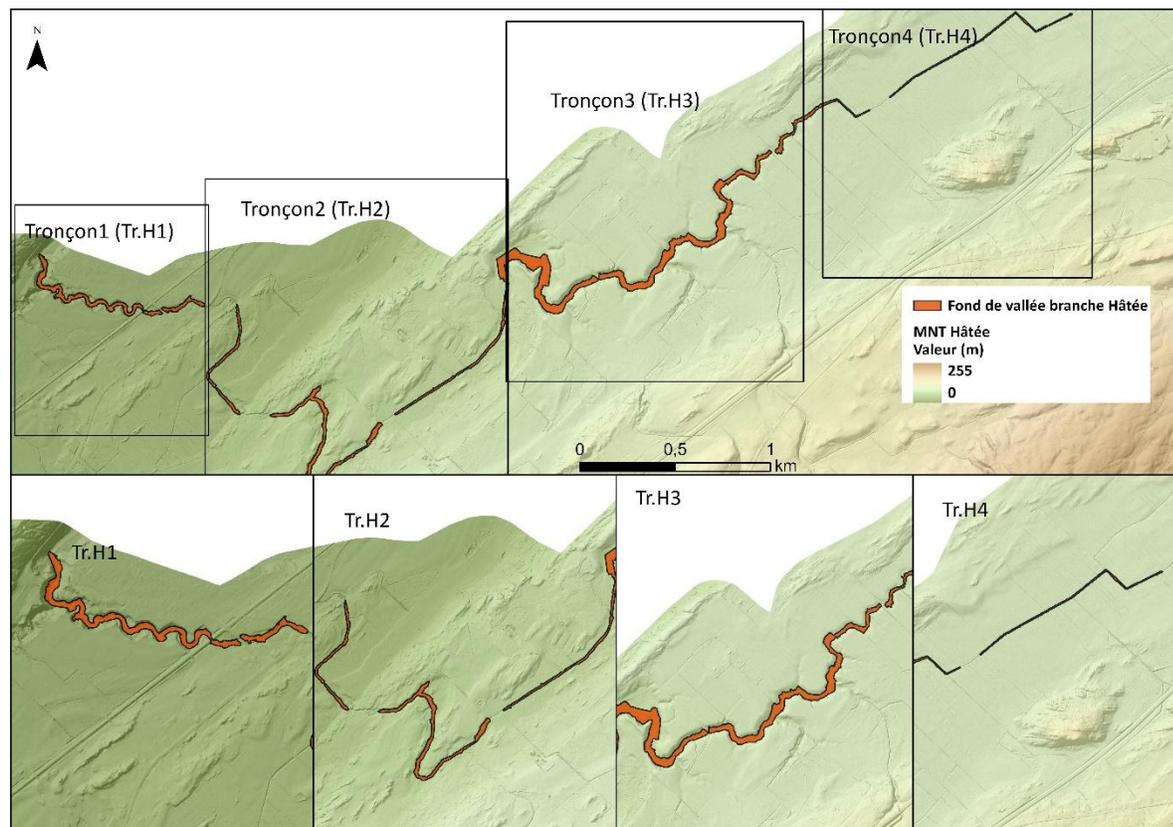


Figure 31. Cartographie des tronçons homogènes du fond de vallée du cours d'eau principal du bassin versant de la rivière Hâtée (Branche Hâtée).

La délimitation et l'extraction du fond de vallée ont été réalisées dans le cours d'eau principal du bassin versant de la rivière Hâtée (Branche Hâtée) et son tributaire (rivière Hâtée). Le fond de vallée apparaît sous forme discontinue. Le fond de vallée de la branche Hâtée s'étend sur une distance de 19 km et la largeur de son fond de vallée varie de l'amont vers l'aval. Cette variation de la largeur a contribué à segmenter ce cours d'eau en quatre tronçons homogènes (Tr.H1, Tr.H2, Tr.H3, Tr.H4) (figure 31 ci-dessus). Le fond de vallée de son tributaire (la rivière Hâtée) s'étend sur une distance de 17,6 km.

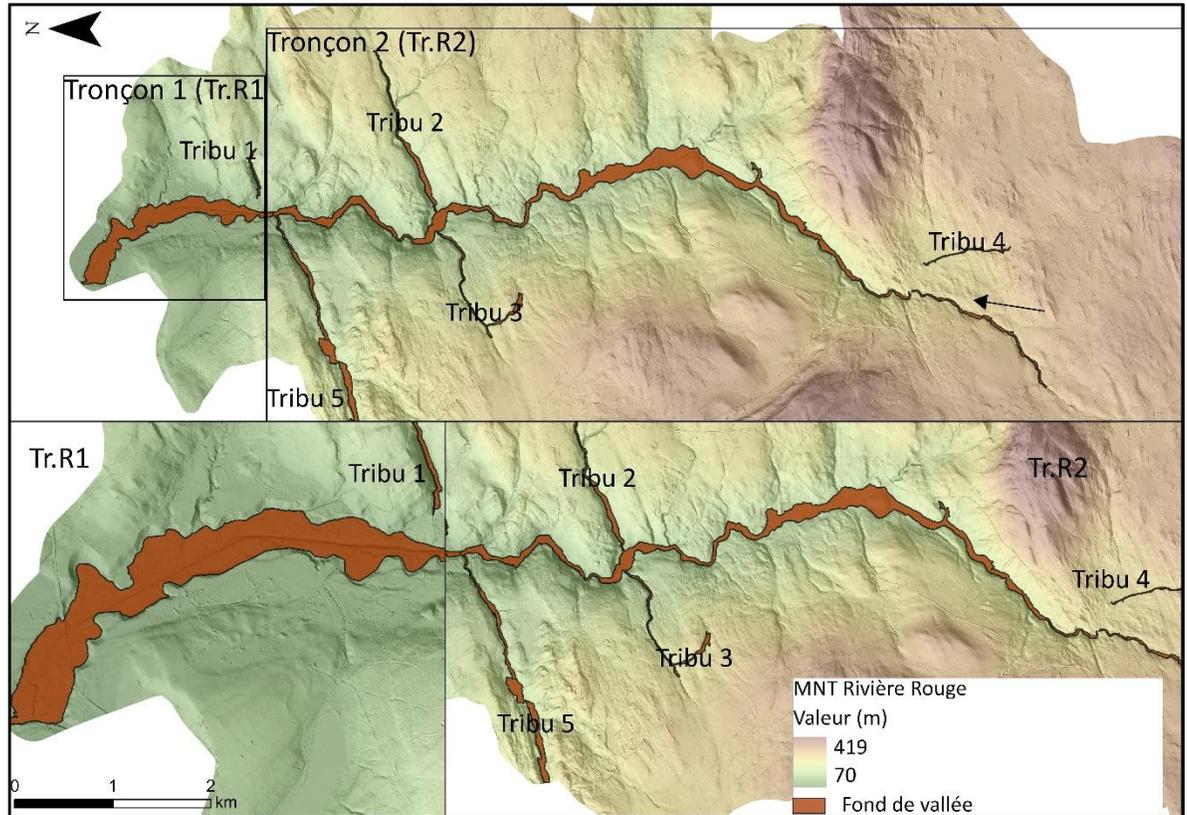


Figure 32. Cartographie du fond de vallée dans le bassin versant de la rivière Rouge.

La figure 32 présente la cartographie du fond de vallée dans le bassin versant de la rivière Rouge. La délimitation et l'extraction du fond de vallée ont pu être réalisées dans le cours d'eau principal (la rivière Rouge), et dans cinq tributaires (tribu 1, tribu 2, tribu 3, tribu 4, tribu 5). Le cours d'eau principal du bassin versant a été segmenté en deux tronçons homogènes (Tr. R1 et Tr. R2). Le tronçon Tr. R1 s'étend sur une distance de 5,7 km et le tronçon Tr. R2 s'étend sur une distance de 22,6 km.

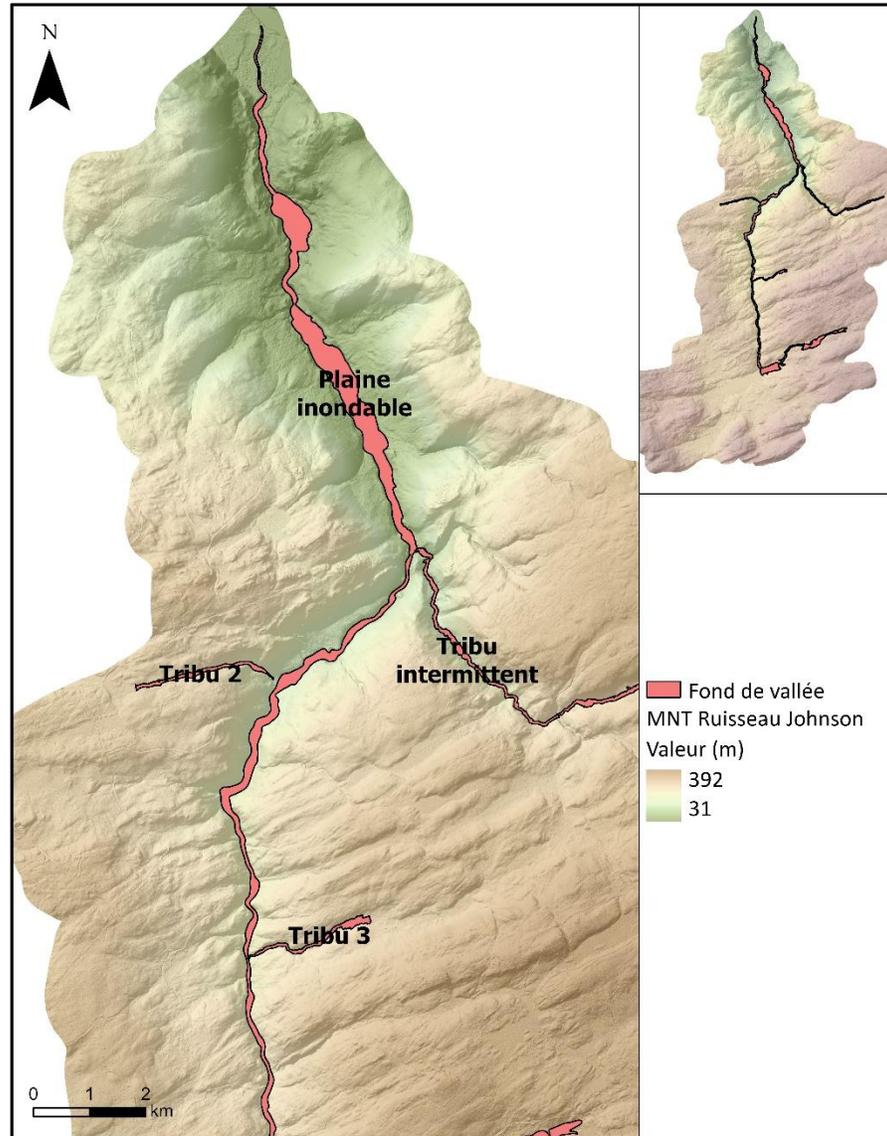


Figure 33. Cartographie du fond de vallée dans le bassin versant du ruisseau Johnson.

La figure 33 présente la cartographie du fond de vallée réalisée dans le bassin versant du ruisseau Johnson. L'extraction du fond de vallée a été réalisée dans le cours d'eau principal, le ruisseau Johnson et trois tributaires (Tribu 2, Tribu 3 et Tribu intermittente). Le fond de vallée du cours d'eau principal délimité s'étend sur une distance de 19,8 km.

### 3.2.3 Évaluation de l'intensité des processus : morphométrie et cartographie des aléas simulés avec ExZeco

#### 3.2.3.1 Cône alluvial et morphométrie

Cette section présente les résultats morphométriques déterminés sur les cônes alluviaux, principalement le coefficient de Melton à l'échelle régionale (figure 34), et la puissance spécifique ainsi que la pente à l'échelle des bassins versants pilote (tableau 5).

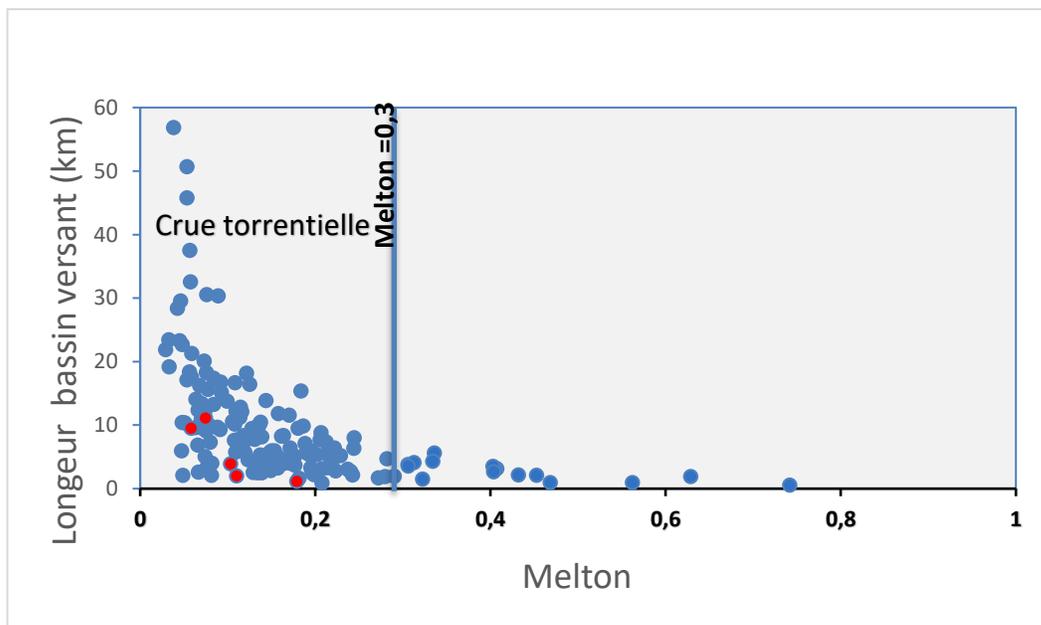


Figure 34. Diagramme de distribution du coefficient de Melton en fonction de la longueur du bassin versant des 197 cônes alluviaux cartographiés dans la région du Bas-Saint-Laurent. Les points en rouge représentent les cinq cônes étudiés dans ce projet.

Le diagramme montre que la majorité des cônes alluviaux cartographiés présente un Melton inférieur à 0,3 correspondant au seuil établi par Jackson et al. (1987). Les cônes étudiés dans ce projet (point rouge dans le diagramme) sont représentatifs des cônes alluviaux de la région. Une forte concentration de cette catégorie de cône (Melton <0,3) a une longueur de leur bassin versant compris entre 2 et 20 km. Quelques cônes présentent un indice de Melton

supérieur à 0,3. Cette catégorie de cône possède une longueur de bassin versant inférieure à 10 km.

Tableau 5  
Morphométrie des cônes alluviaux

<b>Rivière Hâtée</b>				
	<b>Coefficient de Melton</b>	<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Pente (S) (m/m)</b>	<b>Puissance spécifique (<math>\omega</math>) (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Cône 1</b>	0,1	16 000	0,04	28,5
<b>Cône 2</b>	0,06	14 000	0,03	32,9
<b>Cône 3</b>	0,1	30 000	0,03	60,2
<b>Cône 4</b>	0,2	56 000	0,03	53,8
<b>Ruisseau Johnson</b>				
<b>Cône Johnson</b>	0,07	35 000	0,02	110,3

Les résultats du tableau 5 montrent que les cônes du bassin versant de la rivière Hâtée et du ruisseau Johnson présentent un ratio de Melton  $<0,3$ , correspondant au seuil établi par Jackson et al. (1987). Les cônes 1 et 2 ont une puissance spécifique inférieure à  $35 \text{ W/m}^2$  contrairement au cône 3, 4 et le cône Johnson qui a une puissance spécifique supérieure à  $35 \text{ W/m}^2$ , seuil établi par Brookes (1988). Quant à l'étendue des cônes, le cône 3 et le cône Johnson ont une superficie qui fait deux fois le cône 1 et le cône 2. En revanche, le cône 4 a une superficie supérieure aux autres cônes. Les pentes moyennes observées sur les cônes varient de 2 à 4 %.

### 3.2.3.2 Cartographie des aléas simulés dans les cônes alluviaux après application d'ExZeco

Cette section présente la cartographie des aléas issue des résultats d'ExZeco dans les bassins versants étudiés. La figure 35 représente la cartographie probable des corridors d'avulsions sur les quatre cônes alluviaux du bassin versant de la rivière Hâtée et la figure 36 présente la cartographie des corridors probables d'avulsions sur le cône alluvial du bassin versant du ruisseau Johnson. Les deux cartographies mettent en exergue la présence d'avulsion potentielle et de surface probable d'expansion de flux sur les cônes alluviaux des bassins versants pilotes. En ce qui concerne le bassin versant de la rivière Hâtée, pour une variation de 1 m on observe une avulsion sur les cônes 2 et 3 uniquement ; où la surface probable de flux est plus développée sur le cône 2. En revanche, pour une variation de hauteur de 2 m, on observe une intensité plus élevée de l'aléa se matérialisant par un développement de la surface probable de flux sur les quatre cônes. Par ailleurs, on remarque que l'avulsion sur le cône 2 débute à un endroit précis sur le cône (flèche noire sur la carte).

Cependant, sur le cône du ruisseau Johnson, aucune avulsion n'est observée pour une variation topographique de 1 m. Les corridors probables d'avulsion apparaissent à 2 m. De plus, cette apparition probable d'avulsion débute à deux endroits précis (flèche sur la carte) sur le cône qui correspondrait à une présence de ponceau sur le LiDAR. Cette trajectoire potentielle laisse apparaître une surface probable d'expansion du flux en aval du cône jusqu'à rejoindre son exutoire.

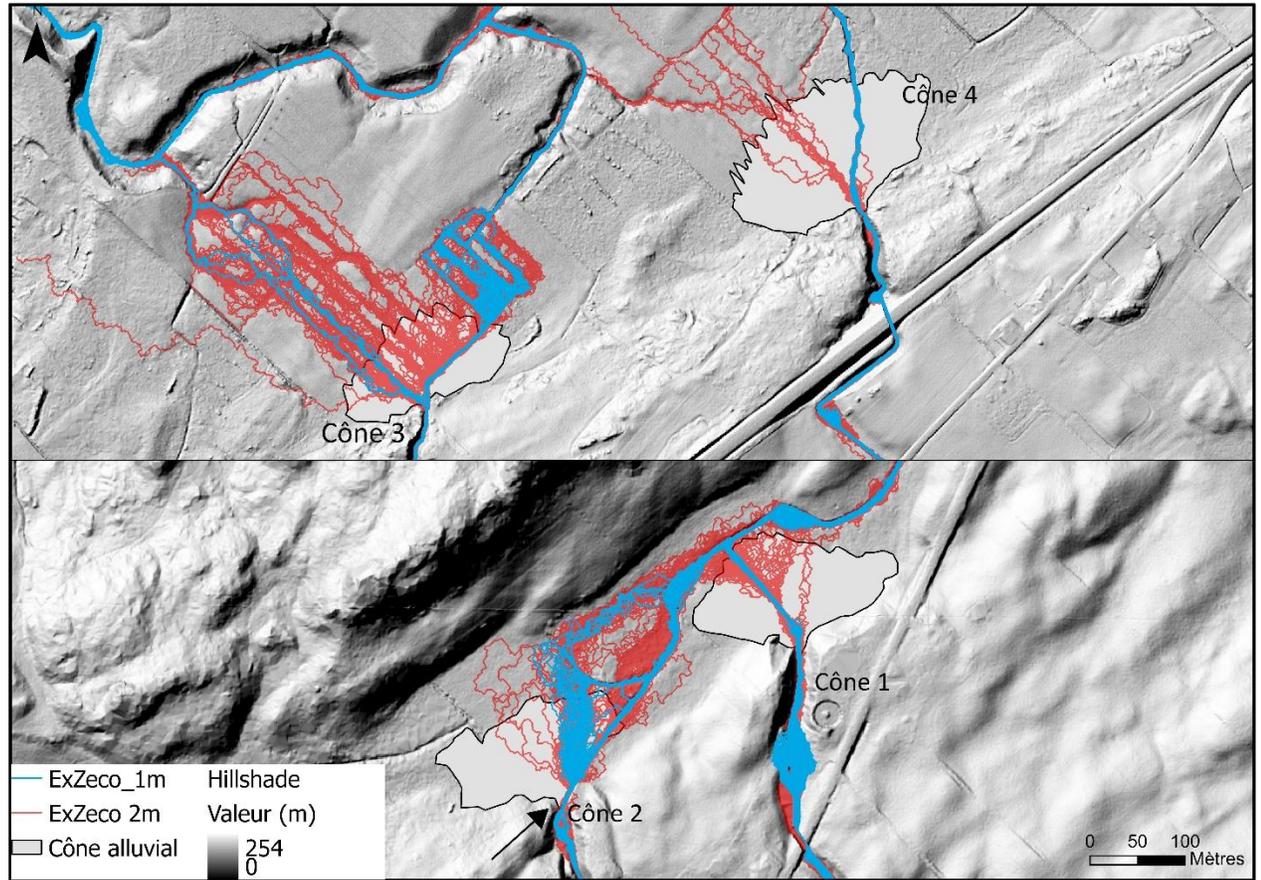


Figure 35. Cartographie des avulsions potentielles et surface probable d'expansion du flux sur les quatre cônes alluviaux du bassin versant de la rivière Hâtée pour une variation topographique du protocole ExZeco de 1 m (bleu) et 2 m (rouge).

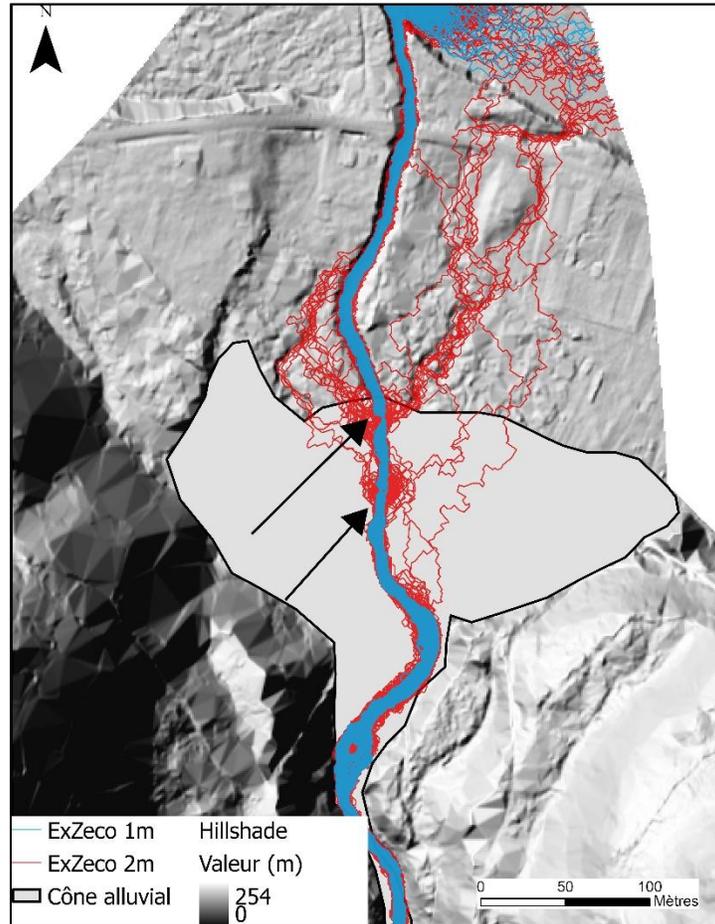


Figure 36. Cartographie des avulsions probables sur le cône du bassin versant du ruisseau Johnson pour une variation topographique du protocole ExZeco de 1 m (bleu) et 2 m (rouge).

### 3.2.3.3 Plaine inondable et morphométrie

Cette section présente les résultats de l'indice de confinement (IC), de la pente(S) et de la puissance spécifique ( $\omega$ ) déterminés dans les cours d'eau de chaque bassin versant.

- Bassin versant du ruisseau Johnson

Le tableau 6 présente les résultats des paramètres déterminés dans le cours d'eau principal Johnson et ses trois tributaires (tribu 2, tribu 3 et Tribu 1 ; ou Tribu correspond au tribu intermittent). Ce tableau montre que le ruisseau Johnson et les tributaires 1 et 2 présentent

un indice de confinement (IC) > 3 en raison de  $IC_{\text{Johnson}} > IC_{\text{tribu2}} > IC_{\text{tribu1}} > 3$ , selon le seuil établi par Sholtes et al. (2018). En revanche, le tributaire 3 présente un IC < 3. En ce qui concerne la pente moyenne, la plus forte est localisée dans le tributaire 2 où  $S_{\text{tribu2}} > S_{(\text{tribu 1 et tribu 3})} > S_{\text{Johnson}}$ . La puissance spécifique, quant à elle, est inférieure à 35 W/m<sup>2</sup> dans le tributaire 3. En revanche, le cours d'eau principal Johnson et ses tributaires 1 et 2 présentent une puissance spécifique qui excède 35 W/m<sup>2</sup>. En somme, on observe deux catégories de cours d'eau en fonction de la puissance spécifique.

Tableau 6

Morphométrie calculée dans le bassin versant du ruisseau Johnson

	IC	S(m/m)	$\omega$ (W/m <sup>2</sup> )
<b>Johnson</b>	5,1	0,02	90,6
<b>Tribu 1</b>	3,7	0,06	98,7
<b>Tribu 2</b>	4,4	0,10	35,6
<b>Tribu 3</b>	2,9	0,06	29,1

- Bassin versant de la rivière Rouge

Les paramètres morphométriques déterminés dans le bassin versant de la rivière Rouge sont consignés dans le tableau 7. Les indices ont été déterminés dans les deux tronçons principaux de la rivière Rouge et ses cinq tributaires.

Tableau 7

Morphométrie calculée dans le bassin versant de la rivière Rouge

	IC	S(m/m)	$\omega$ (W/m <sup>2</sup> )
<b>Tr. R1 (Aval)</b>	22,2	0,01	111,6
<b>Tr. R2 (Amont)</b>	8,2	0,02	153,8
<b>Tribu 1</b>	5,5	0,04	42,1
<b>Tribu 2</b>	5,7	0,04	51,9
<b>Tribu 3</b>	3,9	0,06	60,5
<b>Tribu 4</b>	2,1	0,02	31,8
<b>Tribu 5</b>	4,7	0,04	69,4

Les résultats montrent que les deux tronçons (Tr. R1 et Tr. R2) présentent un IC > 7, et les tributaires (1,2, 3 et 5) ont un IC compris entre 3 et 7. En ce qui concerne le tributaire 4, il présente un IC <3. On enregistre donc 3 catégories de cours d'eau selon IC. Les pentes moyennes enregistrées dans les tributaires sont comprises entre 2 et 6 %. La pente moyenne la plus faible a une valeur de 0,9 %, et est enregistrée dans le tronçon (Tr. R1) du cours d'eau principal. À l'opposé, la pente moyenne la plus forte est localisée dans le tributaire 3 avec une valeur de 6 %. Les tributaires (1,2 et 5) présentent une puissance spécifique supérieure à 35 W/m<sup>2</sup>. Les puissances spécifiques les plus élevées sont enregistrées dans les deux tronçons du cours d'eau principal (Tr. R1 et Tr. R2), avec une puissance spécifique qui excède 100 W/m<sup>2</sup>. Seul le tributaire 4 présente une puissance spécifique inférieure à 35 W/m<sup>2</sup>. Au regard de ces résultats, le bassin versant de la rivière rouge se subdivise en 3 catégories de cours d'eau selon les valeurs de l'IC et de la puissance spécifique. On distingue les cours d'eau avec un IC >7 et une puissance spécifique >100 W/m<sup>2</sup>; les cours d'eau avec un IC

compris entre 3 et 7, et une puissance spécifique comprise entre 35 et 100 W/m<sup>2</sup>; et pour finir la dernière catégorie avec un seul tributaire avec IC <3 et une puissance spécifique <35 W/m<sup>2</sup>.

- Bassin versant de la rivière Centrale

Les paramètres morphométriques déterminés dans le bassin versant de la rivière Centrale sont présentés dans le tableau 8. Les paramètres ont été déterminés dans la rivière Centrale et ses deux tributaires : le Ruisseau Prairies et la Branche Thibeault. Les résultats montrent que les trois cours d'eau ont un IC ≥ 3 avec une pente moyenne de 1% pour les cours d'eau respectifs de la rivière Centrale et la Branche Thibeault. La pente moyenne du Ruisseau Prairies est de 2%. La branche Thibeault a une puissance spécifique inférieure au seuil mineur de Brookes 25 W/m<sup>2</sup>. En revanche, la rivière Centrale et le Ruisseau Prairies ont une puissance spécifique supérieure à 35 W/m<sup>2</sup>.

Tableau 8  
Morphométrie calculée dans le bassin versant de la rivière Centrale

	IC	S(m/m)	ω (W/m <sup>2</sup> )
Rivière Centrale	5	0,01	71,6
Ruisseau Prairies	6	0,02	84,9
Branche Thibeault	3	0,01	15,6

- Bassin versant de la rivière Hâtée

Le tableau 9 présente les résultats des paramètres morphométriques déterminés dans les quatre tronçons homogènes du cours d'eau principal, la Branche Hâtée et de son tributaire la rivière Hâtée.

Tableau 9

Morphométrie calculée dans le bassin versant de la rivière Hâtée

	IC	S(m/m)	$\omega$ (W/m <sup>2</sup> )	
Branche Hâtée	<b>Tr.H1</b>	3,1	0,01	135,6
	<b>Tr.H2</b>	2,7	0,01	83,3
	<b>Tr.H3</b>	5,9	0,005	25,3
	<b>Tr.H4</b>	2,1	0,002	7,7
	<b>Rivière Hâtée</b>	5,4	0,02	97,5

Les valeurs indiquent un  $IC > 3$  pour les tronçons Tr.H1, Tr.H3 et la rivière Hâtée. En revanche, les tronçons Tr.H2 et Tr.H4 présentent un  $IC < 3$ . La puissance spécifique observée dans les tronçons Tr.H3 et Tr.H4 est inférieure à  $35 \text{ W/m}^2$ . Cependant, la rivière Hâtée et les tronçons Tr.H1, Tr.H2 ont une puissance spécifique qui excède  $35 \text{ W/m}^2$ . Les pentes enregistrées dans les cours d'eau sont en moyenne faibles et sont comprises entre 0,2 % et 2 %.

#### 3.2.3.4 Cartographie des aléas simulés dans les plaines inondables après application d'ExZeco

L'application d'ExZeco pour une variation de 1 m dans les plaines met en relief la présence probable des aléas HGM dans les cours d'eau et leurs tributaires. On aperçoit le développement d'une surface probable d'inondation occasionnée par un tributaire de la rivière Centrale (figure 37). Aussi, des zones de mobilité des cours d'eau sont marquées par la présence d'avulsion, de migration latérale et l'apparition de chenaux multiples. Ces derniers mettent en relief la présence d'un cône alluvial et des surfaces de flux dans le bassin versant du ruisseau Johnson et de la rivière Rouge (figures 38 et 39).

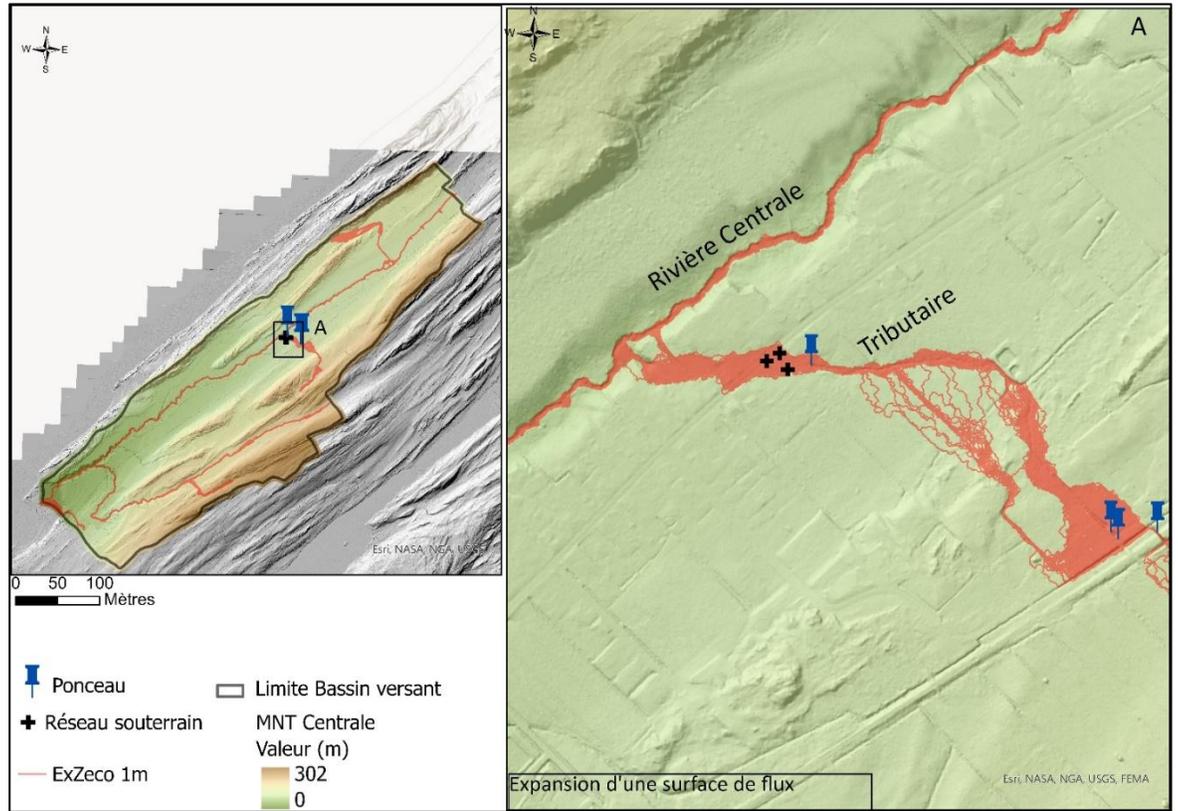


Figure 37. Cartographie d'une surface d'expansion de flux pour une variation topographique de 1 m dans le bassin versant de la rivière Centrale.

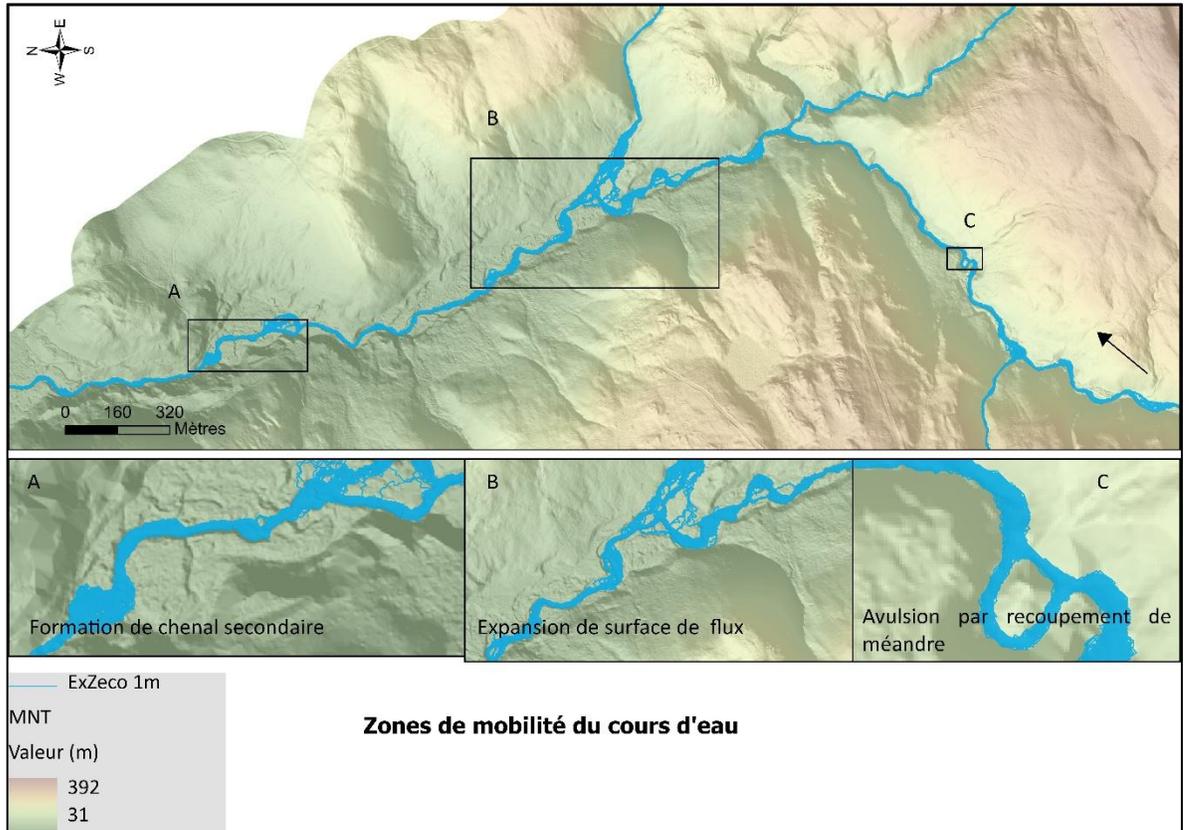


Figure 38. Cartographie des zones de mobilité probable pour une variation topographique de 1 m dans le bassin versant du ruisseau Johnson.

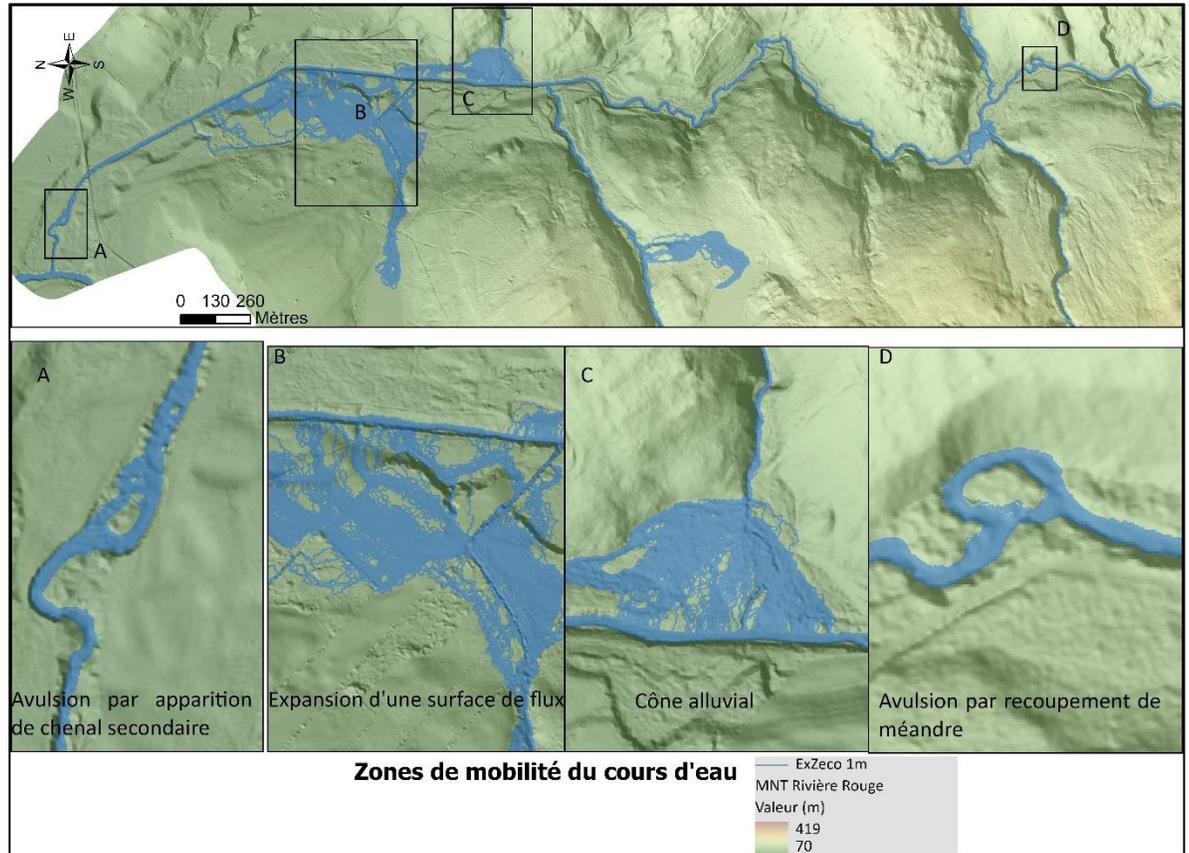


Figure 39. Cartographie des zones de mobilité probable pour une variation topographique de 1 m dans le bassin versant de la rivière Rouge.

### 3.2.4 Inventaire terrain

#### 3.2.4.1 Identification des facteurs aggravants (naturels/anthropiques)

Les terrains effectués ainsi que la revue de littérature ont permis d'identifier des facteurs aggravants (naturels et anthropiques) pouvant exacerber l'intensité des aléas HGM. Les facteurs aggravants naturels mettent en exergue la présence de barrages de castors et de bois mort comme obstacles à l'écoulement naturel de l'eau (figure 40). Les facteurs aggravants anthropiques montrent les retombées des activités humaines rehaussant le risque lié aux aléas HGM (figure 41).

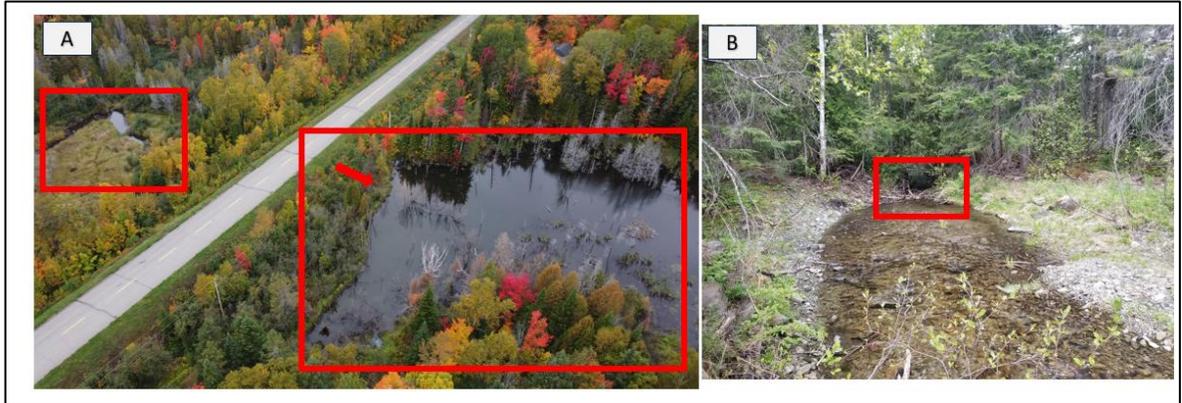


Figure 40. Photographie des facteurs aggravants naturels observés sur site. A : Remontée du niveau des eaux par la présence de deux barrages de castors, ponceau immergé à l'endroit de la flèche rouge; B : Obstruction par la présence de bois morts dans le chenal.

La figure 40 A présente deux barrages de Castors situés de part et d'autre de la route. Ces barrages ont provoqué une remontée des eaux et une déviation de la trajectoire de l'eau. Aussi, le ponceau assurant le transit normal de l'eau se trouve totalement immergé. La figure 41 B présente des bois morts dans le chenal constituant une obstruction à l'écoulement.

En ce qui concerne les facteurs aggravants anthropiques, ils sont associés aux activités humaines qui entraînent des résultats immédiats ou à long terme lors d'un événement pluvieux. La figure 42 présente des facteurs aggravants anthropiques : l'artificialisation du cours d'eau, l'installation de cabanon sur les berges du cours d'eau et l'obstruction sédimentaire d'un ponceau.



Figure 41. Photographie des facteurs aggravants anthropiques observés sur site. A : Artificialisation du cours d'eau, B : Construction de cabanon sur les berges d'un cours d'eau, C, D et E : Obstruction sédimentaire du ponceau par l'activité humaine

#### 3.2.4.2 Quelques observations sur les cônes des bassins versants pilotes

Les figures 42, 43, 44 et 45 présentent les observations relevées sur le cône 2 et le cône 3 dans le bassin versant de la rivière Hâtée. L'affaissement d'une traverse en mauvais état a provoqué l'immersion totale du ponceau situé en aval du cours d'eau (figure 42). Des processus d'incisions et d'aggradation ont été observés dans les tronçons respectifs amont et aval. Le tronçon en amont présente des zones d'érosion, avec une section d'incision forte dans la roche mère (figure 43). En revanche, la section aval du lit est plutôt rehaussée avec la présence d'accumulation de sédiment, des zones d'érosion des berges et une végétation importante (figure 44).

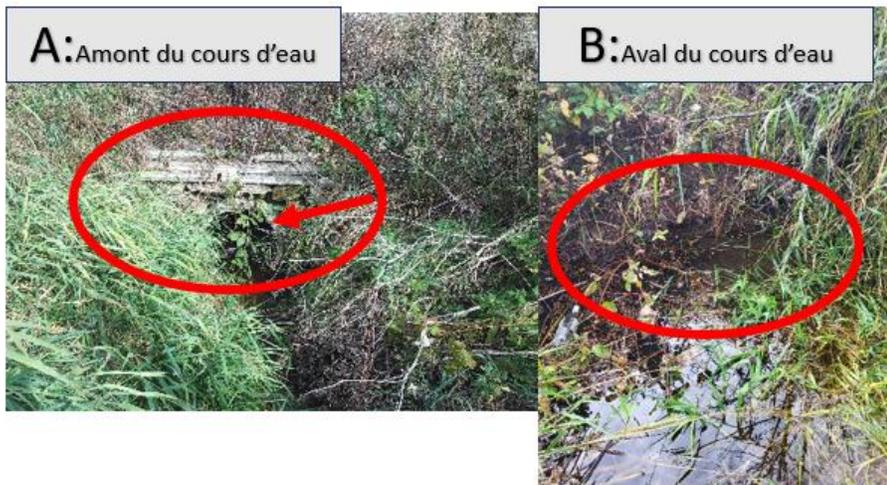


Figure 42. Photographie du ponceau où débute l'avulsion sur le cône 2.  
 A : La flèche indique la présence du ponceau sous une traverse. B :  
 Affaissement de la traverse et totale immersion du ponceau en aval,  
 ponceau non visible.



Figure 43. Photographie des indices d'une dynamique fluviale en amont  
 du cours d'eau sur le cône 2 dans le bassin versant de la rivière Hâtée.  
 A : Processus d'incision qui a eu lieu en amont du ponceau, B : Processus  
 d'érosion des berges.



Figure 44. Photographie des indices d'accumulation en aval du cours d'eau, zone d'immersion du ponceau.

En ce qui concerne le cône 3, aucun indice d'érosion actif pouvant influencer le ponceau n'a été identifié lors de l'inventaire terrain. La section du cours d'eau observée présente une végétation développée avec la présence de mousse sur les berges. Le ponceau est en bon état et assure le transit normal de l'eau (figure 45).



Figure 45. A : Photographie du ponceau localisé sur le cône 3, dont le retrait n'a pas été réalisé sur le LiDAR, B : cours d'eau du cône 3

L'inventaire terrain dans le bassin versant du ruisseau Johnson a permis d'identifier la présence de troncs d'arbre à chaque point considéré comme étant des ponceaux potentiels sur le LiDAR (figure 46).



Figure 46. Photographie des troncs d'arbres sur le cône Johnson.

#### 3.2.4.3 Validation du protocole ExZeco sur le cône de la Neigette

L'application d'ExZeco sur le cône de la Neigette localisé dans la MRC Les Basques, montre que pour une variation de 1 m les trajectoires préférentielles de l'écoulement sont celles du chenal et des deux brèches existantes. En revanche, pour une variation de 2 m, des brèches potentielles se forment sur la rive droite et la rive gauche du cône (figure 47). Lors de l'inventaire terrain, il a été constaté qu'à ces endroits préférentiels formés par ExZeco, des brèches potentielles avaient commencé à se créer. La figure 48 présente les images des observations sur ces sites autant sur la rive gauche que sur la rive droite.

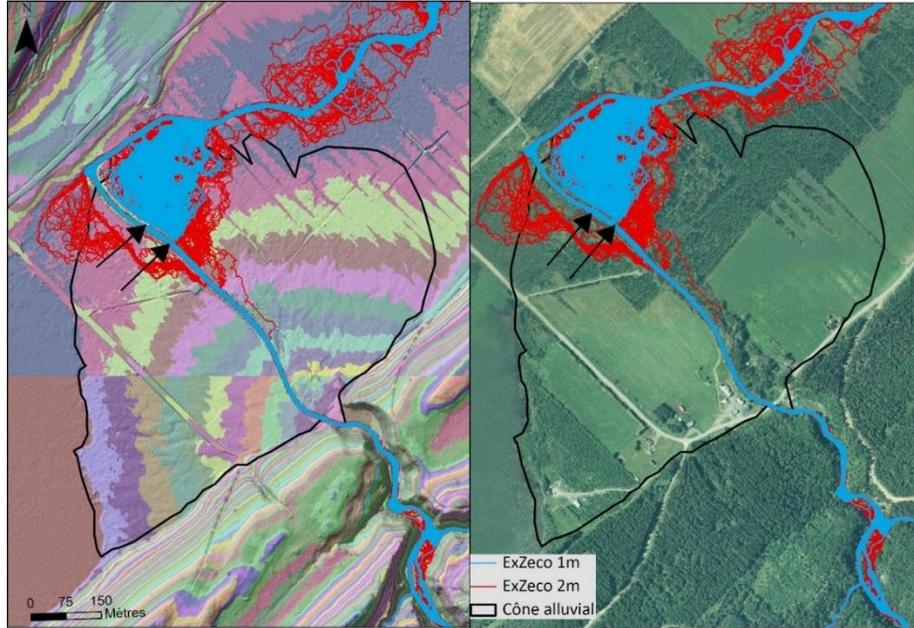


Figure 47. Processus de validation d'ExZeco sur un cône en processus de restauration passive pour une variation topographique de 1 m (bleu) et 2 m (rouge).

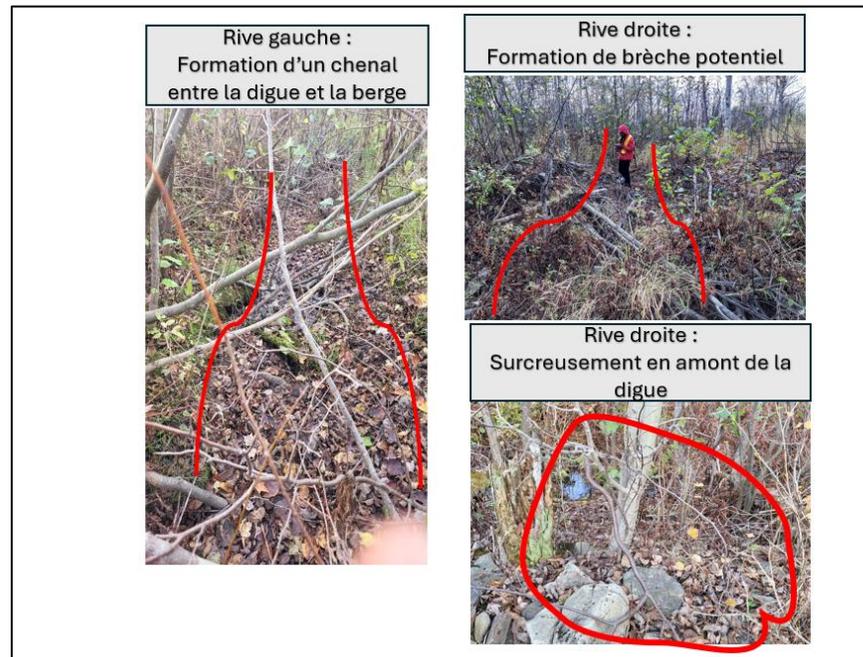


Figure 48. Photographie des brèches potentielles en formation prédites par ExZeco pour une variation topographique de 2 m.

### 3.3 ÉVALUATION DE L'EXPOSITION DES ENJEUX

#### 3.3.1 Carte de l'occupation du sol : localisation des enjeux

Les figures 49, 50, 51 et 52 présentent les cartes respectives de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Centrale, le bassin versant de la rivière Hâtée, le bassin versant de la rivière Rouge et le bassin versant du ruisseau Johnson. Les données concernées sont la répartition des bâtiments, les voies routières, les parcelles agricoles et l'espace forestier.



Figure 49. Carte de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Centrale.

Le bassin versant de la rivière Centrale se situe dans la municipalité de Saint-Simon et l'agriculture occupe une place importante à travers des cultures de foin, d'orge et d'avoine.

L'occupation du territoire par les riverains se situe en majorité le long de la 132 en parallèle de la rivière Centrale. Un tributaire de la rivière Centrale se situe dans une zone fortement anthropisée.

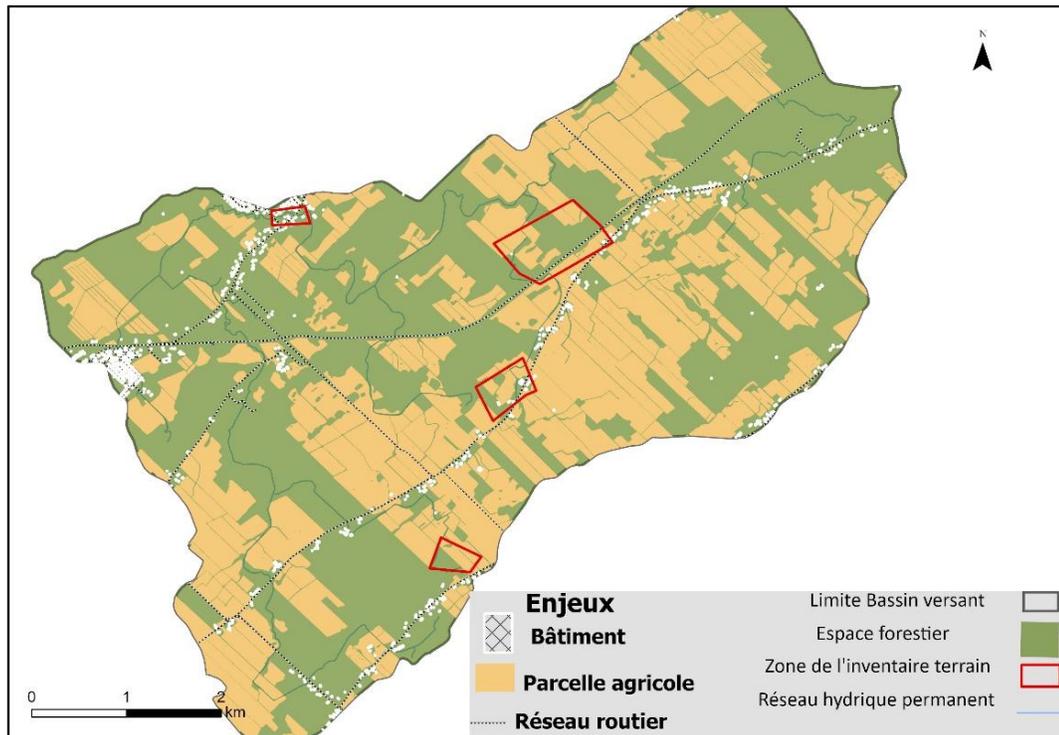


Figure 50. Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Hâtée.

Quatre zones ont été visitées lors de l'inventaire terrain dans le bassin versant de la rivière Hâtée. Ces zones sont occupées majoritairement par des cultures telles que le foin et le maïs fourrage, etc. Les bâtiments sont moins proches des cours d'eau.

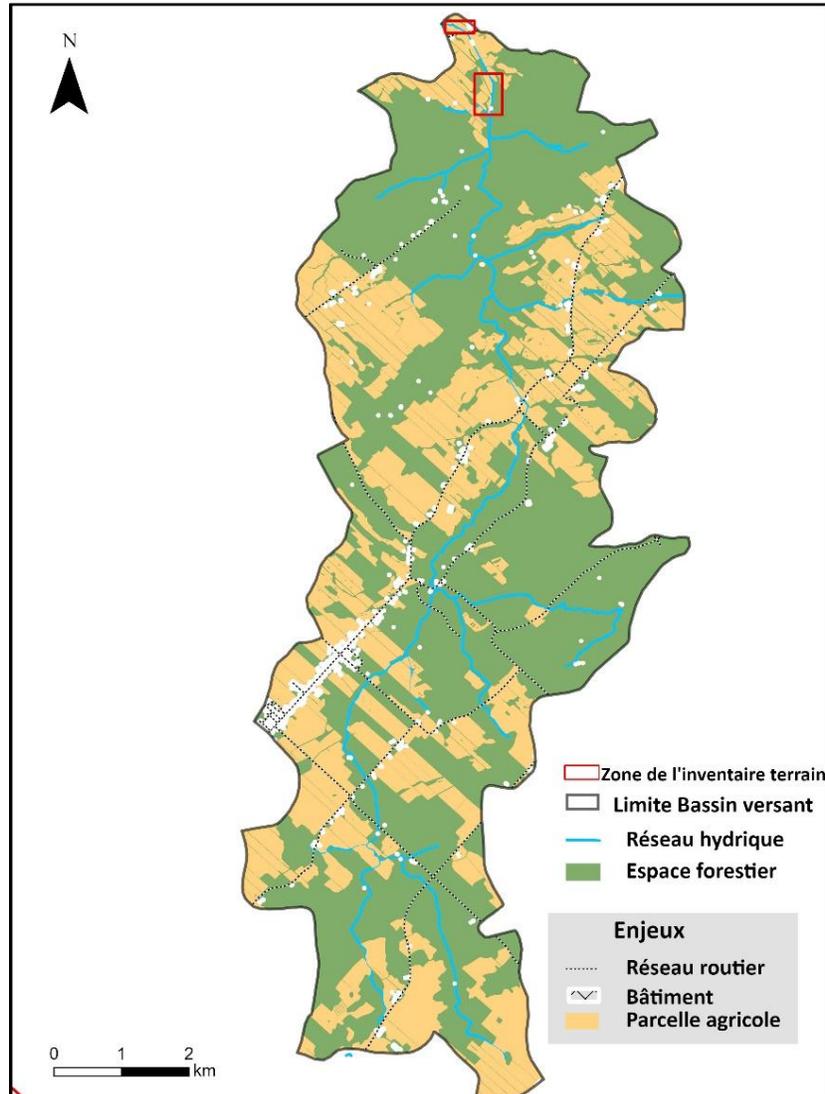


Figure 51. Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Rouge.

L'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Rouge est dominée par l'espace forestier et les parcelles agricoles. Les bâtiments sont en majorité éloignés des cours d'eau. L'inventaire terrain a concerné deux zones situées en aval du bassin versant. Ces zones sont occupées par les parcelles agricoles.

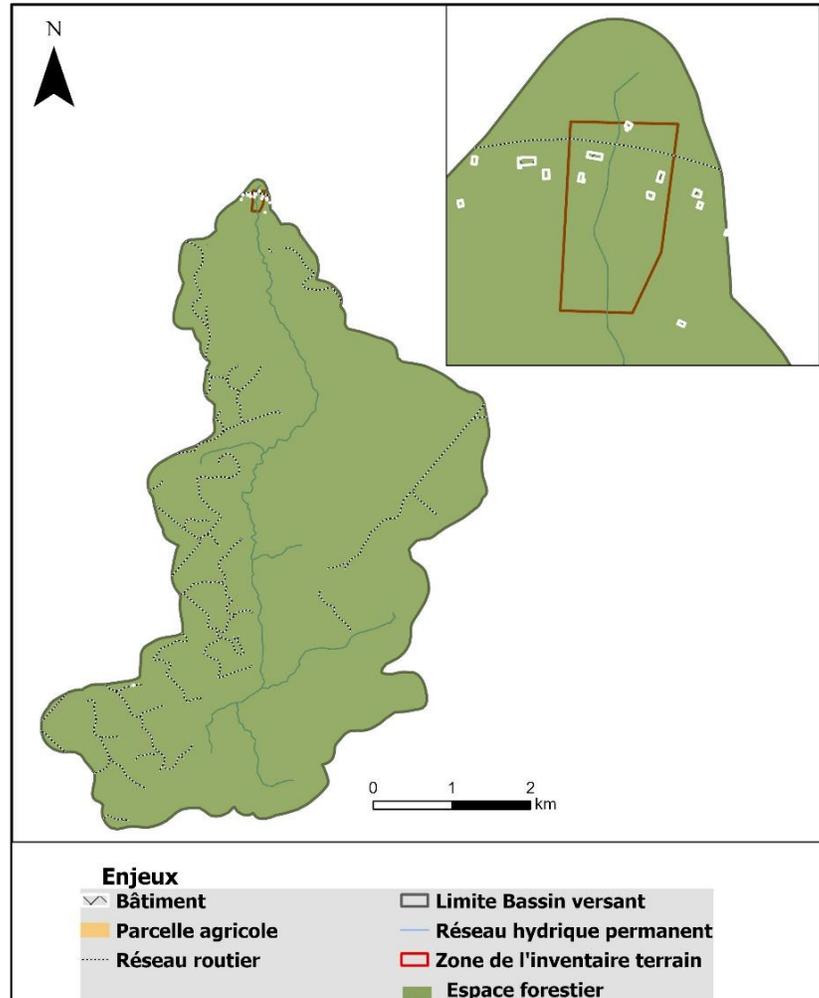


Figure 52. Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin versant du ruisseau Johnson.

Le bassin versant du ruisseau Johnson est un bassin versant forestier. Il n'existe pas encore de parcelle agricole dans ce bassin versant. Quelques bâtiments sont situés en aval du bassin versant et sont à proximité de son exutoire la rivière Matane. Les bâtiments sont soit des résidences primaires, soit des résidences secondaires occupées à des moments périodiques de l'année. L'infrastructure routière dans la zone est une route locale qui constitue la seule voie d'entrée et de sortie pour les résidents.

### 3.3.2 Cartographie préliminaire du risque lié aux aléas HGM des petits cours d'eau

Le croisement des données d'aléas et des enjeux sur le territoire a permis de réaliser une évaluation préliminaire du risque lié aux aléas présents dans les PCE. Les enjeux exposés sont des résidences, des routes et des parcelles agricoles. Concernant les parcelles agricoles, le ratio de la superficie de la parcelle par rapport à la surface probable d'inondation a été déterminé. Sachant que les formes fluviales (cône et plaine) sont situées sur des parcelles distinctes, ce ratio a été réalisé dans les bassins versants dont les parcelles agricoles sont exposées à l'aléa inondation (tableau 10).

Sur les cônes alluviaux, les enjeux exposés à l'aléa sont des parcelles agricoles dans le bassin versant de la rivière Hâtée (figure 53). La surface probable de l'aléa inondation pour une variation d'ExZeco de 2 m occupe 20 % de la parcelle située sur le cône 1 ; 60 % de la parcelle sur le cône 2 ; 52 % de la parcelle sur le cône 3 et 31 % de la parcelle sur le cône 4.

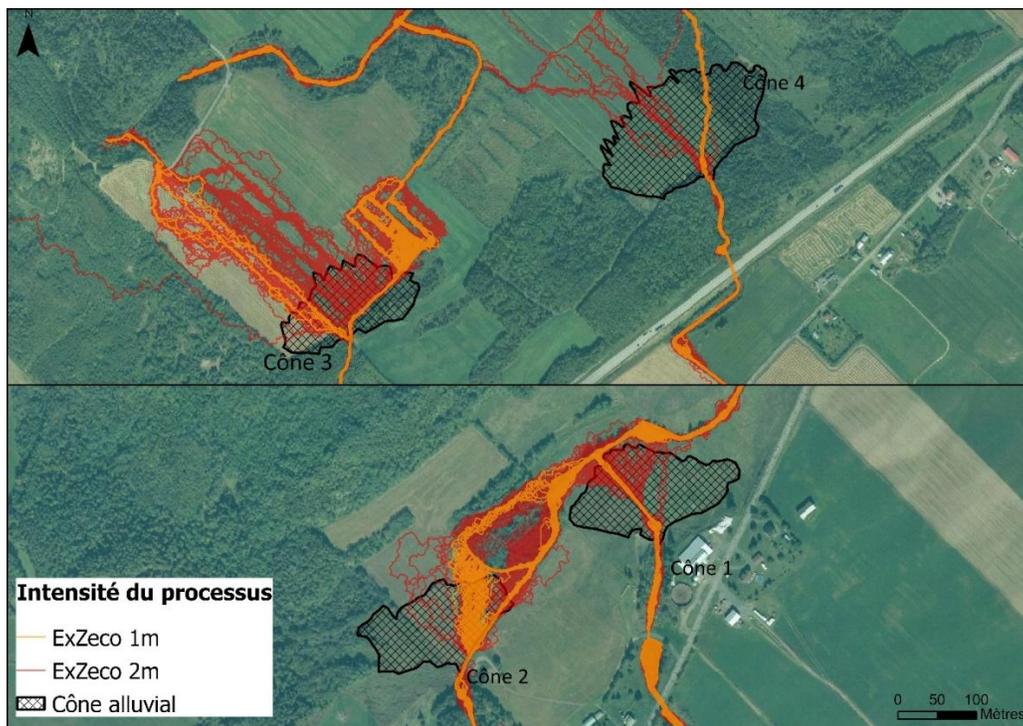


Figure 53. Cartographie des enjeux exposés à l'aléa avulsion sur les cônes alluviaux dans le bassin versant de la rivière Hâtée.

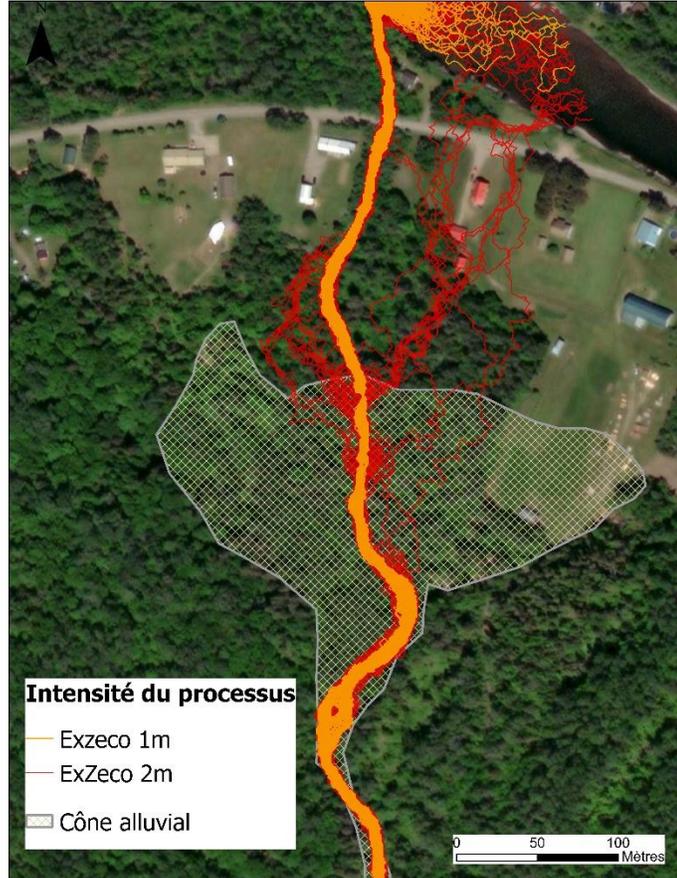


Figure 54. Cartographie des enjeux exposés à l'aléa avulsion sur le cône alluvial du ruisseau Johnson.

Dans le ruisseau Johnson, on identifie trois résidences exposées à l'aléa ainsi qu'une portion de la voie routière (figure 54). Une résidence se retrouve encerclée par l'aléa et une autre est en contact direct avec l'aléa. La route exposée constitue la principale voie pour se rendre en ville. L'aléa s'étend sur une distance de 58 m de cette voie routière.

En ce qui a trait à la plaine d'inondation, davantage d'enjeux sont exposés aux aléas HGM. L'on recense 14 résidences exposées dont 5 sont en contact direct avec l'aléa ainsi qu'une portion de la route principale où l'aléa s'étend sur une distance de 90 m dans le bassin versant de la rivière Centrale (figure 55). Les résidences sont en général en bon état, à défaut de

deux résidences qui paraissent détériorées. Quant à la route exposée, il s'agit d'une route nationale fortement empruntée pour les déplacements.

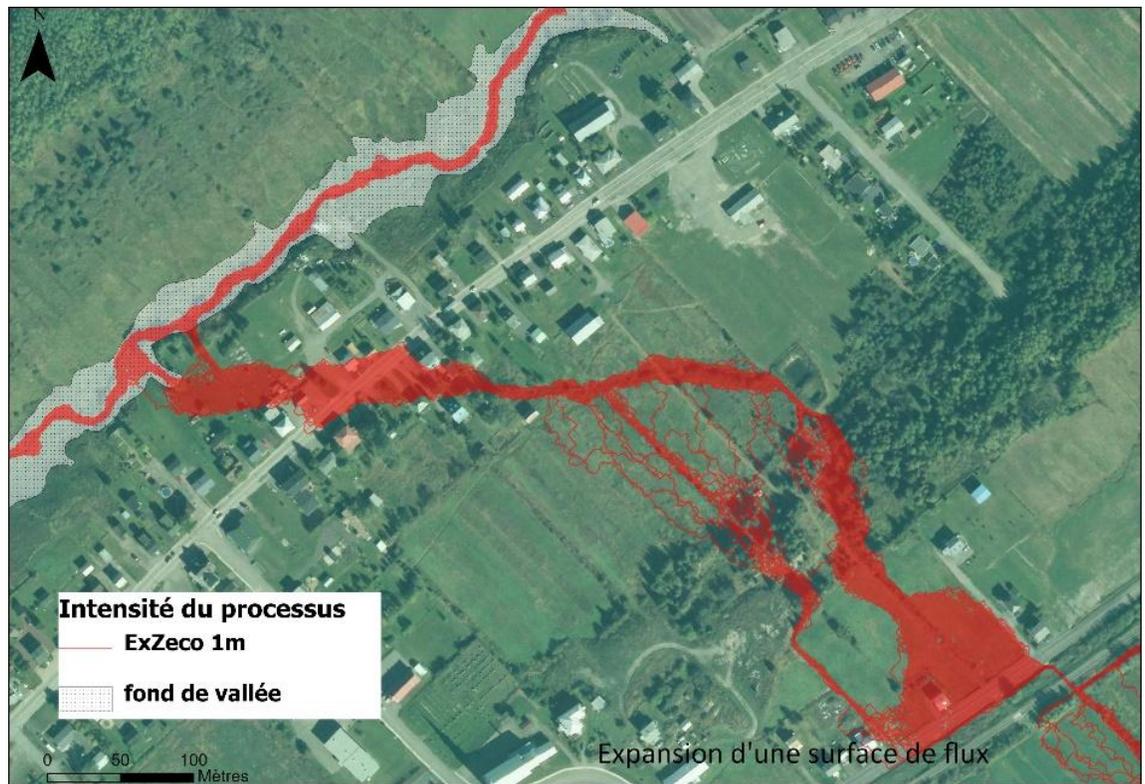


Figure 55. Cartographie des enjeux exposés à l'aléa inondation par un tributaire de la rivière Centrale.

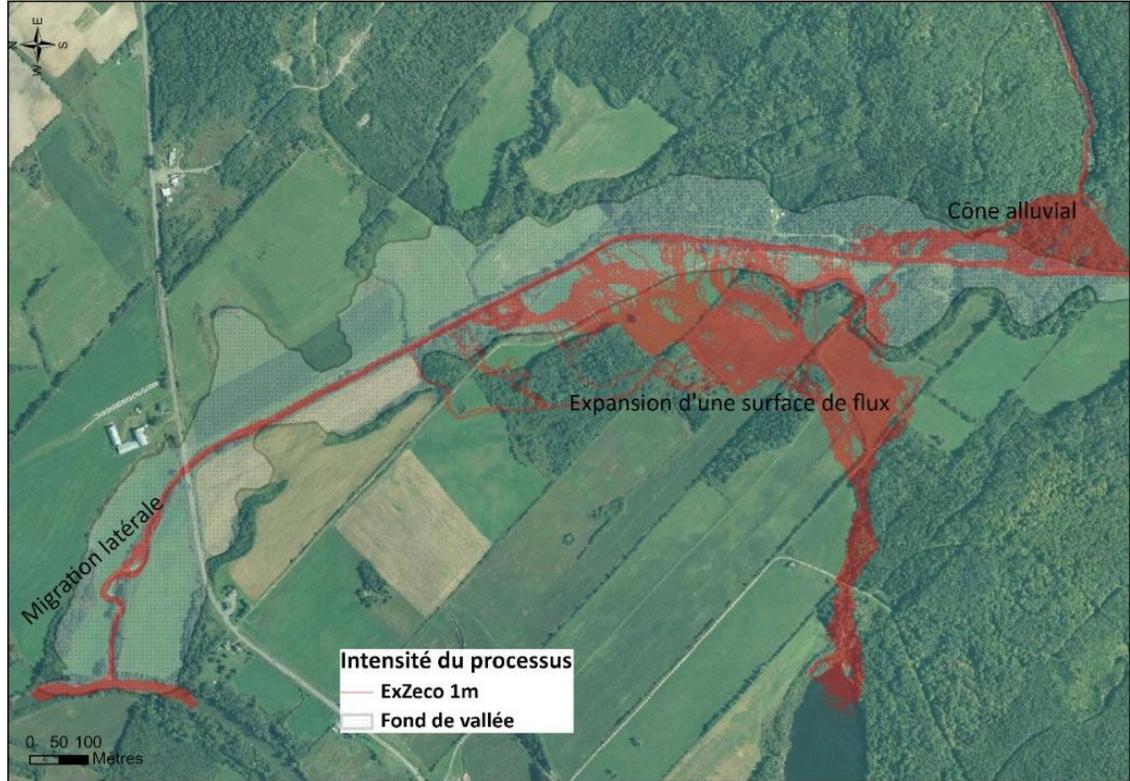


Figure 56. Cartographie probable des enjeux exposés aux aléas HGM (migration latérale, surface d'inondation) dans le bassin versant de la rivière Rouge.

Dans le bassin versant de la rivière Rouge, seules les parcelles agricoles sont exposées à l'aléa inondation (figure 56). La surface probable de l'aléa inondation occupe deux parcelles agricoles. Cette surface probable occupe un espace de plus de 60 % sur ces parcelles agricoles.

Tableau 10

Description de l'exposition des enjeux aux aléas HGM selon la forme fluviale et par bassins versants

	Rivière Hâtée	Ruisseau Johnson
Cône alluvial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La surface probable de l'aléa inondation sur chaque parcelle exposée pour ExZeco 2m est de : 20% sur le cône 1 64% sur le cône 2 52% sur le cône 3 31% sur le cône 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre de résidences isolées par l'aléa avulsion : 2</li> <li>• Nombre de résidences en contact direct avec l'aléa : 1</li> <li>• Distance de la voie routière exposée à l'aléa : 58 m</li> </ul>
	Rivière Rouge	Rivière Centrale
Plaine alluviale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface probable occupée par l'aléa inondation sur la parcelle agricole pour ExZeco 1m est plus de 60%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre de résidences en contact direct avec l'aléa : 5</li> <li>• Distance de la voie routière exposée à l'aléa : 90 m</li> </ul>

## **CHAPITRE 4 DISCUSSION**

### **4.1 DEVELOPPEMENT DES CONNAISSANCES DES ALEAS HGM ET DU RISQUE**

Les résultats obtenus et la détermination de l'intensité des aléas à travers les paramètres morphométriques des PCE mettent en relief le progrès qui peut être réalisé pour l'évaluation préliminaire du risque lié aux aléas HGM dans les PCE du Québec. L'application du protocole ExZeco sur les cônes alluviaux et les plaines validées lors de l'inventaire terrain montrent bien une dynamique fluviale susceptible de se produire et causer des dommages en présence d'enjeux. Cependant, il est bien de comprendre les facteurs et conditions qui pourraient être à l'origine de ces processus HGM dans les bassins versants pilotes. Le binôme LiDAR et les trajectoires probables de l'écoulement par ExZeco, comme outil d'analyse et d'interprétation, permettent de faire ressortir plusieurs informations dans ce contexte d'étude. Ces informations concernent le type d'aléa susceptible de se produire et son intensité, les enjeux exposés aux aléas HGM et les défis liés à l'analyse fine du LiDAR dans les petits cours d'eau.

#### **4.1.1 Aléa HGM probable et intensité : cas des cônes alluviaux**

La zone sollicitée par les trajectoires préférentielles empruntées par ExZeco met en relief la zone active probable sur le cône. Cette zone active du cône correspond à la partie qui sera favorable au processus HGM et représente la zone à risque d'exposition à l'aléa. Elle est marquée par des signes d'érosion des berges et une végétation parfois quasi absente (Morel et al., 2022). Dans le bassin versant de la rivière Hâtée, les corridors d'avulsions et la surface probable d'inondation prédits par ExZeco sur les cônes 2 et 3 pour une variation de 1 m sont causés par la présence de ponceaux qui n'ont pas été retirés lors du prétraitement des données. En effet, les ponts et ponceaux doivent être retirés du MNT pour simuler l'écoulement naturel de l'eau. Cependant, il est possible que certains ponceaux ne soient pas retirés, car ils sont moins visibles dans les PCE. De plus, l'identification des ponceaux sur le

LiDAR est un processus assez fastidieux à réaliser à l'échelle du bassin versant (Maltais et al., 2021). Ces derniers peuvent passer inaperçus lors de l'identification ou ne pas être visibles sur le LiDAR dans le cas des PCE.

Toutefois, l'inventaire terrain sur ces cônes a révélé la présence de ponceaux juste au point d'avulsion des cônes 2 et 3, ainsi que des tronçons marqués par de l'érosion, l'incision et de l'aggradation. Ces signes témoignent de l'activité dans cette section du cours d'eau comme le montrent les travaux de Morel et ses collaborateurs (2022). L'incision du lit du cours d'eau survient lorsque les sédiments sont érodés par l'écoulement de l'eau (AGRCQ, 2017). Elle survient également lors des rectifications des cours d'eau en augmentant la pente et par l'extraction de sédiments dans le chenal (AESN, 2007) et se développe soit par une érosion régressive ou une série de causes combinées (Bravard, 1994). Cependant, cette incision favorise un surcreusement du lit, réduisant ainsi le risque d'avulsion. L'aggradation de la section aval de ce cours d'eau pourrait émaner potentiellement d'un refoulement au niveau du ponceau endommagé et renforcé par l'affaissement de ce dernier, ce qui pourrait éventuellement occasionner un débordement du cours d'eau (Buffin-Bélanger et Héту, 2008). L'absence d'entretien des ouvrages entraîne un risque de défaillance et une rupture des matériaux (Pirolley et Bergeron, 2020). En revanche, sur le cône 4, la forme anguleuse des sédiments d'aspect humide dû au développement de la végétation témoigne d'un transport de sédiment limité dans ce tronçon du cours d'eau (Morel et al., 2022). Ces observations témoignent d'une absence d'activité sur le cône depuis un certain temps, ce qui laisse imaginer que cette section du cône est inactive et présente un faible risque dans son état actuel.

La présence d'embâcle de bois identifié aux endroits considérés comme ponceau potentiel sur le LiDAR dans le ruisseau Johnson constitue un artefact provenant d'une faille dans l'extraction du MNT à partir des relevés LiDAR (MNT) et devenant une obstruction potentielle à l'écoulement selon les résultats d'ExZeco. En effet, la présence de l'embâcle obstrue une partie du lit et est susceptible de favoriser une accumulation de sédiments provenant de l'amont et favoriser une inondation (Piégay et al., 2005). Des images aériennes

datant de 2015 en amont du cône témoignent d'une dynamique fluviale dans cette période matérialisée par une source potentielle de sédiment et la présence d'embâcles de bois (figure 57). Une étude supplémentaire sur la connectivité sédimentaire serait pertinente (Maltais et al., 2021; Morel et al., 2022). De plus, l'historique raconté selon une riveraine de la ville relate les faits liés à un débordement en aval du cône sans causer de réel dégât. Le niveau de l'eau avait atteint une certaine hauteur par rapport au bâtiment. Elle a aussi souligné une hausse de la nappe phréatique qui impactait le sous-sol dans une autre résidence. La résidence dont elle fait mention est celle encerclée par l'aléa en aval du cône selon les résultats d'ExZeco (figure 58). Le cône peut présenter un relief moins marqué qui constitue une zone assez vaste et humide propice aux débordements (Vigreux et al., 2011).



Figure 57. Image aérienne datant de 2015 d'un tronçon du ruisseau Johnson en amont du cône. Présence d'embâcles de bois et une accumulation de sédiments.

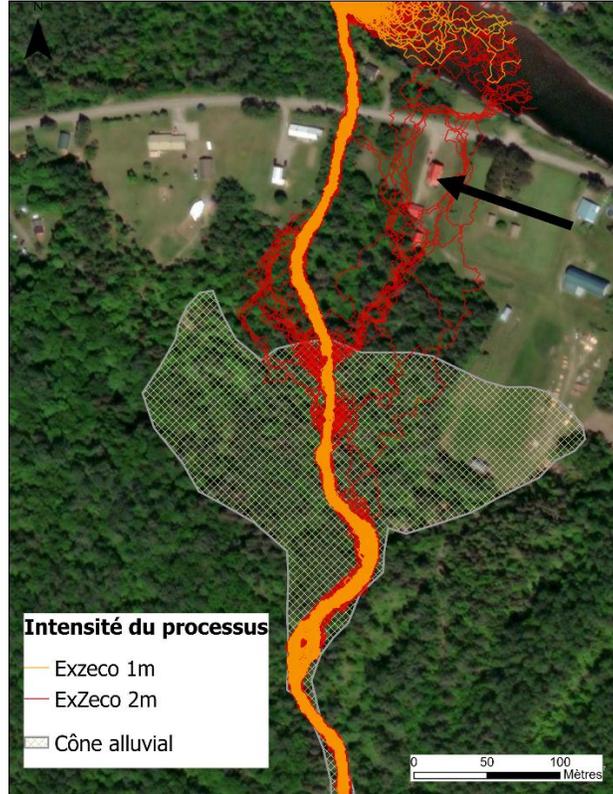


Figure 58. Localisation de la résidence indexée par la rive

Les résultats d'ExZeco issus des ponceaux non corrigés sur le LiDAR permettent de se rendre compte que l'obstruction des ponceaux pourrait être l'une des causes probables à l'origine de l'aléa avulsion et de débordement du cours d'eau sur les cônes alluviaux. L'analyse réalisée n'a pas concerné les performances hydrauliques et fonctionnelles de chaque ponceau étudié. Elle ne montre pas également les causes de ces obstructions. La défaillance des ponceaux peut être d'ordre structurel ou hydraulique (Pirolley et Bergeron, 2020). D'une observation structurelle, le ponceau est exposé au risque de déformation ou de rupture (Schall et al., 2012). La défaillance hydraulique quant à elle relève de tout ce qui nuit au drainage de l'eau où les facteurs aggravants naturels et anthropiques identifiés jouent un rôle non négligeable. En effet, Khazani et al. (2020) recensent des problématiques fréquemment rencontrées avec les ponceaux notamment : l'obstruction des ponceaux par des bois morts et l'incapacité du ponceau à répondre au débit de pointe. Ces problématiques

énumérées sont susceptibles de favoriser l'érosion et augmenter le niveau de l'eau en cas d'obstruction du ponceau. Un entretien de ces ponceaux permettrait de prévenir les apports sédimentaires ou le risque d'inondation en amont (OBVRLY, 2022).

Les paramètres morphométriques déterminés tels que la puissance spécifique, la superficie des cônes, la pente moyenne et le coefficient de Melton ont permis de caractériser l'intensité et l'étendue des processus HGM auxquels les cônes sont sujets. Les résultats montrent que les cônes du bassin versant de la rivière Hâtée et du ruisseau Johnson présentent un ratio de Melton inférieur à 0,3 correspondant aux bassins versants sujets aux processus torrentiels de type inondation selon Jackson et al. (1987). La charge sédimentaire représente un poids important dans le caractère impétueux des processus torrentiels. Les travaux de Wilford et ses collaborateurs (2005) ont montré que les processus torrentiels de type inondation se définissent par une charge sédimentaire assez faible de l'ordre de 20 %. Ce résultat semble cohérent considérant la topographie de nos bassins versants et les conditions de formations de ces cônes alluviaux. En effet, les bassins versants sujets aux processus de coulées de débris et laves torrentielles ont des chenaux escarpés avec des pentes assez raides dans leurs rivières et tributaires situés en montagne, le tout avec une forte connectivité en lien aux processus de versant (Kaitna et Huebl, 2013; Hugerot, 2020). Contrairement à nos bassins versants dont les pentes sont moins raides, variant de 2 à 4 %, où les vallées sont plus larges, limitant ainsi le processus de versant. Les travaux de Héту (2008) distinguent deux types de cônes alluviaux dans le Bas-Saint-Laurent : les cônes caillouteux et limoneux. Les limoneux sont alimentés par des écoulements de sous-bois et présentent une sensibilité aux variations hydrologiques. Cependant, les cônes caillouteux sont moins sensibles et possèdent une activité torrentielle plus importante avec un charriage de bloc de tailles variables. Ces résultats justifient le type d'activité torrentielle de type inondation dans les bassins versants pilotes. Par ailleurs, la puissance spécifique des cônes présente une certaine variabilité. Celle du cône Johnson est supérieure à  $100 \text{ W/m}^2$  et se classe parmi les cours d'eau avec une énergie assez forte capable d'éroder les berges. En revanche, le cône 1 et 2 se situe entre 25 et  $35 \text{ W/m}^2$ . Ce seuil défini par Brookes (1988) apparaît comme un seuil sensible où une

catégorie de cours d'eau dépose des sédiments en raison de sa faible énergie. Une autre catégorie peut continuer sa trajectoire et commencer sa capacité érosive en chemin (Dugré, 2019). Cependant, les indices d'érosion et d'incision sur le cône 2 en amont du ponceau confirment l'existence d'un dynamisme. Ces résultats sont conformes à ceux de Guillou (2012) qui montrent qu'il est possible d'observer un dynamisme pour des seuils de puissance spécifique inférieure à  $35 \text{ W/m}^2$  en milieu agricole dans les PCE du Québec. Pour Petit et al. (2007), il est même possible d'observer un fort dynamisme pour des puissances spécifiques comprises entre 30 et  $50 \text{ W/m}^2$ .

#### **4.1.2 Aléa HGM probable et intensité : cas des plaines**

Le bassin versant de la rivière Centrale est une zone dont la vulnérabilité est élevée, car elle présente plusieurs enjeux exposés. Le débordement observé avec ExZeco est dû a priori à la présence d'un ponceau non corrigé sur le LiDAR. Cette zone urbanisée présente un relief assez plat sur le LiDAR ne laissant transparaître aucune présence de ponceau. Cependant, les observations effectuées durant la visite terrain sur ce site ont mis en évidence la présence d'un ponceau. Seule l'entrée de ce dernier est visible, car le reste de l'évacuation de l'eau est assurée par un réseau d'eau souterrain : le cours d'eau a été canalisé. Les lits des cours d'eau subissent plusieurs modifications humaines (canalisation, ponts et ponceaux), où dans les PCE plusieurs petits tuyaux en plus des canalisations sont observés et se déversent directement dans le cours d'eau (Khazani et al., 2020). Le débordement ou le ruissellement en milieu rural ou périurbain peut résulter d'un sous dimensionnement des ouvrages, d'une obstruction ou d'un déficit du système d'évacuation d'eau de pluie (Scarwell et Laganier, 2017). Les informations recueillies auprès d'un riverain témoignent d'un débordement du cours d'eau survenu il y a deux ans au niveau du ponceau identifié lors de l'inventaire terrain (figure 59).



Figure 59. A et B : Localisation du ponceau identifié par le riverain, C : Identification du réseau souterrain

Ces informations ainsi que les observations faites corroborent les analyses de Scarwell et Laganier (2017). En effet, le débordement survenu témoigne d'une sous-estimation de ce ponceau en cas de débit élevé ou de la présence d'une obstruction au niveau du ponceau forçant le cours d'eau à changer de trajectoire. Le dimensionnement et l'installation des ponceaux doivent tenir compte du développement urbain et des prévisions liées au changement climatique (Khazani et al., 2020).

Les témoignages des riverains valident une fois de plus les résultats obtenus par le modèle ExZeco. La fonction d'un ponceau est d'assurer le libre écoulement des eaux et réduire les risques d'inondations (Valois, 2008; MPO, 2022). Un ponceau incapable d'assurer cette fonction compromet la capacité du chenal à assurer l'écoulement de l'eau et peut occasionner des dommages (Hotte et Quirion, 2003; MPO, 2022). Les travaux de Lelièvre et ses collaborateurs (2008) révèlent que des ponceaux sous-dimensionnés puis sujets au processus d'aggradation ont provoqué un débordement puis un ruissellement par canalisation routière dans la ville de Gaspé en région gaspésienne. Ces faits témoignent du risque en présence d'infrastructure moins entretenue ou sous-estimée et sujets au processus HGM. L'effet de ce type d'aménagement (canalisation du cours d'eau) constitue un important risque fluvial en cas de mauvaise adaptation de l'écoulement dans le circuit et d'un

développement des infrastructures dans la plaine inondable de ces cours d'eau (Allinne, 2007).

#### **4.1.3 Évaluation préliminaire du risque et validation des résultats**

Au regard de ces analyses, l'on constate que les tronçons des cours d'eau sujets aux obstructions (présence de ponceau) sont exposés à un aléa de forte intensité. De ce fait, le niveau d'exposition des enjeux dans ces zones est également élevé principalement dans le bassin versant de la rivière Centrale et le cône 2 du bassin versant de la rivière Hâtée. Les enjeux exposés sont, respectivement, des résidences, des routes et des parcelles agricoles. L'impact du risque probable lié à l'aléa avulsion et inondation dans ces bassins peut être d'ordre direct et indirect. L'impact direct sera lié aux enjeux en contact avec l'aléa, où l'endommagement sera étroitement lié à la vulnérabilité des enjeux (état des infrastructures, présence de fenêtres au sous-sol, etc.). Le facteur de vulnérabilité tient compte des indices d'exposition, de la sensibilité de la zone, sensibilité sociale et d'adaptation (Tomety et Buffin-Belanger, 2023). La sensibilité sociale fait référence aux caractères intrinsèques d'une population donnée à faire face à un événement. L'adaptation, quant à elle, présente l'aptitude et les démarches entreprises pour atténuer ou éviter un événement. L'étude de la vulnérabilité peut se faire à une échelle plus fine en définissant de façon spécifique les infrastructures (Lelièvre et al., 2008). Quant à l'impact indirect, il mobilisera les facteurs externes associés aux précédents dommages. Il peut concerner une interruption et un ralentissement des activités dû aux travaux d'aménagements, les coûts associés à la rénovation des infrastructures endommagées, le stress que peuvent endurer les riverains (Grelot, 2004). Cependant, cet aspect de vulnérabilité n'étant pas abordé dans cette étude, limite l'analyse des dommages potentiels que ces aléas HGM pourraient engendrer.

En outre, les validations effectuées, dont celles réalisées sur le cône en processus de restauration passive, ont montré un niveau de satisfaction et de fiabilité quant aux résultats d'ExZeco. En se basant sur la topographie, il génère de nouveaux talwegs qui représentent

les trajectoires préférentielles que peut prendre l'écoulement. La chaîne d'opération ExZeco a été en effet améliorée par (Pons et al., 2020) afin de mieux simuler les écoulements. Elle a ainsi permis de cartographier les zones potentiellement inondables dans plusieurs bassins versants de l'arc méditerranéen en 2019. Cependant, il représente une analyse préliminaire et des analyses géomorphologiques complémentaires pourraient être réalisées dans les zones plus exposées dans le but de mieux cerner les aléas (Maltais et al., 2021).

En ce qui concerne la validation de la cartographie des cônes, elle a eu lieu sur une dizaine de cônes. Des indices du dynamisme du cours d'eau ont pu être observés sur les cônes qui n'ont subi aucune modification par les activités humaines telles que des chenaux abandonnés, des signes d'érosion, des chenaux secondaires et des cicatrices de passage de l'eau. En revanche, sur les cônes anthropisés, il est difficile de trouver des indices. Cette catégorie de cône présente généralement une faible pente et est exposée à l'ensoleillement. De ce fait, elle est propice aux activités agricoles (Hugerot, 2020), tel est le cas des cônes du bassin versant de la rivière Hâtée.

#### **4.2 QUELQUES LIMITES DE L'ÉVALUATION ET LA GESTION DU RISQUE DANS LES PETITS COURS D'EAU**

L'évaluation préliminaire du risque dans les PCE réalisées à partir des données LiDAR de résolution 1 m et les outils SIG disponibles utilisés ont permis de relever quelques limites. En effet, à cette résolution, l'apparition des ponts et ponceaux sur le LiDAR constitue une obstruction à l'écoulement s'ils ne sont pas corrigés au préalable avant toute simulation (Maltais et al., 2021). Ces ponts et ponceaux ne constituent plus d'obstacle à l'écoulement lorsque la résolution du LiDAR est réduite à 20 m. Cependant, cette résolution n'est pas adaptée pour une analyse fine des PCE. L'application de l'outil ExZeco requiert une base de données (localisation des ponts et ponceaux) du territoire. Ces données ont pour objectif de rendre le MNT hydrocohérent pour une analyse plus précise, ce qui est difficile à obtenir à ce stade. Ce fait contraint un meilleur prétraitement du LiDAR pour la correction des ponts et ponceaux. Dans notre cas d'étude, l'identification des ponceaux à l'échelle du bassin

versant a été réalisée manuellement à la suite de l'interprétation du LiDAR, c'est une tâche « fastidieuse et chronophage » (Maltais et al., 2021). C'est une méthodologie qui ne permet pas d'identifier tous les ponceaux disponibles. De plus, ces derniers sont moins visibles en zone urbanisée, car souvent canalisés (exemple du tributaire de la rivière Centrale). La surestimation ou la sous-estimation des paramètres déterminés, et la cartographie des formes fluviales réalisées s'ajoutent à la liste des limites dans l'évaluation préliminaire du risque dans les PCE. À ce jour, il n'existe pas de méthode permettant de cartographier automatiquement les formes fluviales à l'échelle régionale dans un contexte de PCE au Québec. Ce qui amène à procéder à une géo-interprétation du LiDAR pour réaliser la cartographie de ces formes (exemple : cône alluvial) ou semi-automatique (exemple : la plaine). Quant à la détermination des paramètres, notamment la largeur du cours d'eau, il y a une incertitude liée à celle-ci. En effet, elle a été déterminée à la suite de la numérisation des lignes d'ExZeco dans les cours d'eau principaux et leurs tributaires. Cependant, il est difficile de distinguer la largeur du cours d'eau de celle de la plaine dans les tributaires, d'où le choix des zones encaissées pour l'estimation de la largeur à partir d'ExZeco.

D'autre part, ce projet d'étude n'a pas tenu compte de la caractérisation des aléas HGM dans les modelés d'incision. De plus, la connectivité sédimentaire, la dynamique glacielle, la temporalité, les indices de vulnérabilité et la sensibilité des enjeux n'ont pas été analysés dans cette étude. Plusieurs raisons contraignaient la réalisation de ces analyses supplémentaires, notamment le temps alloué pour réaliser un projet de maîtrise et essentiellement l'objectif principal de ce projet qui se veut d'être une évaluation préliminaire. Ces pistes de recherches peuvent être envisagées en perspective et permettraient d'approfondir les connaissances liées aux aléas dans les PCE. La figure 60 illustre une conceptualisation de l'évaluation préliminaire du risque réalisée.

Cette étude a porté nécessairement sur l'évaluation préliminaire du risque dans les PCE à partir de la reconnaissance des formes fluviales où l'emphase a été mise sur les cônes alluviaux, et la plaine alluviale. Cette reconnaissance des unités géomorphologiques est essentielle, car elle permet de caractériser le type de crue susceptible de survenir (Bourgault

et al., 2022). À ces formes sont associés des processus qui ont été identifiés par l'interprétation du LiDAR et qui ont été validés sur site. La figure 61 présente le diagramme conceptuel de l'évaluation préliminaire réalisée. Elle présente également les modèles d'incision qui pourraient éventuellement être étudiés à l'avenir. Ces derniers permettraient de déterminer la connectivité et la disponibilité sédimentaire pour enrichir davantage les connaissances sur les processus torrentiels auxquels sont sujets les cônes alluviaux. L'intérêt de ce diagramme est qu'il met une emphase sur l'interconnexion entre forme fluviale et processus HGM. La reconnaissance de ces trois formes alluviales demeure une phase d'étude préliminaire à réaliser dans la compréhension des processus HGM survenant au sein du système fluvial. Les processus HGM ont longtemps été documentés sans toutefois les distinguer et les regrouper par forme fluviale. Les recherches réalisées existent sous forme fragmentaire en les dissociant l'une de l'autre. Ce diagramme tient à rassembler les idéologies communes et axées autour de ces formes fluviales. Il représente un cadre d'analyse dans la connaissance du risque lié aux aléas HGM et peut être utilisé et appliqué dans tout contexte d'étude en lien aux processus HGM.

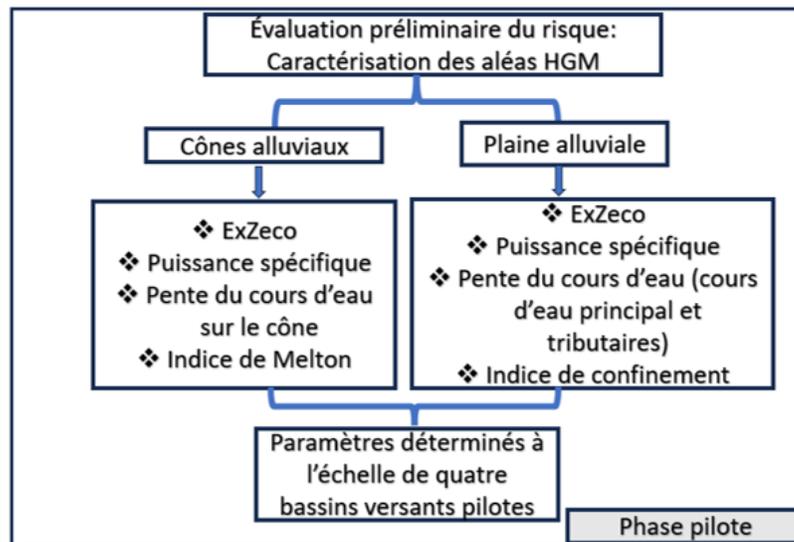


Figure 60. Récapitulatif de la caractérisation des aléas HGM réalisés.

À la suite de cette phase pilote du projet Constrictor, une liste de recommandations peut être effectuée pour une meilleure application de la méthodologie à l'échelle régionale. La première recommandation est de poursuivre la validation des formes fluviales et des seuils d'intensité à l'échelle des bassins versants pilotes. Cette validation permettra d'avoir un regard quant à l'intensité des processus, mais aussi sur la cartographie des formes fluviales, notamment la plaine d'inondation. Ensuite, acquérir les données de ponts et ponceaux pour faciliter les analyses et automatiser l'application du protocole ExZeco à l'échelle régionale. Dans une logique d'évaluer les obstructions, des zones pourraient ne pas être corrigées sur le LiDAR. Les valeurs de simulation de 1m et 2m peuvent être conservées, mais il serait aussi pertinent d'utiliser une valeur associée à la hauteur d'un événement survenu dans la région. Pour terminer, procéder à une validation de certains sites autres que ceux réalisés dans ce projet de maîtrise. Cette validation devra concerner en particulier les zones anthropisées pour lever le doute quant à la présence des cours d'eau canalisés qui exercent une influence sur l'application et l'interprétation de l'outil ExZeco.

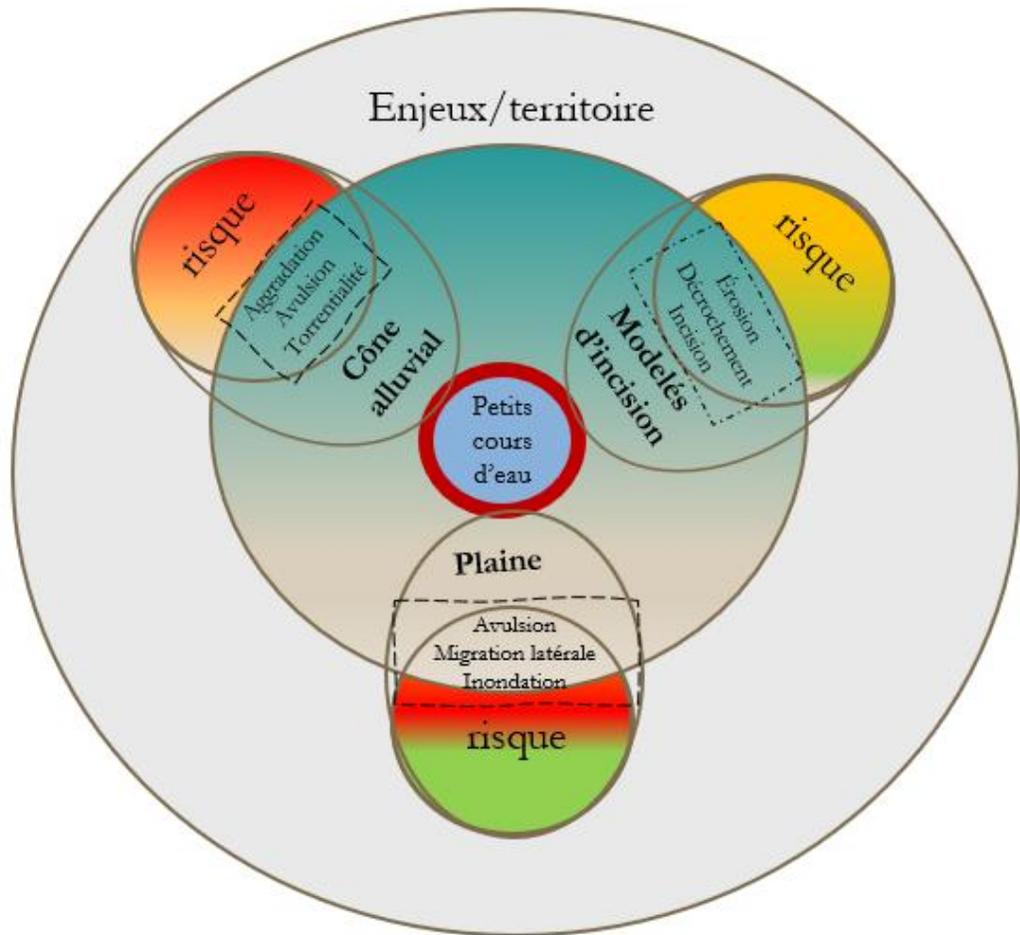


Figure 61. Diagramme conceptuel de l'évaluation préliminaire du risque lié aux aléas HGM des petits cours d'eau.

### 4.3 PERFORMANCES ET LIMITES DES DEUX OUTILS SIG UTILISES : EXZECO ET GEOMORPHON LANDFORM

#### 4.3.1 ExZeco

L'application du protocole ExZeco est associée à plusieurs avantages. Sachant qu'il a été conçu dans l'objectif principal d'extraire les zones sujettes aux inondations par

ruissellement, il permet d'avoir une emprise de surface probable d'inondation, délimiter la zone active sur un cône alluvial par les trajectoires potentielles que peut prendre l'écoulement. Bien que son utilisation exige un retrait au préalable des ponceaux sur le LiDAR, le fait de ne pas les retirer permet de procéder à un autre cadre d'analyse du risque qui est la sensibilité probable des tronçons aux obstructions. L'utilisation de cet outil dans la détermination de la largeur du cours d'eau semble également prometteuse, toutefois certains ajustements doivent être pris en considération surtout dans un contexte où le cours d'eau n'est pas encaissé. Sa chaîne d'opération (model Builder) est facilement adaptable. Cependant, bien que cet outil soit bénéfique, il est associé à certains inconvénients qui limitent son utilisation. Il présente une exigence dans la logistique informatique, surtout pour une donnée du LiDAR de résolution de 1 m. Le délai de traitement prend plusieurs heures ou jours selon l'aire du bassin versant ou la zone à traiter, de la résolution du LiDAR et de la capacité de l'ordinateur. C'est un outil qui ne simule pas l'aléa inondation par débordement du cours d'eau, car il ne prend pas en compte la vitesse, le débit, la hauteur d'eau (Pons, 2010). Toutefois, les résultats de ce projet valident l'évaluation préliminaire du risque réalisable à partir d'ExZeco, par la préidentification des zones et enjeux exposés aux aléas HGM. C'est un exercice qui a également été réalisé dans les travaux de Pons (2010), et ont abouti à une préidentification des zones exposées qu'il qualifie comme « première évaluation globale du risque ».

#### **4.3.2 Geomorphon landform**

Geomorphon landform par la classification des unités du paysage du relief permet de délimiter le fond de vallée. C'est un outil simple à appliquer avec un délai de traitement assez rapide, cependant il présente quelques limites. En réalité, il existe une grande variabilité dans l'application du paramètre *search distance* en fonction de la zone d'étude. Selon Stepinski et Jasiewicz (2012) les valeurs plus faibles du *search distance* permettent d'identifier une forme précise du relief, tandis qu'une valeur plus grande du *search distance* pourra déterminer de manière simultanée plusieurs unités du paysage composant une forme de relief donné. Dans leur article, ils appliquaient trois seuils différents du *search distance* (100, 300 et 1 000) pour

montrer l'étendue de recherches auxquels ces paramètres sont associés ainsi que la délimitation du paysage. Il faut alors tester plusieurs paramètres pour déterminer le seuil idéal. De plus, en milieu agricole, il peut tenir compte de la présence de fossés de drainage comme fond de vallée. La phase d'extraction du fond de vallée est sans doute l'étape qui nécessite la plus grande connaissance des outils SIG. Elle comporte plusieurs étapes de traitements qui peuvent varier d'un utilisateur à un autre selon ses compétences en SIG.

#### **4.4 IMPACT DU PROJET**

Les données générées dans ce projet ont permis d'en apprendre davantage sur la dynamique fluviale des PCE dans la région du Bas-Saint-Laurent. La distribution spatiale des cônes alluviaux à l'échelle régionale met en relief l'existence des processus torrentiels qui peut servir aux aménagistes en prélude d'une meilleure planification de l'aménagement du territoire. En effet, l'établissement de la base de données des cônes alluviaux représente un outil de gestion et d'aide à la décision. L'identification des ponceaux sujets aux obstructions montre également la zone à couvrir pour un éventuel suivi à réaliser. L'outil ExZeco a permis de cibler les zones potentiellement à risque auxquelles pourraient faire face les riverains dans un contexte de sécurité publique. Une priorisation des secteurs à surveiller et à investiguer en ce qui concerne l'aménagement du territoire est mise en exergue à travers cette étude. De plus, l'identification des ponceaux problématiques permet non seulement de gagner du temps dans une inspection, mais aussi de prévoir les gestions futures. Sur le plan scientifique, ce projet réitère la complexité d'étudier à grande échelle les PCE, et l'importance de la validation sur le terrain. Aussi, il montre une forme d'incertitude liée aux outils et les précautions d'analyses et d'interprétations liées à l'utilisation du LiDAR de résolution 1 m. Ce projet a permis d'identifier des valeurs seuils de Geomorphon landform et de puissance spécifique qui pourront être validés et appliqués dans le projet Constrictor. Il a aussi permis d'évaluer la performance et la limite des outils utilisés qui serviront dans l'exécution du projet Constrictor.

Au regard de ces analyses, cette évaluation préliminaire à l'échelle régionale bonifie la prise de conscience en lien aux risques présents dans les PCE. Elle permet d'orienter les axes de réflexions dans les recherches futures et de cibler les actions à mener dans une mesure préventive.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce projet était d'évaluer le risque préliminaire lié aux aléas HGM des PCE. Cette évaluation préliminaire passe avant tout par trois grandes étapes :

(i) La reconnaissance et la cartographie des formes fluviales (cône alluvial et plaine). Cette reconnaissance a servi à identifier les processus HGM auxquels ils sont sujets. De cette identification, une liste d'aléas susceptibles de se produire a pu être établie. Ces aléas répertoriés ont pu être observés lors de la visite sur le terrain, confirmant ainsi l'existence d'une dynamique fluviale dans les PCE capable de causer des dommages en présence d'enjeux.

(ii) La caractérisation de l'aléa en déterminant l'intensité des processus à laquelle ces formes sont associées. Cette étape a mis en évidence non seulement le processus torrentiel sur les cônes alluviaux à l'échelle régionale par la détermination du coefficient de Melton, mais aussi les capacités érosives que pourraient avoir les PCE à travers la détermination de la puissance spécifique. Cette caractérisation par la détermination des paramètres morphométriques a été essentielle dans ce projet en mettant en lumière les résultats d'ExZeco. Ces résultats d'ExZeco ont montré la sensibilité de certains tronçons et le fait qu'ils pourraient être sujets à des processus HGM. Les indices morphométriques déterminés et la visite sur terrain ont également validé le fait qu'il est possible que ces tronçons soient sujets à ces processus HGM.

(iii) L'évaluation du niveau d'exposition des enjeux. Cette étape a permis d'identifier et dénombrer les enjeux exposés aux aléas HGM dans la zone d'étude. L'emphase sur la position de l'enjeu par rapport à l'aléa constitue une analyse préliminaire du risque. Elle n'évalue certes pas le degré de l'impact que les enjeux pourraient subir, cependant elle identifie ces enjeux à travers le contact direct qu'ils pourraient avoir avec l'aléa afin de prévoir les actions à entreprendre.

La reconnaissance des formes a permis de cartographier 197 cônes alluviaux à l'échelle régionale. Le coefficient de Melton, déterminé sur ces cônes, révèle que les inondations

représentent le processus torrentiel dominant. Parmi ces cônes, une analyse fine sur cinq cônes a permis de se rendre compte de l'existence d'une dynamique fluviale marquée par la présence des processus d'incisions, d'aggradation et d'érosion. La présence des enjeux (parcelle agricole et résidence) sur ces cônes montre la pertinence de la reconnaissance des formes fluviales dans une mesure préventive et dans un contexte de planification de l'aménagement du territoire en tenant compte du risque torrentiel. Le croisement entre l'aléa et la position des enjeux sur ces cônes a conduit à une évaluation préliminaire du risque, montrant que trois résidences et des parcelles agricoles sont exposées aux risques torrentiels.

De toutes ces analyses réalisées découle une analyse du risque sans obstruction des ponceaux avec un LiDAR hydrocohérent, et une analyse du risque avec obstruction potentielle des ponceaux lorsque le LiDAR n'est pas hydrocohérent. Il en ressort que les zones exposées à un aléa de forte intensité et d'un risque élevé se présentent dans le cas d'une probable obstruction des ponceaux. Les outils SIG (ExZeco, Geomorphon landform), les paramètres morphométriques et les données LiDAR de haute résolution ont permis d'aboutir non seulement à une connaissance préliminaire du risque, mais aussi de relever les défis liés à l'évaluation du risque des PCE.

L'intensité des processus estimée également à partir des seuils de puissance spécifique a montré que les PCE présentent dans l'ensemble des seuils de puissance spécifique capables d'éroder des berges. Cependant, une validation est nécessaire afin d'avoir une meilleure idée de leur dynamique. Néanmoins, la validation effectuée sur les cours d'eau des cônes témoigne de l'existence d'un fort dynamisme qui se matérialise par la présence d'une forte incision dans la roche mère et des berges érodées dans un tronçon du cours d'eau sur le cône 2 du bassin versant de la rivière Hâtée. Les témoignages des riverains ont également permis de valider l'intensité des aléas prédits par ExZeco.

Ce projet a permis de caractériser la performance et les limites des outils SIG pour une meilleure application à l'échelle régionale dans le cadre du projet Constrictor auquel il est

associé. Comme performance, on note la simulation et la délimitation des surfaces de flux à partir des trajectoires préférentielles que peut prendre l'écoulement en ce qui concerne ExZeco, et l'extraction du fond de vallée pour Geomorphon landform. Quant aux limites, on note une nécessité de la validation sur le terrain pour les sites complexes à interpréter sur le LiDAR. Les zones anthropisées où les cours d'eau sont parfois canalisés, donc difficiles à observer sur le LiDAR, doivent nécessairement être validées. Sachant que cette phase pilote, compte tenu du temps, n'a pas pu aborder les aléas HGM dans les modèles d'incisions, en perspective, les pistes de recherches suivantes sont recommandées :

L'étude de la connectivité sédimentaire dans les modèles d'incisions et l'étude des indices de vulnérabilité et sensibilité dans l'évaluation du risque. Ces études complémentaires peuvent permettre d'amplifier les connaissances sur les risques dans les PCE de la région bas-laurentienne.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AESN. (2007). Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau | Association Rivière Rhône-Alpes Auvergne—ARRA<sup>2</sup>. <https://www.arraa.org/documents-techniques/manuel-de-restauration-hydromorphologique-des-cours-d-eau>
- AGRCQ. (2017). Guide sur la gestion des cours d'eau – Complet – AGRCQ. <https://agrcq.ca/guide-sur-la-gestion-des-cours-deau-complet/>
- Alber, A., Piégay, H. (2011). Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 125(3),343-360.
- Allinne, C. (2007). Les villes romaines face aux inondations. La place des données archéologiques dans l'étude des risques fluviaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.674>
- Ballais, J.-L., Chave, S., Delorme-Laurent, V., & Esposito, C. (2007). Hydrogéomorphologie et inondabilité. *Géographie physique et Quaternaire*, 61(1), 75-84. <https://doi.org/10.7202/029571ar>
- Benacchio, V., Dumont, F., Buffin-Bélanger, T., Biron, P. (2022). Évaluation Préliminaire du Risque lié aux Inondation (EPRI) : Méthode de calcul et produits de consultation. 16e Colloque sur les risques naturels au Québec - Congrès de l'ACFAS.
- Bertrand, M., Liébault, F., Piégay, H. (2017). Cartographie régionale de la susceptibilité aux laves torrentielles dans les Alpes du Sud. *Revue de géographie alpine*, 105-4. <https://doi.org/10.4000/rga.3530>
- Besnard, C. (2016). Application et développement de l'approche hydrogéomorphologique aux plaines alluviales du Québec méridional [Mémoire de maîtrise]. Université du Québec à Rimouski.
- Besnard, C., Bilé, V., Delisle Thibeault, A., Buffin-Belanger, T., Biron, P. (2023). Outils d'aide semi-automatisés pour l'identification des tronçons de cours d'eau sujets à obstruction et constriction—(Constrictor)—RA3 (Rapport d'étape RA3 ; p. 12 pages + annexes). Rapport remis au MSP.
- Biron, P.M., Choné, G., Buffin-Bélanger, T., Demers, S., Olsen, T. (2013a). Improvement of streams hydro-geomorphological assessment using LiDAR DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(15), 1808-1821. <https://doi.org/10.1002/esp.3425>
- Biron, P.M, Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Ouellet, M.-A., Choné, G., Cloutier, C.-A., Needelman, M. (2013b). Espace de liberté : Un cadre de gestion intégré pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques.
- Biron, P.M, Massey, W., Stämpfli, N. (2020). Analyse hydrogéomorphologique du bassin versant de la rivière BULSTRODE. Rapport présenté à l'Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet (COPERNIC) (p. 42).
- Boulet, Y., Gauthier, F., Buffin-Bélanger, T., Héту, B. (2022). Seuils de précipitation, variabilité spatio-temporelle et tendances climatiques dans les pluies torrentielles en

- Haute-Gaspésie, Québec. *Geohazards* 8, the 8th Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards.
- Bourgault, M.-A., Boivin, M., Roy, R., Desrochers, G., Anctil, F. (2022). Regards sur les mécanismes et les facteurs contrôlant les inondations des bassins versants du Québec méridional. Dans *Les inondations au Québec : Risques, aménagement du territoire, Impact socioéconomiques et transformations des vulnérabilités*. (7-28).
- Bravard, J.-P. (1994). L'incision des lits fluviaux : Du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles / The incision of river beds : from a natural and reversible morphodynamic phenomenon to irreversible impacts. *Revue de géographie de Lyon*, 69(1), 5-10. <https://doi.org/10.3406/geoca.1994.4231>
- Brierley, G. J., Fryirs, K. A. (2005). Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework | *Semantic Scholar*.
- Brookes, A. (1988). Channelized Rivers: Perspectives for Environmental Management | *Semantic Scholar*.
- Brookes, A. (1987). The distribution and management of channelized streams in Denmark—Brookes—1987—Regulated Rivers: Research & Management—Wiley Online Library. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/rrr.3450010103>
- Buffin-Bélanger, T., Héту, B. (2008). Les risques d'inondation sur les cônes alluviaux dans l'Est du Québec. In *Comptes Rendus de La 4ième Conference Canadienne Sur Les Georisques : Des Causes à La Gestion*. Presse de l'Université Laval, Québec, 359–366. 359–366.
- Buffin-Bélanger, T., Lachapelle, F., Biron, P., Boivin, M. (2023). Trajectoires et visées de l'hydrogéomorphologie au Québec. *Canadian Geographies / Géographies canadiennes*. *Wiley Online Library*.
- Cerema. (2020). Modélisation du ruissellement sur les bassins versants : La méthode ExZEco du Cerema pour identifier les zones d'écoulement | Cerema. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/modelisation-du-ruissellement-bassins-versants-methode>
- Choné, G., Benacchio, V., Biron, P., Buffin-Bélanger, T. (2020). Évaluation préliminaire du risque lié aux inondations : Poursuite du développement de la méthodologie et mise en œuvre (EPRI 2) (p. 176) [Rapport final]. Ministère de la Sécurité publique.
- Choné, G., Buffin-Bélanger, T., Biron, P.M (2017). Vers une évaluation préliminaire du risque d'inondation (EPRI) à grande échelle au Québec : Développement d'une méthodologie d'évaluation des aléas.
- Cour Supérieure du Québec. (2017). Décision—Tremblay c. Municipalité régionale de comté Charlevoix-Est—2017 QCCS 91.
- Dauphiné, A., Provitolo, D. (2007). La résilience : Un concept pour la gestion des risques : *Annales de géographie*, n° 654(2), 115-125. <https://doi.org/10.3917/ag.654.0115>
- Delisle, P. (2020). Analyse des facteurs de la variabilité spatiale de la largeur à plein bord et de la sinuosité des chenaux au Québec méridional [Mémoire de maîtrise]. Université du Québec à Trois-Rivières.
- Delorme, S., Gariépy-Girouard, É. (2024). Démystifier la restauration passive : Le cas du cône alluvial de la petite rivière Neigette. *Mém'Eau*, 11(1), 26-28.

- Demers, S., Buffin-Bélanger, T. (2011). Une méthode illustrée pour la sectorisation morphodynamique de la rivière Neigette (Québec). *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 55(3), 318-333. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.2011.00362.x>
- Demers, S., Olsen, T., Buffin-Bélanger, T., Marchand, J.-P., Biron, P. M., Morneau, F. (2014). L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : L'exemple de la rivière Matane (Québec). <https://journals.openedition.org/physio-geo/3813>
- Demers-Bouffard. (2021, 10 mai). Les aléas affectés par les changements climatiques : Effets sur la santé, vulnérabilités et mesures d'adaptation | INSPQ. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/2771>
- D'Ercole, R., Thouret, J.-C., Dollfus, O., Asté, J.-P. (1994). Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : Concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 82(4), 87. <https://doi.org/10.3406/rga.1994.3776>
- Dubé, J. (2005). Courbes régionales de géométrie hydraulique pour les rivières du Bas-Saint-Laurent [Conférence]. Congrès de l'ACFAS, Chicoutimi.
- Dugré, D. (2019). AgriEAU – Outil géomatique d'aide à la gestion et l'aménagement des cours d'eau ruraux. [Mémoire de maîtrise]. Université Laval, Québec.
- Dumont, F., Buffin-Belanger, T. (2022). Portrait des risques liés aux inondations dans les bassins versants des rivières Mitis et Coaticook à partir des données d'aide financière versée à la suite d'inondations depuis 1990. Dans *Les inondations au Québec* (Buffin-Bélanger, T., Maltais, D., Gauthier, M., p. 131-150). Presses de l'Université du Québec.
- Ferreira, V., Albariño, R., Larrañaga, A., LeRoy, C. J., Masese, F. O., Moretti, M. S. (2023). Ecosystem services provided by small streams: An overview. *Hydrobiologia*, 850(12-13), 2501-2535. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-05095-1>
- Fontaine, A., Locat, J., Noel, F., Turmel, D. (2013). Le logiciel Flow R comme outil d'analyse du danger coulées de débris le long de la façade maritime de Charlevoix, Québec. *Géo Montréal*, Université Laval, Québec.
- Frini, A., Besnard, C., Benabbou, L., Adda, M., Buffin-Bélanger, T. (2019). Outil de priorisation des bassins versants pour la gestion des risques des inondations dans le cadre de la mise en œuvre de l'initiative Info-Crue au Québec (p. 135) [Rapport final]. Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques.
- Fryirs, K. A. (2017). River sensitivity: A lost foundation concept in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 55-70. <https://doi.org/10.1002/esp.3940>
- Fryirs, K. A., Wheaton, J. M., Brierley, G. J. (2016). An approach for measuring confinement and assessing the influence of valley setting on river forms and processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 701-710. <https://doi.org/10.1002/esp.3893>
- Garitte, G. (2006). Les torrents de la vallée de la Clarée (Hautes Alpes, France). Évolution contemporaine, dynamique actuelle et analyse géographique des risques associés. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille. <https://theses.hal.science/tel-00121513>

- Gascon, É. (2019). Impacts et opportunités de la nouvelle gestion des inondations dans les domaines de la conception et de l'aménagement urbain. *Projets de paysage*, 20. <https://doi.org/10.4000/paysage.659>
- GIEC. (2014). Changements climatiques 2014, Incidences, adaptation et vulnérabilité (p. 34). Organisation météorologique mondiale.
- Girardin, P. (1910). Études de cônes de déjection : Le torrent de l'envers de Sollières en Maurienne. *Annales de Géographie*, 19(105), 193-208. <https://doi.org/10.3406/geo.1910.7695>
- Gravel, R. (2021). Communautés ichtyologiques des petits cours d'eau de la Montérégie et leur réponse à différents types d'interventions à des fins de drainage agricole : Rapport technique (p. 78 et annexes). Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.
- Graveline, M.-H., Germain, D. (2022). Disaster Risk Resilience: Conceptual Evolution, Key Issues, and Opportunities. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13(3), 330-341. <https://doi.org/10.1007/s13753-022-00419-0>
- Grelot, F. (2004). Gestion collective des inondations. Peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori? HAL. <https://theses.hal.science/tel-00420388/>
- Guillou, M. (2012). Analyse hydrologique et morphologique d'un cours d'eau agricole de la plaine du Saint-Laurent, Mémoire de maîtrise. Laval, Québec.
- Harader, E. (2015). L'impact du changement climatique sur les événements hydrologiques extrêmes des petits bassins versants méditerranéens : Le cas du bassin versant du Lez. Thèse de doctorat, Université de Toulouse. p 29-38.
- Hotte, M., Quirion, M. (2003). Guide Technique no 15, Traverses de cours d'eau, Sainte-Foy (Québec), Fondation de la faune du Québec et Fédération des producteurs de bois du Québec. 32p.
- Hubert, G., Vanssay, B. (2005). Le risque d'inondation et la cartographie réglementaire. Analyse de l'efficacité, des impacts et de l'appropriation locale de la politique de prévention. Février 2005. - Centre-Val de Loire.
- Hugerot, T. (2020). Trajectoires paysagères des cônes de déjection torrentiels des Alpes du nord (Maurienne et Tarentaise). Thèse de doctorat. Université Savoie Mont Blanc
- Jackson, L. E., Kostaschuck, R. A., MacDonald, G. (1987). Of debris flow hazard on alluvial fan— Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, Volume VII1987.
- Jugie, M. (2018). Trajectoire hydrogéomorphologique d'un petit cours d'eau périurbain francilien : Aménagement, « désaménagement » ? Université Panthéon-Sorbonne - Paris I <https://theses.hal.science/tel-02181434>
- Kaitna, R., Huebl, J. (2013). Silent Witnesses for Torrential Processes. In M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel, F. Rudolf-Miklau (Éds.), *Dating Torrential Processes on Fans and Cones* (Vol. 47, p. 111-130). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4336-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4336-6_7)
- Kermisch, C. (2012). Vers une définition multidimensionnelle du risque. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.12214>

- Khazani, R., Drolet, P.-É., Janie, L. (2020). Caractérisation sommaire des cours d'eau des secteurs de Buckingham et de Masson-Angers ville de Gatineau, comité du bassin versant de la rivière du Lièvre (p. 30).
- Landon, N. (2007). Du constat d'enfoncement du lit fluvial aux actions de recharge sédimentaire : Quelles solutions pour une gestion raisonnée de nos cours d'eau ? [https://www.academia.edu/68222375/Du\\_constat\\_denfoncement\\_du\\_lit\\_fluvial\\_aux\\_actions\\_de\\_recharge\\_s%C3%A9dimentaire\\_quelles\\_solutions\\_pour\\_une\\_gestion\\_raisonn%C3%A9e\\_de\\_nos\\_cours\\_deau](https://www.academia.edu/68222375/Du_constat_denfoncement_du_lit_fluvial_aux_actions_de_recharge_s%C3%A9dimentaire_quelles_solutions_pour_une_gestion_raisonn%C3%A9e_de_nos_cours_deau)
- Landon, N., Piégay, H. (1994). L'incision d'affluents méditerranéens du Rhône : La Drôme et l'Ardèche / The incision of two sub-mediterranean tributaries of the Rhône : the Drôme and the Ardèche. *Revue de géographie de Lyon*, 69(1), 63-72. <https://doi.org/10.3406/geoca.1994.4239>
- Lelièvre, M.-A., Buffin-Bélanger, T., Morneau, F. (2008, 20 mai). L'approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones à risque d'inondation dans les vallées de petites et moyennes tailles : Un exemple commenté pour la vallée de la Rivière-au-Renard. Comptes rendus de la 4<sup>ième</sup> Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion, Québec.
- Lespez, L., Beauchamp, A., Germaine, M. A., Barraud, R. (2017). De l'aménagement au désaménagement : Les temps de l'environnement des systèmes fluviaux ordinaires de l'Ouest de la France. Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau : Controverses et représentations, 27-42.
- Malavoi, J. R., Souchon, Y. (1996). Dynamique fluviale et dynamique écologique. *La Houille Blanche*, 82(6-7), 98-107. <https://doi.org/10.1051/lhb/1996076>
- Malavoi, J.-R., Bravard, J.-P. (2011). Éléments d'hydromorphologie fluviale. *Physio-Géo.*, 5, 224. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.1532>
- Malo, M., Comeau, F.-A., Séjourné, S. (2015). Établissement des bassins géologiques analogues aux structures géologiques en Gaspésie, dans le Bas-Saint-Laurent et dans le golfe du Saint-Laurent—Recherche.
- Maltais, M., Jautzy, T., Buffin-Bélanger, T. (2021). Développement de connaissances et d'outils pour l'analyse et la gestion des aléas hydrogéomorphologiques (p. 164) [Rapport final]. Ministère de la Sécurité publique.
- Marchi, L., Brochot, S. (2000). Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises. Morphométrie et processus de transport solide torrentiel. *Revue de géographie alpine*, 88(3), 23-38. <https://doi.org/10.3406/rga.2000.2999>
- Massé, S., Demers, S., Besnard, C., Buffin-Bélanger, T., Biron, P. M., Choné, G., Massey, W. (2020). Development of a mapping approach encompassing most fluvial processes: Lessons learned from the freedom space for rivers concept in Quebec (Canada). *River Research and Applications*, 36(6), 947-959. <https://doi.org/10.1002/rra.3567>
- Masson, M., Garry, G., Ballais, J.-L. (1996). Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique (p. 100). Les Editions Villes et Territoires. <https://amu.hal.science/hal-01565209>

- Mazgareanu, I., Biron, P. M., Buffin-Bélanger, T. (2020). A fuzzy GIS model to determine confluence morphological sensitivity to tributary inputs at the watershed scale. *Geomorphology*, 357, 107095. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107095>
- MELCCFP. (s. d.). Initiatives de cartographie des zones inondables et de mobilité et de cartographie prévisionnelle. Gouvernement du Québec.
- Meschinet De Richemond, N., Reghezza, M. (2010). La gestion du risque en France : Contre ou avec le territoire ? *Annales de géographie*, n° 673(3), 248-267. <https://doi.org/10.3917/ag.673.0248>
- Montané, A., Freddy, V., Buffin-Bélanger, T., Vento, O., Masson, M. (2015). Cartographie hydrogéomorphologique : Émergence d'utilisations règlementaires en France. *Physio-Géo*, 9, 37-60. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.4397>
- Morel, M., Piton, G., Evin, G., Bouteiller, C. L. (2022). Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord. Caractériser la production sédimentaire action 3 ; p. 95.
- MPO. (2022). Pêches et Océans Canada. Code de Pratique : Entretien de ponceaux. 4.
- MSP. (s. d). Action 6—Identifier et caractériser les aléas potentiels. Étape 3.1 Identification des risques. [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/securite-publique/publications-adm/publications-secteurs/securite-civile/soutien-municipalites/fiches-actions-gestion-risques/fiche\\_6\\_caracterisation\\_aleas.pdf?1637180095](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/securite-publique/publications-adm/publications-secteurs/securite-civile/soutien-municipalites/fiches-actions-gestion-risques/fiche_6_caracterisation_aleas.pdf?1637180095)
- Nanson, G. C., Croke, J. C. (1992). A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4(6), 459-486. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(92\)90039-Q](https://doi.org/10.1016/0169-555X(92)90039-Q)
- National Research Council. (1996). Alluvial Fan Flooding—National Research Council, Division on Earth and Life Studies, Commission on Geosciences, Environment and Resources, Committee on Alluvial Fan Flooding.
- O'Brien, G. R., Wheaton, J. M., Fryirs, K., Macfarlane, W. W., Brierley, G., Whitehead, K., Gilbert, J., Volk, C. (2019). Mapping valley bottom confinement at the network scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(9), 1828-1845. <https://doi.org/10.1002/esp.4615>
- OBVNEBSL. (2015). Organisme des bassins versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent Portrait diagnostic des bassins versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent. [www.obv.nordestbsl.org](http://www.obv.nordestbsl.org)
- OBVRLY. (2022). Plan directeur du lac Bell, municipalité de Saint-Élie-de-Caxton—2022. Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY), Saint Barnabé.
- Parent, V. (2013). Suivi hydrogéomorphologique d'un cours d'eau étouffé par un aménagement d'urgence : Cas du cours d'eau Bonhomme-Morency au Bas-St-Laurent, Québec. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en géographie. Université du Québec à Montréal.
- Parent, V., Buffin-Bélanger, T., Nozais, C. (2015). L'histoire d'un cours d'eau étouffé par un aménagement d'urgence : Le cas du Bonhomme-Morency au Bas-Saint-Laurent. *L'Estuaire*, 75, Article 75.

- Petit, F., Éric, H., Geoffrey, H., Yannick, L., Julien, M., Alexandre, P., Jean, V. C. (2007). La typologie et les caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau wallons. Laboratoire d'hydrographie et de géomorphologie fluviale, Université de Liège.
- Piégay, H., Lay, Y.-F. L., Moulin, B. (2005). *Les risques liés aux embâcles de bois dans les cours d'eau : État des connaissances et principes de gestion*. Dans Vallauri D., André J., Dodelin B., Eynard-Machet R. et Rambaud D. (coord.), Bois mort et à cavités. *Une clé pour des forêts vivantes*. Paris, Lavoisier et Editions Tec et Doc, p. 193-202.
- Pirolley, A., Bergeron, N. (2020). Franchissement piscicole dans les ponceaux : Ouvrages à simulation de cours d'eau et conception Ichtyocompatible. INRS, Centre Eau, Terre et Environnement. *Archives nationales du Québec*.
- Pons, F. (2010). EXZEKO: A GIS and DEM based method for pre-determination of flood risk related to direct runoff and flash floods. 9th International Conférence on Hydroinformatics HIC 2010 Tianjin, Chine.
- Pons, F., Bader, B., Moulin, C., Panafieu, B., Verrhiest-Leblanc, G. (2020). Modélisation du ruissellement, application de la méthode Exzeke sur 8 départements de l'Arc méditerranéen. Colloque SHF.
- Pruneau, A. (2022). Etude de la sensibilité morphodynamique de six cônes alluviaux en Estrie par l'approche hydrogéomorphologique. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke. 90 p
- Rickenmann, D., Scheidl, C. (2013). Debris-Flow Runout and Deposition on the Fan. In M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel, & F. Rudolf-Miklau (Éds.), *Dating Torrential Processes on Fans and Cones* (Vol. 47, p. 75-93). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4336-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4336-6_5)
- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussettini, M. (2013). A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology*, 180-181, 96-108. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.009>
- ROBVQ. (2018). *Gestion intégrée des risques d'inondation. Pistes de solutions pour sa mise en œuvre au Québec*.
- Roux, C., Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L., Piégay, H. (2015). "Fluvial Corridor": A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology*, 242, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.018>
- Scarwell, H.-J., Laganier, R. (2017). Risque d'inondation et aménagement durable des territoires. Presses universitaires du Septentrion. <https://books.openedition.org/septentrion/15670>
- Schall, J. D., Thompson, P. L., Zerges, S. M., Kilgore, R. T., Morris, J. L. (2012). Hydraulic Design of Highway Culverts, *Third Edition / Semantic Scholar*.
- Schmidt, L., Bravard, J. J., Rey, F. (2013). Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement ...) et mieux gérer les formes fluviales. Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques : Pourquoi ? Comment ? Chocat, B. (coord), ASTEE, p. 84 - 93.
- Sechu, G. L., Nilsson, B., Iversen, B. V., Greve, M. B., Børgesen, C. D., Greve, M. H. (2021). A Stepwise GIS Approach for the Delineation of River Valley Bottom within

- Drainage Basins Using a Cost Distance Accumulation Analysis. *Water*, 13(6), 827. <https://doi.org/10.3390/w13060827>
- Sholtes, J. S., Yochum, S. E., Scott, J. A., Bledsoe, B. P. (2018). Longitudinal variability of geomorphic response to floods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(15), 3099-3113. <https://doi.org/10.1002/esp.4472>
- Stepinski, T. F., Jasiewicz, J. (2012). *Geomorphons—A new approach to classification of landforms*. *Geomorphometry.org/2011* <https://www.geomorphometry.org/uploads/pdf/pdf2011/StepinskiJasiewicz2011geomorphometry.pdf>
- Strahler, A. N. (1954a). Quantitative geomorphology of erosional landscapes, C.-R. 19th Intern. Geol. Cong., Algiers, 1952, p. 341-354.
- Tanguy, M. (2012). Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise : Analyse préliminaire (R1395 ; Numéro R1395). INRS-Eau, Terre et Environnement. <https://espace.inrs.ca/id/eprint/1641/>
- Taous, M., Obda, A., Amyay, M., Laouanne, K., Tribak, M., Akdim, B., Roca, M. a. M., Bellavista, G. F. i, Brugués, R. J. (2010). *Cartographie et zonage de l'aléa d'inondation a Taza (Maroc). Application de la « Methode Géomorphologique Intégrée*.
- Tomety, Y. D., Buffin-Belanger, T. (2023). Cartographie des zones inondables dans la MRC de Bonaventure. Volet 2—Analyse du risque lié aux aléas fluviaux. (p. 93 et annexes) [Rapport d'étape]. Rapport remis au MAMH.
- Valois, I. (2008). Aménagement et entretien des ponceaux municipaux. Maitrise en environnement. Centre de formation en environnement de l'université de Sherbrooke. 172 p.
- Veyret, Y., Reghezza, M. (2005). Aléas et risques dans l'analyse géographique. Annales des mines. Responsabilité et environnement, octobre 2005. Document. Laboratoire Gecko. Université de Paris X-Nanterre. p. 65.
- Vigreux, T., Aoustin, D., Flotté, P. (2011). Enregistrement sédimentaire et environnement Holocène de la plaine alluviale du Giessen (Scherwiller, Bas-Rhin, Alsace). 22/2, 129-145. <https://doi.org/10.4000/quaenaire.5912>
- Vinet, F. (2018). *Inondations*. Iste editions.
- Wasson, J. G., Malavoi, J. R., Maridet, L., Souchon, Y., Paulin, L. (1995). Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Cemagref Groupement de Lyon.
- Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C., Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1(1), 61-66. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>
- Wohl, E. (2017). The significance of small streams. *Frontiers of Earth Science*, 11(3), 447-456. <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0647-y>
- Yochum, S. E., Sholtes, J. S., Scott, J. A., Bledsoe, B. P. (2017). Stream power framework for predicting geomorphic change: The 2013 Colorado Front Range flood. *Geomorphology*, 292, 178-192. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.004>