

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DYNAMIQUE DE L'ALÉA TORRENTIEL AU LONG DE LA RIVIÈRE
CHAUDIÈRE : ANALYSE HISTORIQUE ET MODÉLISATION

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAITRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

JO-ANNIE CONSTANTINEAU

JANVIER 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal 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 Montréal 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 l'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.»

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de maîtrise, Daniel Germain, qui a su me transmettre sa passion pour la géomorphologie dynamique, et ce, dès le premier cours de Formes et Processus au baccalauréat en géographie. Merci pour les opportunités professionnelles tout au long de mon parcours scolaire ainsi que pour ton support inconditionnel face à mes mille et une idées pendant mon parcours de maîtrise. Les périples de terrain en Gaspésie avec Rose-Marie, Francis et toi font partie de mes meilleurs souvenirs. Merci également à Olivier Caron, pour ton appui dans mes expérimentations avec les SIG et pour les jasettes dans le cadre de porte de ton bureau. Merci à mes collègues de bureau, Ali, *thank you for your ongoing encouragement* et Marie-Hélène, qui m'a embarqué dans de belles opportunités professionnelles.

Merci au département de géographie de l'UQÀM, où j'ai pu explorer les nombreuses facettes de cette discipline que j'adore par l'entremise des enseignements de professeur-es passionnants. Je serai éternellement reconnaissante d'y avoir formé de belles amitiés, Camille, Isabelle, Daphné, Charles-Élie, Ian, Victor, Étienne, Noémie, Francis, Charlotte et même d'y avoir trouvé l'amour. Merci Vincent pour ton support pendant ces dernières années et tes mots d'encouragement lorsque la motivation était à son plus bas.

Merci à mes collègues des Bureaux de projets – inondations (MAMH), qui m'ont donné de la motivation et des conseils judicieux pour terminer. Merci à mon directeur, Thierry, pour sa flexibilité quant à l'acheminement de ce projet et un merci spécial à Jade d'avoir été une oreille attentive pour mes inquiétudes de fin de maîtrise.

Merci à ma famille, ma mère Joanne et mon frère Julien pour leur support continu. Surtout, merci à ma grand-mère Yvette, dont la force intérieure m'inspire chaque jour et qui n'a jamais compris pourquoi j'étais encore à l'école, j'ai enfin fini mamie!

DÉDICACE

À mon père Normand, qui a été un exemple
de courage et de persévérance jusqu'au
dernier instant.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xii
Liste des symboles et des unités	xiii
RÉSUMÉ	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I Revue de la littérature	6
1.1 Torrentialité	6
1.2 Le torrent comme entité géomorphologique.....	8
1.2.1 Définitions.....	8
1.2.2 La pente comme critère de base	9
1.2.3 L'organisation du bassin-versant torrentiel.....	12
1.3 La dynamique hydrosédimentaire des torrents	14
1.4 Risques et aléas torrentiels.....	15
1.4.1 Notions de risques et concepts associés	15
1.4.2 Aléa torrentiel	16
1.4.3 Facteurs déclencheurs des crues torrentielles	18
1.4.4 Dynamique des bassins-versants torrentiels.....	20
CHAPITRE II Territoire d'étude	22
2.1 Localisation et physiographie du bassin-versant	22

2.2	Hydrographie	25
2.3	Contexte géologique et géomorphologique	27
2.4	Climat et végétation	29
CHAPITRE III Méthodologie.....		31
3.1	Portrait de l'aléa torrentiel	32
3.1.1	Recension des évènements historiques	32
3.1.2	Analyse des conditions météorologiques	35
3.2	Caractérisation géomorphologique des sous-bassins-versants	37
3.2.1	Identification et localisation des cônes alluviaux.....	37
3.2.2	Caractérisation et indices morphométriques	37
3.3	Analyse et modélisation des facteurs de vulnérabilité.....	40
3.3.1	Analyse des changements de l'occupation du sol	40
3.3.2	Analyse multicritère et indice de vulnérabilité environnementale.....	41
CHAPITRE IV Résultats		46
4.1	Recension des évènements torrentiels	46
4.1.1	Répartition temporelle des évènements au cours des 20 ^e et 21 ^e siècles..	46
4.1.2	Répartition géographique des évènements torrentiels.....	49
4.2	Conditions hydrométéorologiques d'occurrence et facteurs déclencheurs	53
4.2.1	Facteurs déclencheurs de nature météorologique	57
4.2.2	Facteurs déclencheurs de nature anthropique	58
4.2.3	Facteurs déclencheurs de nature géomorphologique	60
4.3	Caractérisation des sous-bassins-versants	62
4.3.1	Identification des cônes alluviaux	62
4.3.2	Pente.....	65
4.3.3	Densité de drainage	70
4.3.4	Processus torrentiel	72
4.4	Facteurs de vulnérabilité environnementale	72
4.4.1	Évolution de l'occupation du sol depuis 2000	72
4.4.2	Analyse multicritère des facteurs de vulnérabilité	75
CHAPITRE V Discussion.....		81
5.1	Portrait de l'aléa torrentiel	81

5.1.1	Dynamique temporelle de l'aléa torrentiel.....	83
5.1.2	Dynamique spatiale de l'aléa torrentiel.....	85
5.2	Facteurs de vulnérabilité à l'aléa torrentiel dans le bassin-versant de la rivière Chaudière	86
5.2.1	Facteurs météorologiques	86
5.2.2	Changements dans l'occupation du sol.....	87
5.2.3	Facteurs géomorphologiques	88
5.3	Pertinence de l'analyse environnementale multicritère pour cibler les zones vulnérables	91
5.4	Limites et perspectives futures	93
	CONCLUSION.....	96
	ANNEXE A TABLEAU DE RECENSION HISTORIQUE.....	99
	ANNEXE B CARACTÉRISATION DES SOUS-BASSINS VERSANTS	124
	BIBLIOGRAPHIE	128

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 1.1 Classification selon les travaux de Besson (1996) des différents types de rivières afin de distinguer la rivière torrentielle du torrent en fonction de critères hydrauliques et sédimentaires (Liébault, 2003; p.26).	10
Figure 1.2 Diagramme conceptuel des limites entre ruisseaux, torrents, rivières torrentielles et rivières selon la pente et la fréquence de l'activité géomorphologique (Piton et al., 2018; p.12).	11
Figure 1.3 Schématisation du bassin-versant torrentiel de Schumm (1977) (Recking et al., 2012; p.9).	12
Figure 1.4 Différents types d'écoulements torrentiels par Meunier (1989) (Piton et al., 2018; p.14).	15
Figure 1.5 Schématisation des notions de risques et concepts associés (GIEC, 2012; p.3).	16
Figure 2.1 Grandes unités naturelles du bassin-versant de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014; p.5)	23
Figure 2.2 Profil de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014; p.27)	24
Figure 2.3 Principaux tributaires de la rivière Chaudière (COBARIC, 2012; p.1).....	26
Figure 2.4 Cartographie des dépôts de surface et des formes d'origine quaternaire dans le bassin-versant de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014; p.34).	28
Figure 4.1 Répartition des évènements de crues torrentielles par période quinquennale de 1900 à aujourd'hui dans le BVRC.	47
Figure 4.2 Répartition des évènements recensés par mois pour la période de 1900 à aujourd'hui dans le BVRC.	48

Figure 4.3 Nombre de municipalités affectées par chacun des évènements historiques recensés.	48
Figure 4.4 Représentation géographique des évènements torrentiels recensés de 1900 à aujourd’hui et niveau de précision associé à leur localisation.	50
Figure 4.5 Répartition des évènements recensés en fonction des limites municipales.	52
Figure 4.6 Répartition des évènements recensés en fonction des limites des sous-bassins-versants.....	52
Figure 4.7 Conditions hydrométéorologiques pour le mois de juin. Données mensuelles de pluie, représentées par l’histogramme. Débit moyen (en vert) et maximum mensuel (en rouge) enregistrés pour les années correspondantes. Débit journalier associé à un évènement torrentiel, représenté par un triangle noir.	54
Figure 4.8 Conditions hydrométéorologiques pour le mois de juillet. Données mensuelles de pluie, représentées par l’histogramme. Débit moyen (en vert) et maximum mensuel (en rouge) enregistrés pour les années correspondantes. Débit journalier associé à un évènement torrentiel, représenté par un triangle noir.....	55
Figure 4.9 Conditions hydrométéorologiques pour le mois d’août. Données mensuelles de pluie, représentées par l’histogramme. Débit moyen (en vert) et maximum mensuels (en rouge) enregistrés pour les années correspondantes. Débit journalier associé à un évènement torrentiel, représenté par un triangle noir.	55
Figure 4.10 Conditions hydrométéorologiques pour le mois de septembre. Données mensuelles de pluie, représentées par l’histogramme. Débit moyen (en vert) et maximum mensuel (en rouge) enregistrés pour les années correspondantes. Débit journalier associé à un évènement torrentiel, représenté par un triangle noir.....	56
Figure 4.11 L’inondation du 30 août 1971 à Saint-Étienne-de-Lauzon suite au passage de la tempête tropicale Doria.	58
Figure 4.12 Dégâts à Saint-Georges suite à l’inondation du 31 juillet 1917 (BANQ, s.d.a).	60
Figure 4.13 Crue du ruisseau d’Ardoise le 13 août 1990 (Le Soleil, 1990; p.A-3).	61

Figure 4.14 Localisation (en rouge) des sous-bassins-versants qui présentent un cône alluvial à leur embouchure dans le bassin-versant de la rivière Chaudière.	63
Figure 4.15 Cônes alluviaux présents à l'embouchure des rivières Cliche (à gauche) et Pouliot (à droite) à partir des images satellitaires de Google Earth (2023).	64
Figure 4.16 Relation entre la pente moyenne des SBV et la pente moyenne de leur cours d'eau principal. Les triangles oranges indiquent les SBV avec un cône à leur embouchure et les cercles verts les SBV qui en sont dépourvus.	66
Figure 4.17 Pentes moyennes des cours d'eau selon la typologie de Besson (1996). ..	67
Figure 4.18 Pente moyenne des sous bassin-versant de niveau 2 au sein du BVRC..	69
Figure 4.19 Moyenne de la densité de drainage par SBV.....	71
Figure 4.20 Carte de densité de drainage à une résolution de 10 mètres du BVRC. ..	71
Figure 4.21 Processus torrentiels dominants en fonction de la relation entre le coefficient de Melton et la longueur du bassin-versant (km) selon Melton (1957) (Wilford et al., 2004).....	72
Figure 4.22 Évolution de l'occupation du sol, à partir des données de couvertures des terres du Canada (2020) entre les années 2000, 2010 et 2020.	73
Figure 4.23 Changement de l'occupation du sol entre les années 2000, 2010 et 2020 à partir des données de couvertures des terres du Canada (2020).	74
Figure 4.24 Moyenne par SBV pour la période de 2000 à 2020 du changement de surfaces urbanisées à partir des données de Couvertures des terres du Canada (2020).....	75
Figure 4.25 Représentation par SBV de l'indice standardisé de pente (de 0 à 1).	77
Figure 4.26 Représentation par SBV de l'indice standardisé d'occupation du sol (de 0 à 1).....	77
Figure 4.27 Représentation par SBV de l'indice standardisé de ruissellement	77
Figure 4.28 Résultats de l'analyse multicritère à une résolution de 30 m pour le BVRC (de 0 à 1)	79
Figure 4.29 Moyenne de l'analyse multicritère par SBV	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau 1.1 Différentes définitions du torrent issue de la littérature scientifique depuis le 19 ^e siècle.....	8
Tableau 3.1 Indices morphométriques, méthode de calcul et sources associées.	38
Tableau 3.2 Catégories d'occupation du sol par Agriculture Canada (2020) et classe du GIEC correspondantes.	40
Tableau 3.3 Pondération de l'indice de pente (en pourcentage) selon la contribution au ruissellement de surface à partir des travaux de Mailhot et al. (2008)	42
Tableau 3.4 Catégories provenant des données de Couvertures des terres du Canada (2020) utilisées pour l'indice d'occupation du sol.	43
Tableau 3.5 Classes des catégories d'utilisation du sol et GridCode (GC) associé aux valeurs de la couche raster de Couvertures des terres du Canada (2020).	43
Tableau 3.6 Indice de potentiel de ruissellement à partir du classement des sols minéraux à partir des travaux de Gagnée et al. (2013).	44
Tableau 3.7 Pondération des indices standardisés de pente, d'utilisation du sol et de potentiel de ruissellement dans l'analyse multicritère de la vulnérabilité environnementale.	45
Tableau 4.1 Sous-bassins-versants ayant été affectés par plus de trois évènements torrentiels incluant le nombre d'évènement associé, la superficie, la pente moyenne (%) et la présence (1) ou l'absence (0) de cône alluvial.....	53
Tableau 5.1 Caractéristiques morphométriques des sous bassin-versants avec 3 évènements et plus recensés.....	88

Tableau 5.2 Comparaison des résultats obtenus à partir de l'analyse multicritère pour les SBV avec plus de trois évènements torrentiels recensés.	91
--	----

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AMC	Analyse multicritère
BDC	Base de données canadienne sur les catastrophes
BV	Bassin-versant
BVRC	Bassin-versant de la rivière Chaudière
COBARIC	Comité de bassin de la rivière Chaudière
MAMH	Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation
MELCCFP	Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MSP	Ministère de la Sécurité publique (Québec)
MSPC	Ministère de la Sécurité publique du Canada
PDE	Plan directeur de l'eau
SBV	Sous-bassin-versant
SIG	Système d'information géographique

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

%	Pourcent
Q _{moy}	Débit moyen
Q _{max}	Débit maximum
Mm	Millimètre
Km	Kilomètre
Km ²	Kilomètre carré
M ³ /sec	Mètre cube par seconde

RÉSUMÉ

Dans le bassin-versant de la rivière Chaudière, les inondations sont partie intégrante de la réalité territoriale. En effet, de nombreuses études ont été réalisées dans les dernières années concernant les inondations en eau libre et par embâcle. Néanmoins, on observe que les inondations torrentielles, ou crues torrentielles, bien qu'omniprésentes dans la région, sont très peu documentées à ce jour. Le présent mémoire s'intéresse à la dynamique spatio-temporelle de ces événements et aux facteurs aggravants présents sur le territoire qui tendent à amplifier le phénomène. Par une double approche qualitative et quantitative, qui combine une recension historique, la caractérisation des sous-bassins-versants et la modélisation des facteurs de vulnérabilité environnementale, nous avons dressé un premier portrait de l'aléa torrentiel à l'échelle du bassin-versant de la rivière Chaudière. Ainsi, nous avons pu répertorier 53 événements à caractère torrentiel pour la période de 1900 à aujourd'hui. La collecte des informations liées aux crues torrentielles, soit les facteurs météorologiques, anthropiques et géomorphologiques ont permis d'établir des constats généraux quant à l'occurrence de celles-ci. L'occurrence des événements à caractère torrentiel semble premièrement liée aux passages d'événements météorologiques extrêmes. Les facteurs aggravants consistent en un aménagement du territoire qui accroît le ruissellement (augmentation des surfaces minéralisées et diminution des forêts, prairies et milieux humides) et une disposition géomorphologique des tributaires (forte pente et compacité) qui provoque une amplification du ruissellement lors de fortes précipitations. L'analyse multicritère repose sur l'addition d'indices amplifiant le ruissellement lors de fortes précipitations (pente, occupation du sol et potentiel de ruissellement). La comparaison entre les sous-bassins-versants présentant les valeurs les plus élevées et ceux ayant connu le plus d'événements d'inondation selon la recension historique a démontré la pertinence de cette méthode pour identifier, de manière préliminaire, les sous-bassins-versants potentiellement vulnérables à l'aléa torrentiel. Cette étude se veut donc un premier jalon dans l'acquisition de connaissances sur la dynamique torrentielle dans le bassin-versant de la rivière Chaudière.

Mots clés : Inondation, torrents, crues torrentielles, pluies torrentielles, aléas torrentiels, bassin-versant de la rivière Chaudière, facteurs aggravants, conditions hydrométéorologiques.

ABSTRACT

In the Chaudière River watershed, flooding is an integral part of the local reality. Indeed, numerous studies have been carried out recently on open-water and ice-jam flooding. However, torrential flooding, although omnipresent in the region, has been little documented. This thesis focuses on the spatio-temporal dynamics of these events and the aggravating factors present in the area that tend to amplify the phenomenon. Using a dual qualitative and quantitative approach, combining a historical review, characterization of sub-watersheds and modelling of environmental vulnerability factors, we have attempted to draw up an initial portrait of the torrential hazard on the scale of the Chaudière River watershed. We were able to list 53 torrential events from 1900 to the present day. The collection of information on torrential flooding, i.e. meteorological, anthropogenic and geomorphological factors, has enabled us to establish some general observations on the occurrence of torrential flooding. Thus, the occurrence of torrential events seems to be primarily linked to the passage of extreme weather events. Aggravating factors include land-use planning that amplifies runoff (increase in mineralized surfaces and reduction in forests, meadows and wetlands) and the geomorphological layout of tributaries (steep slopes and compactness), which amplifies runoff during heavy precipitation. The multi-criteria analysis is based on the addition of indices that amplify runoff during heavy precipitation (slope, land use and runoff potential). A comparison between the sub-catchments with the highest values and those that have experienced the most flooding events according to the historical review demonstrated the relevance of this method for identifying, on a preliminary basis, sub-catchments potentially vulnerable to torrential hazard. This study is therefore a first step in the acquisition of knowledge on torrential dynamics in the Chaudière River.

Keywords: Floods, torrentiel hazards, Chaudiere River watershed, multi-criteria analysis, morphometric analysis, heavy rainfall.

INTRODUCTION

Selon le plus récent rapport (2023) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les changements climatiques provoquent une intensification du cycle hydrologique à l'échelle mondiale. Cela se traduit, entre autres, par l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes hydrologiques extrêmes, dont les événements de précipitation intense (Beniston et Stephenson, 2004 ; Planton et al., 2005 ; Beniston, 2009 ; Giorgi et al., 2011 ; GIEC, 2023). Au Canada, les pluies torrentielles sont la deuxième cause principale d'inondation et provoquent un ruissellement rapide et des aléas hydrogéomorphologiques importants, tels que les aléas torrentiels (Beniston et Stephenson, 2004 ; Keiler et al., 2010 ; GIEC, 2012).

L'aléa torrentiel désigne la probabilité qu'un événement d'intensité élevée se produise dans les cours d'eau de montagne, plus précisément au niveau des torrents ou des rivières caractérisées par un régime torrentiel, ainsi que les processus géomorphologiques qui en résultent (Recking et al., 2012 ; Whol, 2005 ; Naaim-Bouvert et Richard, 2015). Ce concept inclut généralement deux types d'événements majeurs : la crue torrentielle et la lave torrentielle. Ces phénomènes, bien que partagés dans leur nature extrême, diffèrent principalement par la pente du cours d'eau et la composition de leur charge sédimentaire (Besson, 1996 ; Ancey, 2014). Ces événements se caractérisent en particulier par des débits exceptionnellement élevés, surtout dans les petits cours d'eau, accompagnés d'une charge sédimentaire considérable, ce qui entraîne des altérations rapides et notables du paysage environnant (Garitte, 2006 ; Theler, 2010 ; Whol, 2005).

Les phénomènes torrentiels sont des événements difficiles à circonscrire dans le temps et dans l'espace dû à leur caractère sporadique et soudain (Borga et al., 2008 ; Piton et

al., 2018). Le manque de données historiques, la faible couverture des stations pluviométriques et météorologiques ainsi que la courte durée de ces événements expliquent en partie le fait que les crues torrentielles sont, à ce jour, les phénomènes hydrogéomorphologiques les moins documentés (Borga et al., 2008 ; Borga et al., 2014 ; Recking et al., 2012). Malgré la multiplication des études sur les divers phénomènes torrentiels (coulée de débris, lave torrentielle) à travers différentes approches disciplinaires (hydraulique, ingénierie, hydrologie, géomorphologie), les connaissances liées au fonctionnement (Bracken et Croke, 2007 ; Liébault et al., 2010) et aux mécanismes de déclenchement (Borga et al., 2008 ; Collier, 2007 ; Younis et al., 2008) des aléas torrentiels demeurent encore lacunaires, et ce, particulièrement dans le contexte québécois (Buffin-Bélanger dans Locat et al., 2008). Ces lacunes découlent, pour la plupart, de la complexité des interactions entre les variables météorologiques, hydrologiques et géomorphologiques (Borga et al., 2014).

Dans les Appalaches du nord-est de l'Amérique du Nord, et particulièrement dans la région de la Beauce (Québec), certains tributaires de la rivière Chaudière sont très dynamiques dû au contexte physiographique du bassin-versant (Juneau, 2019 ; COBARIC, 2014 ; Biron et al., 2020). En effet, le relief accidenté ainsi que les fortes pentes favorisent une réponse hydrologique rapide, parfois sous forme de crues torrentielles, lors d'épisodes de pluies intenses (COBARIC, 2014). Ces événements sont alors susceptibles de provoquer une augmentation des débits de pointe, une montée rapide du niveau d'eau, une érosion des berges et un transport sédimentaire important (COBARIC, 2014 ; Juneau, 2020). Historiquement, les tributaires torrentiels, avec généralement un fonctionnement de nature intermittente, sont à l'origine de plusieurs catastrophes hydrologiques dans la région (Grenier, 2005 ; COBARIC, 2014).

À titre d'exemple, le passage de la tempête post-tropicale Irène en août 2011 a entraîné des précipitations supérieures à 90 millimètres en quelques heures, provoquant une augmentation rapide des débits et des inondations sur l'ensemble du territoire beauceron (Environnement Canada, 2014). Les dommages causés par la pluie ont surtout été répertoriés au niveau des bassins-versants tributaires (Radio-Canada, 2011

; La Presse, 2011), lesquels ont eu une réponse hydrologique très rapide en raison de leur pente forte (COBARIC, 2019). Cet évènement a causé des dégâts importants à l'environnement et aux infrastructures dans 13 municipalités du territoire (Figure 1) (La Presse 2011, Radio-Canada 2011, Le Soleil 2011, COBARIC, 2019), contribuant ainsi à la prise de conscience de la vulnérabilité de la région aux crues et inondations torrentielles.

Figure A. Photos prises des dommages suivant le passage de l'ouragan Irène en août 2011 dans la municipalité de Saint-Frédéric, au sein du bassin-versant de la rivière Chaudière (COBARIC, 2019).



Les inondations sont un phénomène courant pour le bassin-versant de la rivière Chaudière (BVRC), qui s'étend sur une superficie de près de 6000 km². Historiquement, le premier épisode d'inondation recensé dans les archives remonte à 1740 (COBARIC, 2023). Depuis, les inondations sur le territoire sont bien documentées et de nombreux rapports (Triquet, 1965; Tecult, 1994; Biron et al., 2020) ont été commandés par le gouvernement au fil du temps afin d'étudier la problématique et de trouver des solutions aux inondations récurrentes dans la région (COBARIC, 2023). À ce jour, plusieurs villes sont en recherche active de solutions pour réduire les impacts des inondations, dont la ville de Sainte-Marie située en Moyenne-Chaudière, qui prévoit déménager ses infrastructures municipales hors de la zone inondable (Ville de Sainte-Marie, 2023). L'organisme de bassin-versant oeuvrant sur le territoire, le COBARIC, est hautement mobilisé depuis plusieurs années pour mettre en œuvre une

gestion intégrée de l'eau dans le bassin-versant. Les inondations ont d'ailleurs été identifiées comme l'une des problématiques les plus urgentes dans le plan directeur de l'eau (PDE). Depuis 2020, cet organisme est en partenariat étroit avec le bureau de projets de la rivière Chaudière, mis en place par le ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation (MAMH) dans le cadre du Plan de Protection du Territoire face aux inondations (PPTFI), qui a pour mandat de planifier l'aménagement des zones inondables.

Malgré la multiplicité des études depuis ces dernières années sur le territoire, on constate que celles-ci abordent principalement les inondations en eau libre ou par embâcles sur la rivière Chaudière, alors que le COBARIC (2014 et 2019) mentionne un troisième type d'inondation sur le territoire, soit les inondations torrentielles. Parmi tous les événements d'inondations répertoriés dans le bassin-versant de la rivière Chaudière (BVRC), 16 % ont eu lieu en juillet et 15 % en août et sont associées à des épisodes de précipitations intenses (Boyer-Villemare, 2022). Malgré la vulnérabilité territoriale du BVRC aux aléas torrentiels, on note peu d'études sur cette problématique. Néanmoins, l'un des besoins mentionnés par le comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC) consiste à identifier les zones particulièrement vulnérables à cet aléa afin de cibler les interventions lors d'événements de fortes précipitations (COBARIC, 2019). La pertinence de ce mémoire s'inscrit donc dans cette volonté d'acquiescer un portrait de la dynamique torrentielle dans la région du BVRC et d'identifier les facteurs aggravants.

L'objectif général de ce mémoire consiste à caractériser la dynamique torrentielle dans le BVRC afin d'établir un portrait de l'aléa à l'échelle régionale. On cherche à comprendre et analyser les facteurs géographiques et climatiques spécifiques à cette région qui contribuent à l'occurrence et l'ampleur des inondations torrentielles. Les objectifs spécifiques qui en découlent sont : (1) réaliser un portrait des événements historiques à caractère torrentiel survenus dans le BVRC et les conditions météorologiques associées au cours du dernier siècle; (2) évaluer et modéliser les

facteurs de vulnérabilité environnementale face aux risques torrentiels dans ce bassin-versant.

L'augmentation de la disponibilité d'une grande quantité de données à haute résolution accessibles au grand public permet de réduire le temps et les coûts associés aux méthodes d'acquisition de données géomorphologiques traditionnelles (levé topographique, géométrie des bassins, etc.). La pertinence de l'utilisation d'outils issus des systèmes d'informations géographiques (SIG) quant à l'étude des aléas torrentiels a notamment été démontrée dans plusieurs études (Youssef et al., 2011 ; Wicht et Osinka-Skotak, 2016 ; Pande et Moharir, 2017 ; Abdelkareem, 2017).

L'approche priorisée est centrée sur les aspects environnementaux de la vulnérabilité aux crues (Alam et al., 2021; Cardona et al., 2012) par comparaison aux aspects de la vulnérabilité sociale (Balica et al., 2009 ; Birkman et al., 2013) ou économique (Balica et al., 2009) généralement considérés dans une approche holiste de l'évaluation du risque (Hinojos et al., 2023). Appuyée par les conclusions de nombreux-nombreuses auteurs-autrices (Abdel Hamid et al., 2020 ; Alcántara-Ayala, 2002 ; Cavallin et al., 1994 ; Glade, 2005 ; Verstappen, 1989), la caractérisation de l'aléa torrentiel est considérée comme une composante essentielle à l'élaboration d'une stratégie de réduction de la vulnérabilité au risque torrentiel dans le BVRC.

L'approche géographique adoptée permet d'obtenir une vision holistique de la problématique des crues torrentielles pour une gestion intégrée du risque d'inondation dans le BVRC. L'importance d'une telle étude réside dans sa contribution à la compréhension des dynamiques territoriales historiques, hydrologiques et géomorphologiques en lien avec la présence de l'aléas torrentiel. L'identification des zones à risques, une meilleure compréhension des processus torrentiels et l'identification des facteurs de vulnérabilité environnementale permettront d'aider les gestionnaires locaux à prendre des décisions éclairées vis-à-vis l'aménagement du territoire et des mesures d'adaptation à mettre en place pour réduire la vulnérabilité du territoire aux aléas torrentiels.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le présent chapitre est consacré à circonscrire le concept de torrentialité tel qu'on le retrouve dans la littérature scientifique. Par la suite, le torrent comme entité géomorphologique est défini en insistant principalement sur ses paramètres géomorphologiques fondamentaux, soit la pente et la configuration du bassin-versant. Puis, une synthèse des connaissances actuelles relatives aux aléas torrentiels est présentée, avant d'introduire plus spécifiquement les crues torrentielles et leurs spécificités hydrologiques. Finalement, les facteurs de vulnérabilité environnementale face aux aléas torrentiels sont exposés pour mieux comprendre le risque.

1.1 Torrentialité

Le concept de torrentialité fait référence à l'aspect imprévisible des écoulements hydrogéomorphologiques au sein des torrents, lesquels se distinguent par une pente nettement plus forte que celle observée pour les rivières en plaine (Garitte, 2006 ; Liébault, 2003 ; Piton et al., 2018). On attribue d'abord la torrentialité à deux conditions essentielles : la présence d'eau et de relief (Surell, 1870 ; Piton et al., 2018). Le géographe René Neboit-Guilhot soulignait que « L'essence de la torrentialité, c'est le retour, à intervalles réguliers, de crues soudaines et brutales, dont l'abondance et la violence contrastent avec la médiocrité des écoulements habituels » (Neboit-Guilhot, 2010, p.143). Cette citation met particulièrement bien en évidence les caractéristiques

fondamentales de la torrentialité, c'est-à-dire le caractère violent et rapide des crues, mais aussi le fait que ces écoulements ne sont ni constants ni stables dans le temps et dans l'espace.

La torrentialité ne se limite pas aux caractéristiques hydrologiques des torrents, mais implique également la présence d'une fourniture sédimentaire au sein des cours d'eau (Harvey, 1991 ; Church, 2002 ; Arattano et Franzi, 2004 ; Liébault et al., 2005 ; Ancey et al., 2014). Cette forte charge sédimentaire des torrents leur procure une capacité accrue d'éroder et de transporter de grande quantité de matériaux hétérogènes (Ancey, 2005). Cette composante sédimentaire joue d'ailleurs un rôle crucial dans la création d'une signature morphologique distincte qui caractérise les phénomènes torrentiels dans le paysage (Borga et al., 2014 ; Church, 2002 ; Whol, 2005 ; Costa, 1983). Ainsi, il est possible de reconstituer les conditions des événements passés à partir des traces qu'ils laissent dans l'environnement (Garitte, 2006 ; Liébault, 2010).

Il existe cependant des différences phénoménologiques quant à la nomenclature des processus liés à la torrentialité en fonction de la région d'étude. Ces différences peuvent se justifier par divers facteurs contextuels au territoire telles que la géologie, la topographie, le climat ou encore la culture du risque (Garitte, 2006). Par exemple, en France, les études sur les phénomènes torrentiels sont principalement concentrées dans les Alpes, où ceux-ci sont d'une plus grande ampleur que les phénomènes que l'on retrouve dans les Appalaches au Québec, où les pentes se caractérisent par une dénivelée moins importante. Ainsi, pour ces auteur-es, la torrentialité est généralement confinée aux hautes altitudes où les forces gravitaires sont les plus importantes alors que pour d'autres, la torrentialité réfère plutôt au caractère soudain d'une crue qui peut avoir lieu au sein de reliefs moins prononcés (Buffin-Bélangier dans Locat et al., 2008 ; Borga et al., 2014 ; Piton et al., 2019).

1.2 Le torrent comme entité géomorphologique

L'approche du torrent en tant qu'entité géomorphologique revêt une importance cruciale pour comprendre le comportement des crues torrentielles. La géomorphologie des torrents influence la capacité de rétention et de transport des sédiments, ce qui a des implications directes sur les risques d'érosion et d'accumulation de matériaux lors des crues (Chin, 2003 ; Harvey, 1991 et 1996 ; Patton et Baker, 1976). En intégrant cette perspective géomorphologique dans l'étude des crues torrentielles, il devient alors possible de mieux anticiper et saisir les risques associés à ces phénomènes hydrologiques extrêmes.

1.2.1 Définitions

Le terme français « torrent » est apparu dans la littérature scientifique au 15^e siècle alors que les Alpes françaises connaissaient une forte période d'activité torrentielle (Liébault, 2003). Ce concept, bien que traduit « torrent » en anglais, est peu présent au niveau de la littérature scientifique anglo-saxonne où l'on emploie plutôt le terme "mountain stream", qui se traduit en français par « rivière de montagne ». Le tableau 1.1 présente quelques définitions du terme torrent au sein de la littérature scientifique francophone et anglophone depuis le 19^e siècle.

Tableau 1.1 Différentes définitions du torrent issue de la littérature scientifique depuis le 19^e siècle.

<p><i>Surell, 1870, p.8</i></p>	<p><i>« Les torrents coulent dans des vallées très courtes, qui morcellent les montagnes en contreforts ; quelquefois même, dans de simples dépressions. Leurs crues sont courtes et presque toujours subites. Leur pente excède 6 centimètres par mètre, sur la plus grande longueur de leur cours : elle varie très vite, et ne s'abaisse pas en dessous de 2 centimètres par mètre. Ils affouillent dans la montagne ; ils déposent dans la vallée ; et ils divaguent ensuite, par suite de ces dépôts. »</i></p>
---------------------------------	--

<i>FAO, 1981, p.135</i>	« <i>Petit cours d'eau de montagne, temporaire ou permanent à forte pente à crues violentes et subites, au débit liquide et solide très variable, réalisant en général des charriages importants</i> »
<i>Valadas, 2004, p.97</i>	« <i>Un torrent est un cours d'eau épisodique de montagne caractérisé par un bassin de réception le plus souvent en éventail, un chenal d'écoulement bien incisé et un cône de déjection. Les eaux ravinent à l'amont, creusent le chenal et déposent à l'aval les matériaux arrachés en cours de trajet.</i> »
<i>Neboit-Guilhot, 2010, p.143</i>	« <i>Le torrent est un organisme hydrologique spécifiquement montagnard qui fonctionne par intermittence. L'essence de la torrentialité, c'est le retour, à intervalles réguliers, de crues soudaines et brutales, dont l'abondance et la violence contrastent avec la médiocrité des écoulements habituels. Le propre d'un torrent est de se manifester par à-coups brefs, sans périodicité fixe, au gré des averses exceptionnelles. Ces aspects hydrologiques combinés à la vigueur des pentes génèrent des écoulements d'une turbulence extrême, capables de mettre en mouvement des quantités énormes de matériaux.</i> »

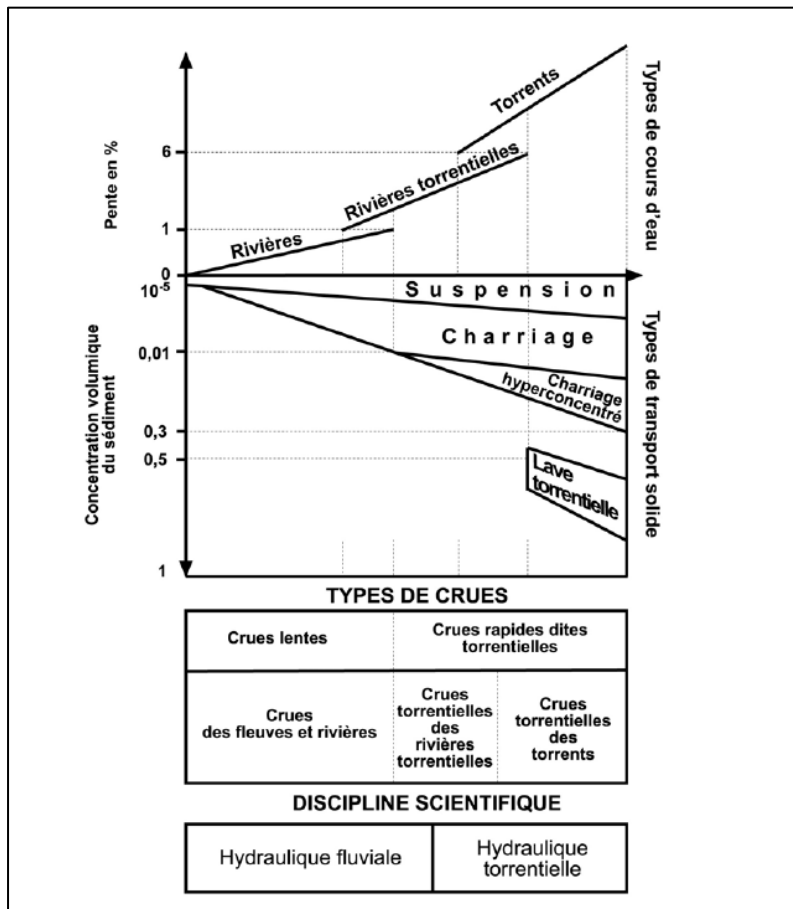
Bien que les définitions proposées fluctuent selon les auteur-es et les disciplines (géomorphologie, hydraulique, ingénierie, hydrologie, etc.), tous et toutes conviennent qu'un torrent se distingue essentiellement par la pente de son chenal, le caractère épisodique et violent de son écoulement et la présence de trois grandes unités physiographiques (bassin de réception, zone de transport, zone de dépôt) au sein du bassin-versant torrentiel, lesquelles ont un comportement morphodynamique distinct (Besson, 1996 ; Church, 2002 ; Fort et al., 2015 ; Garitte, 2006 ; Liébault, 2003 ; Naaim-Bouvet et Richard, 2015).

1.2.2 La pente comme critère de base

La pente d'un cours d'eau est une caractéristique physique essentielle puisqu'elle détermine la quantité d'énergie gravitaire disponible au sein de celui-ci (Besson, 1996; Church, 2002 ; Fort et al., 2015). C'est d'ailleurs le critère le plus fréquemment retenu

pour discriminer les torrents et rivières torrentielles des rivières de plaine (Besson, 1996 ; Liébault, 2003 ; Surrel, 1870 ; FAO, 1981 ; Whol et Meritt, 2005).

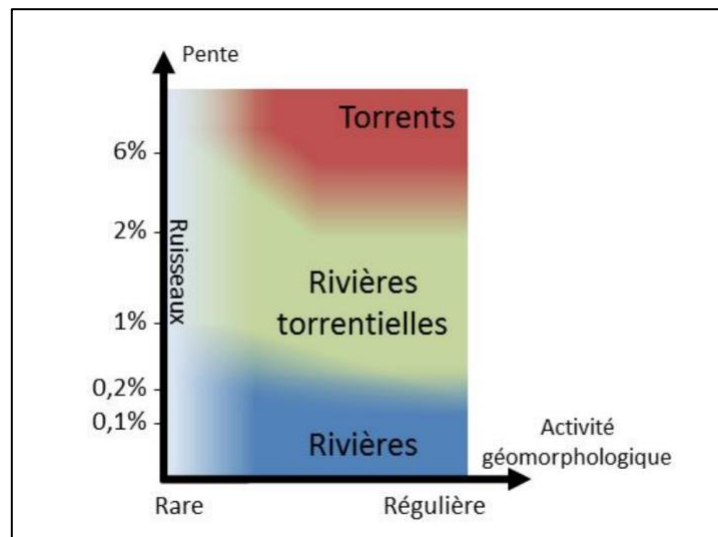
Figure 1.1 Classification selon les travaux de Besson (1996) des différents types de rivières afin de distinguer la rivière torrentielle du torrent en fonction de critères hydrauliques et sédimentaires (Liébault, 2003; p.26).



D'après la classification de Besson (Figure 1.1), les cours d'eau considérés comme des rivières torrentielles ont une pente entre 1 et 6 %, tandis que les cours d'eau qualifiés de torrents ont une pente supérieure à 6 %. L'énergie du relief présent en montagne amplifie la capacité d'érosion et de transport sédimentaire des rivières de montagne (Montgomery et Buffington, 1998; Thenard, 2009). Contrairement aux rivières en plaine, caractérisées par un écoulement lent et principalement composé d'eau et de sédiments en suspension, les rivières de montagne ont la capacité de charrier une

granulométrie plus grossière allant parfois jusqu'aux blocs (Ancey, 2005; Laigle, 2015; Recking et al., 2012). Conformément à la classification proposée par Besson (1996), seuls les torrents peuvent produire des laves torrentielles, qui consistent en des coulées boueuses et rocailleuses dévalant dans un chenal d'écoulement (Ancey, 2013 ; Theler, 2010).

Figure 1.2 Diagramme conceptuel des limites entre ruisseaux, torrents, rivières torrentielles et rivières selon la pente et la fréquence de l'activité géomorphologique (Piton et al., 2018; p.12).

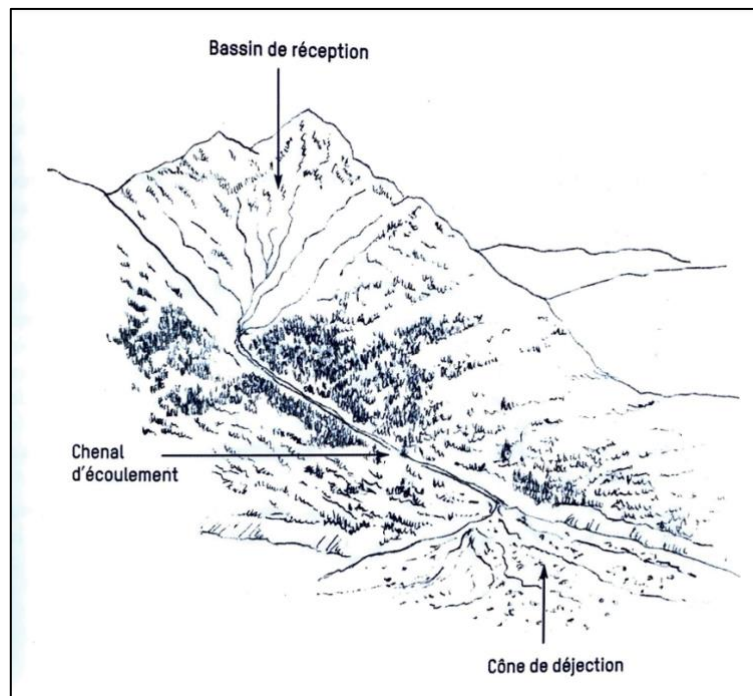


Les ruisseaux à pente prononcée peuvent exhiber une dynamique hydrologique semblable à celle des torrents et rivières torrentielles après des précipitations intenses (Piton et al., 2018). Cependant, leur distinction repose sur une activité géomorphologique de moindre importance (Figure 1.2). Dans le cas des rivières torrentielles, les crues se manifestent par leur rapidité et une activité géomorphologique soutenue (érosion, transport, sédimentation) capables de modifier significativement la morphologie du cours d'eau en un seul événement (Church, 2013 ; Laigle, 2015 ; Liébault et al., 2010 ; Whol et Meritt, 2005).

1.2.3 L'organisation du bassin-versant torrentiel

Selon la classification de Schumm (1977), le bassin-versant torrentiel se subdivise en trois zones physiographiques qui présentent un fonctionnement morphodynamique unique et des caractéristiques géomorphologiques distinctes (Figure 1.3).

Figure 1.3 Schématisation du bassin-versant torrentiel de Schumm (1977) (Recking et al., 2012; p.9).



La première zone à l'amont, soit le bassin de réception (ou zone de production), rassemble les versants, fournit les intrants sédimentaires principaux du système et concentre les eaux de ruissellement. Les débris qui y sont produits peuvent être stockés provisoirement dans les têtes de bassin ainsi que sur les versants raides, puis évacués rapidement (parfois au sein d'un même évènement) par charriage ou, dans certains cas, sous forme de coulées de débris (Garitte, 2006). Whol (2005) insiste sur le fait que le bassin de réception est le plus sensible à l'influence des facteurs dits externes comme la géologie et le climat.

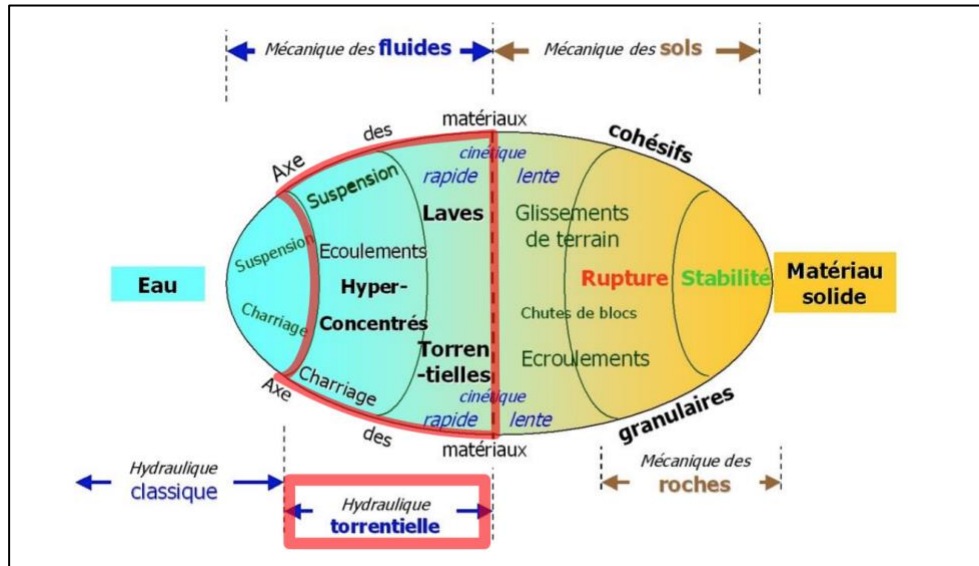
La deuxième zone, soit la zone de transport, englobe le chenal d'écoulement et assure le transit sédimentaire de l'amont vers l'aval (Garitte, 2006; Recking et al., 2012; Liébault, 2003). Le modèle classique représente cette zone comme étant « une gorge de raccordement, avec un chenal à pente forte confiné entre des versants raides qui peuvent contribuer localement à la recharge sédimentaire du torrent » (Recking et al., 2012; p.17). En réalité, c'est au niveau de cette zone que l'on retrouve la plus grande diversité de morphologie des chenaux dû, en partie, au fait qu'ils doivent continuellement s'ajuster en fonction de l'apport sédimentaire provenant de la zone de production, mais aussi celui provenant des versants qui arrive généralement par soubresauts (Fort et al., 2015; Palucis et Lamb 2017; Liébault et al., 2005).

La troisième zone, dite de dépôt, se traduit généralement par la présence d'un cône de alluvial. La formation du cône alluvial est liée à une rupture de pente abrupte se produisant à l'interface entre la montagne et la plaine alluviale (Blair et McPherson, 1994 ; Bull, 1977 ; Buffin-Bélanger dans Locat et al., 2008; Richard, 1997). La perte d'énergie occasionnée par la diminution de la pente oblige les sédiments qui ont été transportés au niveau du chenal d'écoulement à plus forte pente à s'y déposer (Blair et McPherson, 1994 ; Bull, 1977 ; Buffin-Bélanger dans Locat et al., 2008). Dans le cas contraire, l'absence d'un cône alluvial à l'embouchure du chenal peut alors témoigner d'une interruption ou une discontinuité dans le transfert sédimentaire entre les différentes zones du bassin-versant (Bracken et al., 2015 ; Bull, 1977 ; Harvey, 1996). Dans la nature, la délimitation théorique entre ces trois zones n'est pas toujours évidente. Certaines unités peuvent se recouper et leur extension spatiale peut varier selon la topographie, la géologie, la couverture végétale, la nature du sol, etc. (Fort et al., 2015). L'interaction entre les processus géomorphologiques et ces zones peut s'avérer complexe et fluctuer dans le temps en réponse aux conditions météorologiques (Montgomery et Buffington, 1998). De plus, l'influence importante de l'anthropisation des territoires peut altérer significativement les caractéristiques naturelles du bassin-versant (Bracken et al., 2015).

1.3 La dynamique hydrosédimentaire des torrents

Les mécanismes de transport et d'écoulement sédimentaire dans les rivières de plaines ont été largement étudiés par la communauté scientifique (Ancy, 2013). Ils sont donc beaucoup mieux compris que les processus que l'on retrouve dans les rivières de montagnes (Recking et al., 2012). L'apport sédimentaire observé dans les chenaux torrentiels découle principalement de contributions épisodiques, ce qui engendre un régime davantage influencé par la dynamique des versants, notamment les mouvements gravitaires, plutôt que par les conditions hydrauliques (Hassan et al., 2005). Les sédiments présents dans les chenaux sont issus d'une variété de milieux : tête de bassin, versants raides, héritages glaciaires, lit du chenal, etc. et par ce fait, on retrouve une lithologie et une granulométrie particulièrement hétérogène (Hungr et al., 1984; Naaim-Bouvet et Richard, 2015). La hauteur d'eau présente dans les chenaux torrentiels est particulièrement faible par rapport à la taille des sédiments transportés puisque les pentes fortes procurent l'énergie nécessaire au transport sédimentaire (Ancy, 2013). Hassan et al. (2005) font valoir que la présence de débris végétaux dans les environnements boisés représente une grande proportion du transport solide et ont un impact non négligeable sur la morphologie du chenal. Ainsi, il convient de mentionner que les lois de l'hydraulique, généralement employées pour anticiper la réaction des cours d'eau vis-à-vis des apports sédimentaires, sont peu applicables dans le contexte torrentiel (Ancy, 2013; Recking et al., 2012). Néanmoins, les travaux menés par Meunier (1989), en France, ont permis de mettre les bases de l'hydraulique torrentielle en proposant un diagramme qui illustre la transition entre l'hydraulique d'eau claire et les mécaniques du transport solide (Figure 1.4).

Figure 1.4 Différents types d'écoulements torrentiels par Meunier (1989) (Piton et al., 2018; p.14).



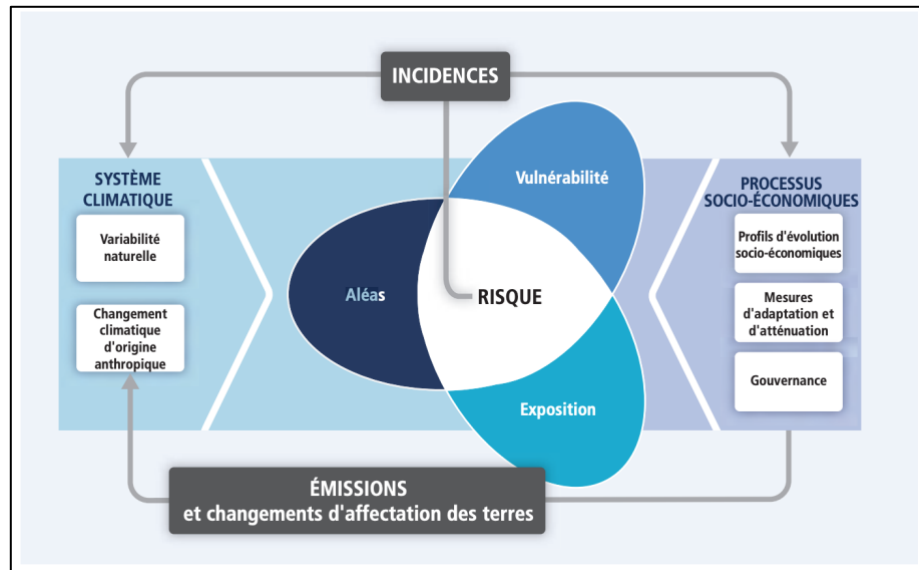
La discipline de l'hydraulique torrentielle distingue trois types d'écoulement pour les torrents à partir de leur concentration volumique. En dessous de 30 % de concentration volumique, l'écoulement est caractérisé comme étant du charriage torrentiel. Au-delà de 30 %, on parle d'écoulement hyperconcentré et lorsque l'on dépasse 60 %, on le définit comme étant une lave torrentielle (Richard, 1997 ; Ancey, 2013).

1.4 Risques et aléas torrentiels

1.4.1 Notions de risques et concepts associés

Le concept de risque est le résultat de la mise en relation de trois composantes géographiques, soit : l'aléa, la vulnérabilité et l'exposition (GIEC, 2012) (Figure 1.5). L'aléa correspond au phénomène physique du risque potentiellement destructeur, la vulnérabilité réfère à la capacité de résister à l'aléa au niveau environnemental et anthropique, alors que l'exposition fait référence à la susceptibilité spatiale d'être affecté par celui-ci (GIEC, 2012 ; Garitte, 2006).

Figure 1.5 Schématisation des notions de risques et concepts associés (GIEC, 2012; p.3).



Ainsi, le risque découle de l'interaction entre la probabilité d'occurrence d'un événement (aléa) et son étendue spatiale (exposition) en fonction de la sensibilité de l'environnement et de la population à celui-ci (vulnérabilité). D'autre part, le risque est dit inexistant si l'aléa ne menace pas de biens et d'enjeux exposés à celui-ci (Veyret et al., 2005). Le niveau de risque associé à un aléa est donc intrinsèquement défini par le niveau de vulnérabilité et le degré d'exposition des biens et des personnes (Veyret et al., 2005).

1.4.2 Aléa torrentiel

L'aléa torrentiel est un concept qui réfère à la probabilité d'occurrence d'un événement de forte intensité dans les cours d'eau de montagne, plus spécifiquement au niveau d'un torrent ou d'une rivière torrentielle, ainsi qu'aux processus géomorphologiques associés (Recking et al., 2012 ; Whol, 2005 ; Naaim-Bouvert et Richard, 2015). Garitte (2006) définit l'aléa torrentiel comme étant : « [...], un phénomène exogène hydrogéomorphologique, les précipitations en constituent le principal mode de déclenchement et les conditions géologiques et géomorphologiques vont largement influencer la magnitude de l'aléa » (Garitte, 2006, p.25). L'aléa torrentiel englobe

généralement deux types d'évènements, soit la crue torrentielle et la lave torrentielle. Les deux principaux aléas diffèrent principalement par la pente du cours d'eau et leur charge sédimentaire (Figure 1.1) (Besson, 1996 ; Ancey, 2014). Dans les petits bassins à fortes pentes (supérieures à 6 %) le régime d'écoulement à lave torrentielle est le plus commun. En revanche, dans les bassins de plus grande superficie dotés de pentes modérées, on retrouve un fonctionnement mixte où il y a une alternance entre les crues et les laves torrentielles (Quefféléan et al., 2019). Ces évènements se distinguent généralement par des débits très élevés, particulièrement dans les petits cours d'eau, accompagnés d'une forte charge sédimentaire qui produit des modifications rapides et significatives dans le paysage (Garitte, 2006 ; Theler, 2010 ; Whol, 2005).

Les crues torrentielles, aussi communément appelées « crues éclaires », sont définies comme étant des évènements hydrologiques qui surviennent peu de temps après de fortes précipitations qui provoquent un ruissellement rapide et soudain des eaux de surface, et ce, particulièrement dans les bassins-versants à topographie accidentée de petite à moyenne taille (Alam et al., 2021 ; Borga et al., 2014 ; Destro et al., 2018 ; Newson, 1978 ; Norbiato et al., 2008). Elles résultent d'une combinaison parfaite entre un évènement météorologique de forte intensité et des conditions environnementales et géomorphologiques propices à l'aléa (Piton et al., 2018). En raison de leur potentiel destructeur engendré par les forts débits et la charge sédimentaire importante, il peut y avoir des répercussions substantielles sur l'organisation territoriale ainsi que sur la sécurité des populations concernées.

D'un point de vue climatique, les crues éclaires sont plus fréquentes à l'été (juin à octobre), car les processus convectifs (orage, tempête) sont plus nombreux et se manifestent de manière localisée au sein de bassin-versant $< 1000 \text{ km}^2$ (Borga et al., 2008 ; Destro et al., 2018 ; Marchi et al., 2009). Ces évènements hydrométéorologiques combinés à la présence d'un sol déjà saturé en eau sont souvent à l'origine d'une crue torrentielle (Leconte, 2019). Bien que les évènements de crues torrentielles soient généralement de plus courte durée par comparaison aux inondations printanières, la grande quantité d'eau reçue de façon localisée peut surcharger temporairement le

réseau hydrographique en amont et limiter la capacité d'infiltration du sol (Leconte, 2019 ; Quéfféléan, 2019). Dans certains cas, les crues torrentielles peuvent également survenir au printemps lors de précipitations importantes, accentuées par un sol déjà saturé par la fonte de la neige (Buffin-Bélanger dans Locat et al., 2008 ; Leconte, 2019).

1.4.3 Facteurs déclencheurs des crues torrentielles

La prévision et l'estimation des seuils de précipitations pour les crues revêtent une importance particulière dans un contexte où la rapidité de la crue limite considérablement le temps de réaction (Baraille, 2003 ; Aleotti, 2004). Ce type de surveillance demeure cependant complexe, car les événements de crues torrentielles se développent à des échelles spatiales et temporelles singulières pour lesquelles les réseaux de mesures classiques des précipitations et des débits ne sont pas toujours capables de fournir les informations nécessaires (Borga et al., 2008). De plus, le manque de station hydrométrique couplée à l'absence fréquente de données historiques dans les bassins-versants de petite taille limite la capacité prévisionnelle des crues et l'utilisation des modèles hydrologiques classiques (Piton et al., 2018 ; Recking et al., 2012). Néanmoins, Montgomery et Dietrich (1995) ont établis que les seuils de déclenchement des crues torrentielles sont influencés par plusieurs paramètres tels que l'intensité et la durée des précipitations, la capacité d'infiltration du sol, la pente du bassin-versant ainsi que la capacité de stockage du cours d'eau. Dans une étude menée en Chine, Miao et al. (2016) ont conclu que, dans les régions arides et semi-arides le seuil de précipitations nécessaire au déclenchement d'une crue diminue considérablement à mesure que le taux de saturation du sol augmente. Ils ont également observé que dans les régions humides, les précipitations cumulées sur une période donnée peuvent représenter un seuil adéquat pour la prévision de crue éclairée (Miao et al., 2016).

Selon les termes définis par l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ, 2014), le seuil d'émission d'alerte pour des pluies torrentielles est établi > 50 mm en 24 heures. Cependant, il convient de noter que ce système d'alerte ne tient pas compte

des variables environnementales qui exercent pourtant une influence significative sur les probabilités de crues (Borga et al. 2008 ; Newson, 1978 ; Norbiato et al., 2008). Afin d'établir des seuils météorologiques précis pour le déclenchement des crues torrentielles dans un bassin-versant, il faudrait disposer et analyser de longues séries temporelles de pluies et de débits liées aux événements d'inondations torrentielles historiques. Or, la couverture et la portée des stations météorologiques et hydrométriques sont souvent limitées comme préalablement mentionné. De plus, ce type de crue se caractérise généralement par une localisation très précise, avec des précipitations de courte durée, ce qui rend complexe l'interpolation des données à une échelle plus vaste. Enfin, dans le contexte des changements climatiques actuels, de nombreux-nombreuses hydrologues se questionnent sur l'application du principe de stationnarité pour modéliser le comportement hydrologique futur des cours d'eau, lequel suppose que les caractéristiques des séries temporelles hydrologiques sont constantes et ne varient que de manière peu significative sur une longue période de temps (Bravard et Petit, 1997 ; Anctil et al., 2012).

Outre les aspects liés aux conditions hydrométéorologiques, l'anthropisation du territoire a le potentiel d'exacerber l'aléa torrentiel en modifiant le fonctionnement hydrologique des bassins-versants (Demers et al., 2017 ; Lyons et Beschta, 1987 ; Muller et al., 2002 ; Saint-Laurent et Hähni, 2008 ; Wohl, 2006). En effet, l'expansion urbaine croissante entraîne une augmentation des surfaces imperméables, ce qui a pour conséquence d'une part, de renforcer le ruissellement en limitant l'infiltration due à la présence de surfaces lisses et, d'autre part, de réduire la recharge de la nappe phréatique, ce qui se traduit par une diminution des débits en période d'étiage (Alam et al., 2021 ; Leconte, 2019). À titre d'exemple, Zhang et al. (2018) ont mis en évidence que l'urbanisation avait intensifiée non seulement les conséquences de la crue, mais aussi exacerbé la quantité de précipitations associées au passage de l'ouragan Harvey en 2017 dans la ville de Houston aux États-Unis.

Il existe de nombreux autres exemples historiques à travers le monde de facteurs anthropiques qui ont exacerbé les conséquences d'une crue éclair. C'est le cas de

l'inondation de Mumbai en Inde en 2005 (Hallegate et al., 2010), où l'urbanisation excessivement rapide et non planifiée a conduit à la construction dans des zones à haut risque torrentiel. L'absence d'un système de gestion des eaux pluviales a aussi contribué à faire de cet événement l'un des plus meurtriers dans l'histoire moderne de l'Inde (Hallegate et al., 2010). Au Québec, dans la région de Coaticook, Demers et al. (2017) ont montré que la présence de fossés de drainage sur des sols à fortes pentes a pu amplifier la réponse hydrologique et sédimentaire des sous-bassins-versants et ainsi contribuer à provoquer des dommages aux bâtiments situés sur les cônes alluviaux lors d'un épisode de pluies torrentielles en juin 2015 (Demers et al., 2017).

1.4.4 Dynamique des bassins-versants torrentiels

Les bassins-versants torrentiels se caractérisent par leur compacité en grande partie attribuable à leur superficie restreinte ainsi qu'à une topographie accidentée, ce qui se traduit par une réponse hydrologique (quasi) instantanée aux précipitations (Anctil et al., 2012; Recking et al., 2012; Theler, 2010). Lors des pluies, les eaux de ruissellement sont rapidement prises en charge et évacuées vers l'aval du réseau hydrographique (Recking et al., 2012). La pente abrupte du chenal accélère l'écoulement et laisse peu de temps aux précipitations pour s'infiltrer dans le sol (Leconte, 2019 ; Meunier, 1989 ; Anctil et al., 2012). Par conséquent, la faible rétention de l'eau dans les affluents torrentiels entraîne généralement une augmentation rapide du niveau d'eau de la rivière située en aval lors de crues importantes (Richard, 1997; Buffin-Bélanger dans Locat et al., 2008; Leconte, 2019 ; Theler, 2010; Garitte, 2006). Le régime hydrologique des crues torrentielles est donc très dynamique puisque les précipitations et la montée des eaux sont séparées tout au plus de quelques heures seulement (Anctil et al., 2012 ; Leconte, 2019).

La réaction d'un bassin-versant aux précipitations dépend de nombreux facteurs et repose sur deux types de caractéristiques : les caractéristiques dites pérennes et les caractéristiques dites variables (Quéfféléan, 2015). Les premières caractéristiques sont considérées comme stables dans le temps, et concernent pour l'essentiel la géologie, la

pédologie, la superficie, la pente et les aménagements anthropiques. Les caractéristiques variables dans le temps font plutôt référence aux antécédents pluviométriques, au taux de saturation du sol, l'état du couvert végétal, la présence et l'étendue de la couverture de neige, voire la présence de glaciers (Recking et al., 2012). Cette diversité de caractéristiques pérennes et variables au sein des bassins-versants torrentiels explique en partie la non-linéarité de leurs réponses hydrologiques à un même type d'évènement météorologique (Quéfféléan, 2015). D'autant plus que la forme que prend la crue est généralement variable d'un épisode de précipitations intenses à l'autre (Obeidat et al., 2021 ; Patton et al., 1976 ; Younis et al., 2008). Ainsi, la prise en considération de l'ensemble de ces paramètres apparaît essentielle pour évaluer et anticiper la réponse d'un bassin-versant aux précipitations et mieux anticiper les phénomènes hydrologiques qui en découlent (Anctil et al. 2012 ; Quefféléan, 2015). Newson (1978) soulignait que les trois variables morphométriques les plus déterminantes sur la dynamique torrentielle étaient l'aire drainée, la pente et l'organisation du réseau de drainage (mesure comparable à la densité de drainage). Bien que ces mesures morphométriques soient indépendantes les unes des autres, elles témoignent néanmoins de leur interconnexion (Langbein, 1947). Par exemple, un territoire avec une topographie accidentée favorise la présence de chenaux en pente raide et un réseau hydrique plus dense (Langbein, 1947). Costa (1987) a montré pour les évènements de crues torrentielles les plus intenses aux États-Unis que les bassins-versants affectés n'étaient pas théoriquement ceux avec les conditions morphométriques les plus favorables aux crues torrentielles. Les aléas torrentiels sont donc le résultat d'une combinaison optimale de la physiographie et la morphologie du bassin-versant avec l'intensité de l'extrême météorologique.

CHAPITRE II

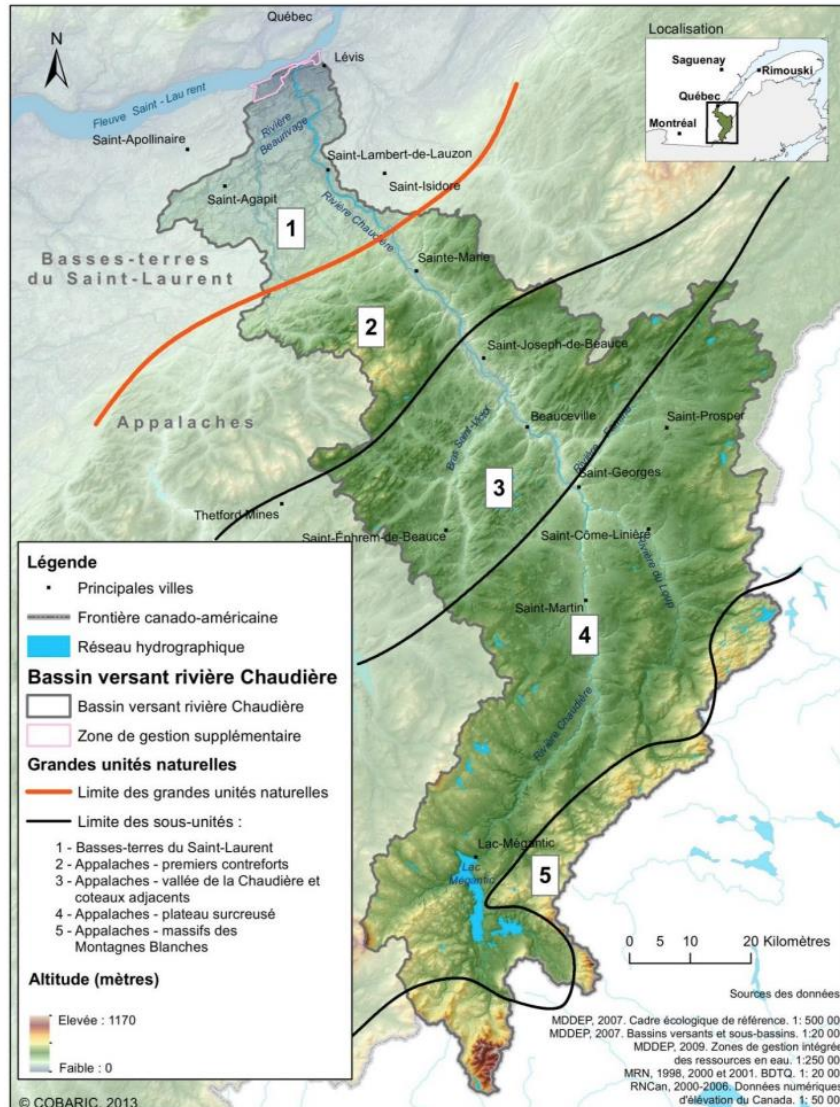
TERRITOIRE D'ÉTUDE

Dans ce chapitre, la localisation, la physiographie et l'hydrographie, le contexte géologique et géomorphologique ainsi que le climat et la végétation sont présentés pour le bassin-versant de la rivière Chaudière.

2.1 Localisation et physiographie du bassin-versant

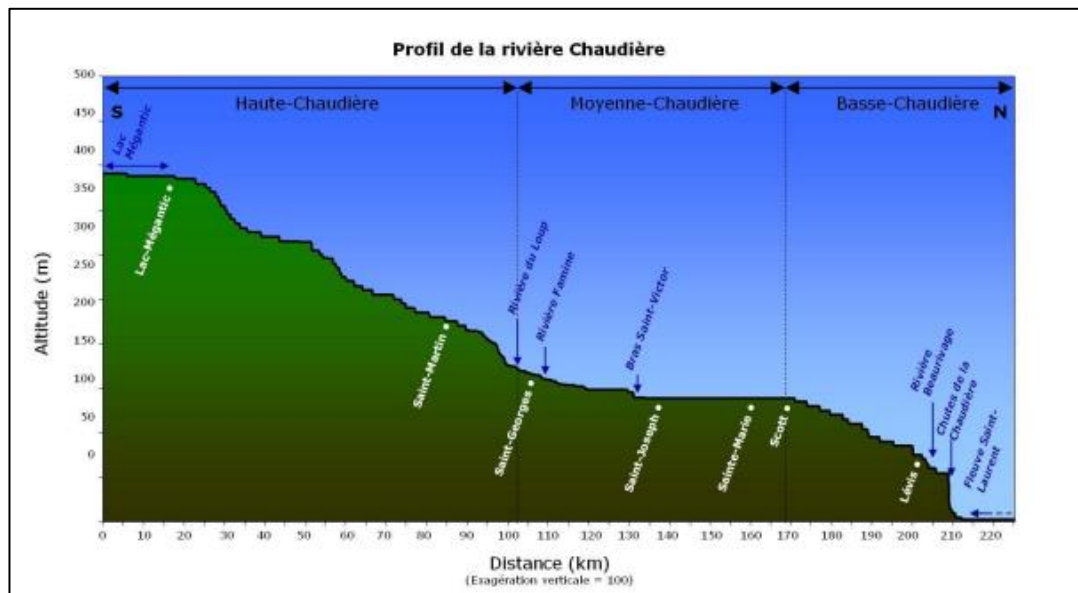
Le bassin-versant de la rivière Chaudière prend sa source au lac Mégantic et s'écoule vers le Nord jusqu'au fleuve Saint-Laurent à la hauteur de la ville de Lévis. Il draine un territoire de 6694 km², ce qui fait de la rivière Chaudière l'un des principaux affluents du fleuve Saint-Laurent. Le territoire s'étend sur deux grandes unités physiographiques, soit les Appalaches, qui font office de frontière naturelle entre les États-Unis et le Québec, et les Basses-Terres du Saint-Laurent. Les Appalaches occupent 95 % du territoire avec des altitudes décroissantes depuis l'amont vers l'aval, alors que les Basses-Terres du Saint-Laurent ne représentent que 5 % du bassin-versant (Figure 2.1).

Figure 2.1 Grandes unités naturelles du bassin-versant de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014; p.5)



Il est possible de découper le territoire du BVRC en trois unités (Figure 2.2). La Haute-Chaudière est la partie située la plus au Sud et couvre 45,8 % du territoire (COBARIC, 2014). La rivière Chaudière y est d'avantage encaissé dû à la prépondérance des hautes terres appalachiennes qui se compose d'une ceinture de collines dont l'altitude varie de 300 à 400 m (Caron, 2013). Par conséquent, l'usage du territoire y est majoritairement forestier.

Figure 2.2 Profil de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014; p.27)



La Moyenne-Chaudière s'étend sur 39,6 % du territoire et est caractérisée par un relief accidenté, aux abords de la plaine alluviale, où l'usage agricole est prédominant. Le chenal de la rivière Chaudière se caractérise par une faible déclivité à cause d'un plateau à une altitude moyenne de 150 mètres (Figure 2.2). Dans le lit de la rivière, on observe la présence sporadique d'îlots sableux parfois végétalisés, tandis que l'on retrouve à l'embouchure de certains affluents d'importants cônes alluviaux (Juneau, 2020). Dans cette section, plusieurs tributaires proviennent d'un relief escarpé et sont donc d'importants convoyeurs de sédiments vers la rivière Chaudière, ce qui peut contribuer à augmenter la vulnérabilité aux inondations par embâcles de glaces (COBARIC, 2016 ; Biron et al., 2020). De plus, la population dans cette zone (97 100 habitant-es) est majoritairement établie aux abords de la plaine alluviale ce qui la rend d'autant plus exposée et vulnérable aux risques d'inondations (COBARIC, 2014).

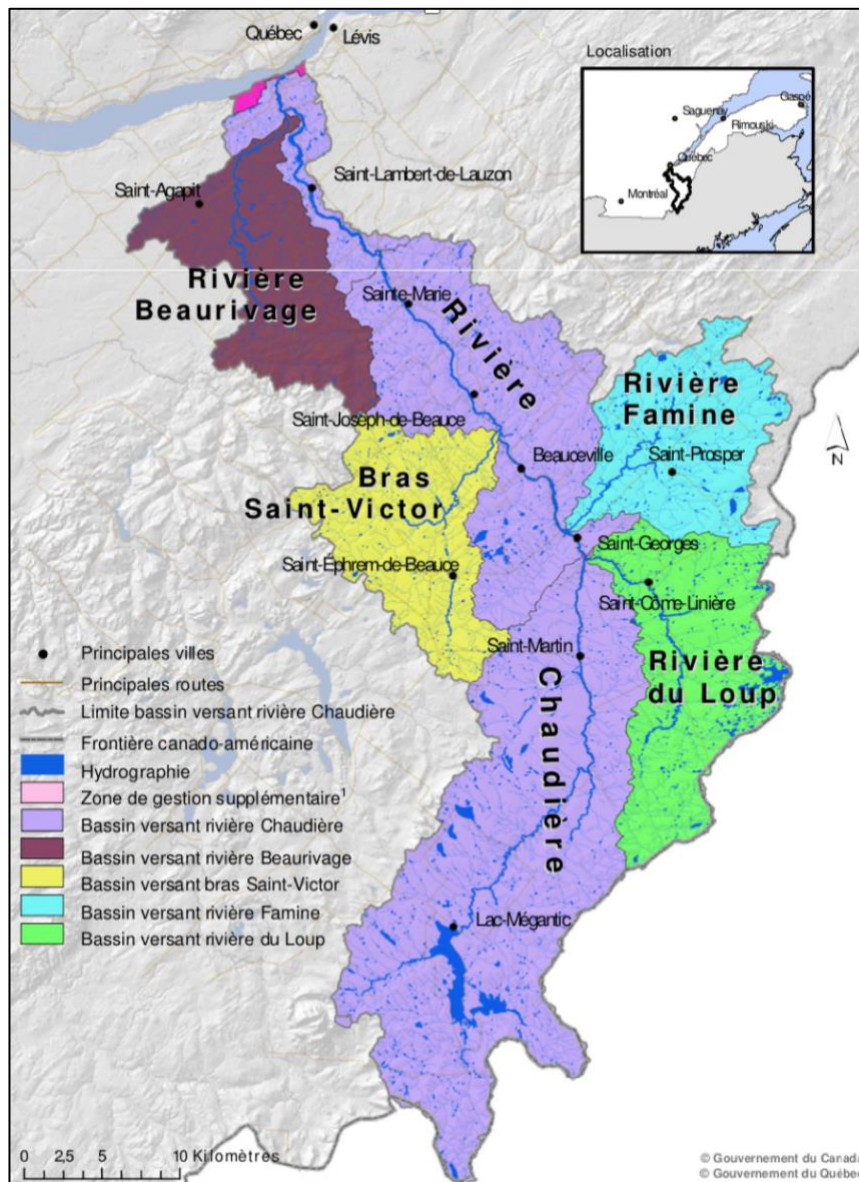
La Basse-Chaudière en aval occupe 14,6 % du territoire, mais représente la portion la plus densément peuplée avec 78 habitants par km² en raison de la présence de la ville de Lévis (COBARIC, 2014). Les plaines argileuses héritées de la mer de Champlain, qui sont une caractéristique des Basses-Terres du Saint-Laurent, influencent la

morphologie de cette section où l'on observe les plus vastes étendues de milieux humides et de très faibles pentes (COBARIC, 2014).

2.2 Hydrographie

La rivière Chaudière, en conformité avec la tectonique régionale, s'écoule du sud vers le nord en suivant le grain appalachien (Caron, 2013). Le réseau de drainage prédominant présente une configuration de type dendritique (COBARIC, 2014). Celle-ci découle en grande partie de la nature géologique du territoire principalement composée de roches sédimentaires (Trenhaile, 2010). On dénombre plus de 390 cours d'eau (rivières et ruisseaux) et un peu plus de 170 plans d'eau (étangs et lacs) sur le territoire du bassin-versant. De l'amont vers l'aval, les principaux sous-bassins-versants (SBV) de la rivière Chaudière sont la rivière Beaurivage, le Bras Saint-Victor, la rivière Famine ainsi que la rivière du Loup, qui drainent ensemble 46 % de la superficie totale du territoire (Figure 2.3) (COBARIC, 2014).

Figure 2.3 Principaux tributaires de la rivière Chaudière (COBARIC, 2012; p.1).



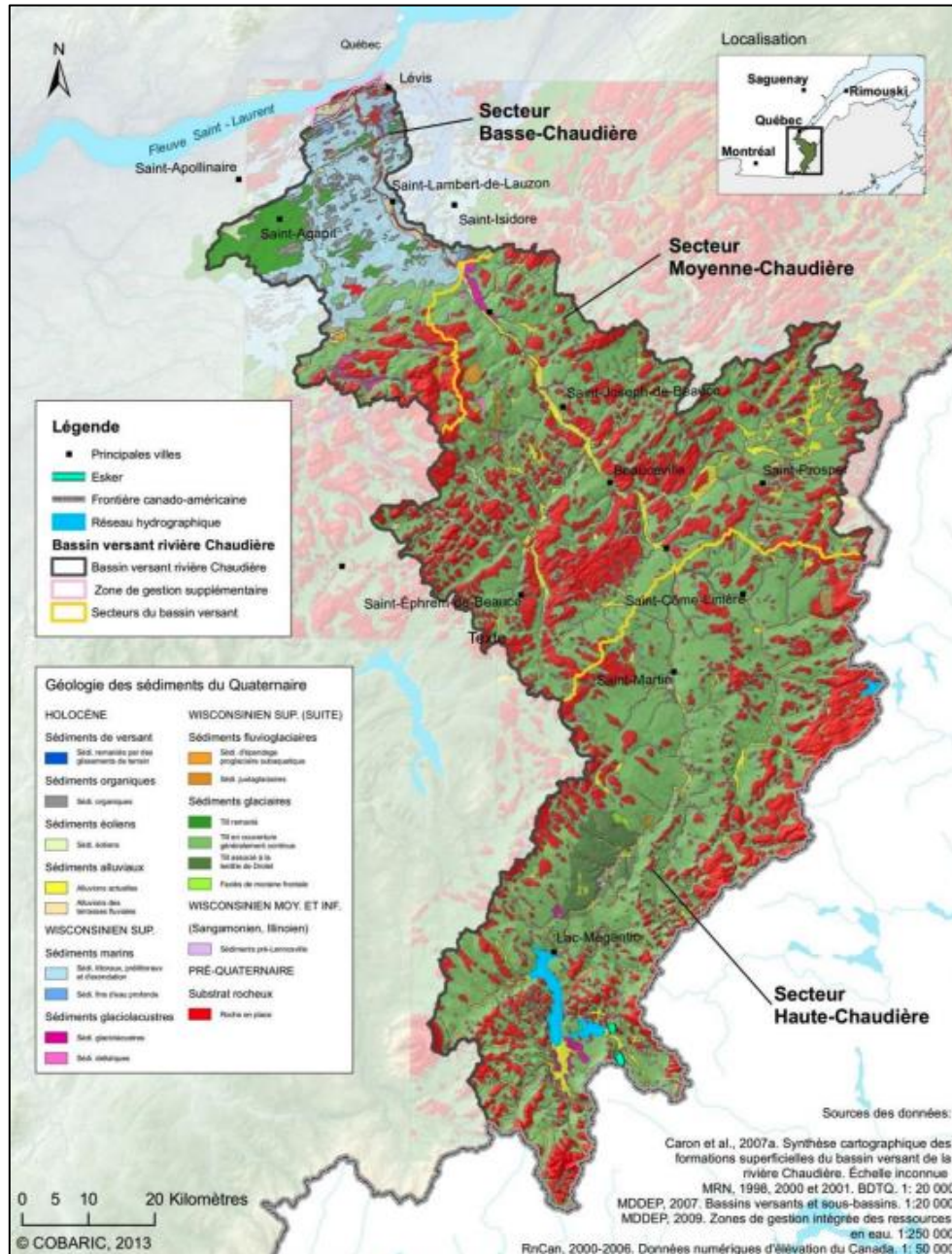
Hydrologiquement, certains affluents se caractérisent par une réponse rapide aux évènements météorologiques ainsi que leurs débits fluctuant selon les saisons en fonction des précipitations et de la fonte des neiges (Biron et al., 2020). Cette réactivité hydrologique est en grande partie liée à la topographie accidentée ainsi qu'à la géologie hétérogène de la région, où l'on retrouve des roches sédimentaires et cristallines qui influencent la capacité d'absorption du sol (Caron, 2013 ; COBARIC, 2016). D'un

point de vue géomorphologique, ces tributaires présentent une variété de formes et de reliefs en raison de l'interaction entre la géologie, la topographie et les processus d'érosion et de sédimentation. Ainsi, on retrouve des vallées, des méandres et des torrents en fonction des conditions environnementales en place le long de la rivière Chaudière (Caron, 2013 ; COBARIC, 2014). Cette hétérogénéité morphologique se manifeste également dans la diversité des écosystèmes présents le long des tributaires, lesquels offrent ainsi une grande variété d'habitats à la faune et à la flore de la région (COBARIC, 2014). De plus, certains de ces affluents sont d'importants convoyeurs de sédiments vers la rivière Chaudière comme en témoigne la présence de nombreux cônes alluviaux (Juneau, 2020).

2.3 Contexte géologique et géomorphologique

Au cours du dernier maximum glaciaire il y a 18 000 ans, on estime que trois kilomètres de glace recouvraient la majeure partie du Canada jusqu'au Wisconsin (États-Unis) (Chauvin et al., 1985 ; Hughes, 1987). Le retrait des glaces du paysage nord-américain s'est effectué dans un axe nord-est puis nord-ouest en suivant l'axe du grain appalachien (Caron, 2013). La déglaciation a été irrégulière par endroit, laissant comme vestiges de nombreuses moraines qui témoignent de l'alternance entre les périodes de stagnation du glacier et de son recul. On estime la déglaciation du bassin-versant de la Chaudière entre 11 000 et 12 000 ans avant aujourd'hui (Caron, 2013) où le nord du bassin-versant, depuis Saint-Narcisse-de Beaurivage jusqu'à son embouchure avec le fleuve Saint-Laurent, était recouvert par la mer postglaciaire de Champlain (Caron, 2013 et COBARIC, 2014).

Figure 2.4 Cartographie des dépôts de surface et des formes d'origine quaternaire dans le bassin-versant de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014; p.34).



Lors de son passage, l'inlandsis Laurentidien a considérablement modifié le paysage à travers divers processus d'érosion et en laissant, suite à son retrait, une grande variété de dépôts hétérogènes dans le BVRC (Figure 2.4). La Haute-Chaudière se distingue

par la présence de dépôt glaciaire épais, composé de tills compacts et peu perméables, qui recouvrent une grande partie des paysages appalachiens et reposent sur des socles rocheux. La Moyenne-Chaudière, les dépôts présentent une plus grande variabilité, incluant des dépôts morainiques par endroit qui reflètent l'influence de la déglaciation dans cette région. La Basse-Chaudière est caractérisée par la prépondérance des dépôts argileux et limoneux d'origine marine, liés à la présence de la mer de Champlain.

L'épaisseur moyenne des dépôts glaciaires sur le territoire est d'environ un mètre, néanmoins Caron (2013) a observé que certaines vallées enfouies peuvent contenir jusqu'à 70 mètres de dépôts meubles par endroit. En effet, la topographie préglaciaire aurait protégé celles-ci de l'érosion glaciaire avec pour résultats des coupes stratigraphiques composées de dépôts particulièrement anciens (Caron, 2013). Ces dépôts peuvent contribuer à une fourniture sédimentaire importante pour certains tributaires qui les acheminent ensuite vers la rivière Chaudière au fil des saisons.

2.4 Climat et végétation

Le BVRC présente une diversité climatique et végétale influencée par ses caractéristiques géographiques variées. La partie sud-est du bassin est caractérisée par un climat subpolaire doux (classe 9 selon la carte des bioclimats de RnCan de 2006), qui favorise la présence d'une végétation mixte qui comprend des forêts mixtes de feuillus et de conifères (COBARIC, 2014). Le secteur plus au nord, où se trouvent les monts Notre-Dame, est soumis à un climat subpolaire subhumide avec une saison de croissance moyenne qui favorise la présence de forêts boréales (forêts de conifères sempervirents) (COBARIC, 2014). Le climat de type modéré subhumide à saison de croissance longue (classe 11) domine la majorité du BVRC (COBARIC, 2014). De plus, le BVRC compte deux domaines bioclimatiques différents, soit celui de l'érablière à tilleul et celui de l'érablière à bouleau jaune (COBARIC, 2014).

À partir de la comparaison des données de précipitations et de températures pour la période 1975-2010, le COBARIC (2014) a observé que les températures moyennes

annuelles ainsi que les précipitations moyennes annuelles présentaient une tendance à la hausse. De plus, ce constat s’aligne avec les portraits climatiques produits par Ouranos (2024), qui montrent une tendance générale à la hausse des températures dans le BVRC pour la période 1991-2020. Les données issues de l’Atlas hydroclimatique du Québec méridional, produit par le MELCCFP (2024), illustrent une augmentation des précipitations totales dans la région et une intensification des épisodes de pluies extrêmes, surtout en période estivale et automnale. Cette intensification des précipitations contribue également à une plus grande variabilité dans les débits, ainsi que l’augmentation des débits de pointes, observées dans plusieurs cours d’eau tributaires, dont les rivières Famine, du Loup et Saint-Victor (Biron et al., 2020 ; Boyer-Villemare et al., 2021 ; COBARIC, 2024).

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Afin de réaliser un portrait de l'aléa torrentiel dans la région, une double approche a été préconisée dans ce mémoire, soit une approche qualitative basée sur une revue de presse et une approche quantitative basée sur des indicateurs statistiques ainsi que l'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG). L'approche qualitative repose sur la recension historique des évènements torrentiels via la consultation des bases de données existantes et d'une revue de presse exhaustive. Elle est complétée par l'analyse des données hydrométéorologiques associées aux évènements historiques recensés. L'approche quantitative est basée d'une part, sur l'analyse statistique des indicateurs morphologiques des SBV et, d'autre part, sur une modélisation SIG de l'évolution de l'occupation du sol et des conditions de vulnérabilité environnementale à l'aléa torrentiel. La combinaison de ces deux approches permet de saisir les différentes dimensions de l'aléa torrentiel dans la région afin d'en obtenir un portrait plus complet.

Ainsi, ce chapitre présente la méthodologie employée, les sources utilisées et les traitements de données privilégiés. La première partie concerne l'aléa torrentiel –la recension des évènements historiques et la reconstitution des conditions hydrométéorologiques associées– alors que la seconde partie s'attarde à la recension des cônes alluviaux et la caractérisation des SBV afin d'identifier les facteurs de

vulnérabilité par le biais d'une rétrospective de l'évolution de l'occupation du sol et d'une analyse multicritère (AMC).

3.1 Portrait de l'aléa torrentiel

3.1.1 Recension des évènements historiques

L'approche historique adoptée pour dresser un portrait de la dynamique des crues torrentielles représente une avenue intéressante et valable. En effet, Douvinet et Delahaye (2010) ont analysé les crues rapides sur le plateau nord-ouest de la France à partir de données historiques, avec comme critère principal de distinction la rapidité du déclenchement des crues. De même, Archer et Fowler (2015) ont entrepris une démarche similaire en Angleterre, en différenciant les crues torrentielles dans les archives historiques à partir de critères établis depuis des évènements torrentiels documentés dans la région. Gaume et al. (2009) se sont quant à eux appuyés sur des conditions météorologiques propices à l'occurrence de crues éclairées, telles que les phénomènes convectifs, pour définir les crues torrentielles en Europe. Selon leurs observations, ces crues se manifestent principalement dans les bassins-versants de moins de 500 km² et sont généralement déclenchées par des pluies intenses d'une durée inférieure à un jour (Gaume et al., 2009).

Malgré ces exemples, on note l'absence d'un consensus quant aux critères spécifiques d'identification et de définition d'une crue torrentielle dans les archives historiques. En effet, on constate que les seuils de précipitations et de débits varient d'un-e auteur-e à l'autre, et les causes de déclenchement demeurent variables en fonction des spécificités géographiques et climatiques des régions étudiées. Au Québec, malgré l'occurrence d'évènements historiques marquants, aucun critère précis n'a été formulé pour la définition de ce phénomène. Selon l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ, 2014), le seuil d'émission d'alerte pour des pluies torrentielles est fixé à plus de 50 mm en 24 heures. En plus des précipitations, les facteurs anthropiques (occupation du sol, aménagement), hydrométéorologiques (température, évaporation,

ruissellement, perméabilité et porosité des sols) et les caractéristiques géomorphologiques (propriétés physiques des bassins-versants), influencent l'occurrence et l'intensité des événements torrentiels (Borga et al., 2008 ; Borga et al., 2011; Quéfféléan et al., 2019 ; Quilbé et al., 2008). De plus, la faible densité des stations météorologiques dans le BVRC couplée à la nature localisée de ces événements, rend difficile la réduction de l'incertitude associée à l'application d'un seuil de précipitations pour la discrimination des événements torrentiels.

À la lumière de ce constat et du contexte géographique régional, dans le cadre de ce mémoire, un événement torrentiel est défini comme une crue ou une inondation répertoriée qui survient pendant la période estivale, soit entre juin et septembre, et provoquée par des épisodes de fortes précipitations sur une courte période. Certains auteurs choisissent de discriminer les crues liées à des causes anthropiques, telles que les ruptures de barrages (Archer et Fowler, 2015). Néanmoins, il semble pertinent d'inclure ces événements dans cette étude afin de mieux évaluer l'impact des activités humaines sur la dynamique hydrologique du territoire. Ainsi, tous les événements torrentiels, soit les crues et les inondations, enregistrés pour la période de 1900 à aujourd'hui ont été comptabilisés. Il est à noter que certaines crues torrentielles ne sont pas considérées comme des inondations puisqu'elles peuvent avoir eu des impacts géomorphologiques (érosion, transport et sédimentation), sans nécessairement entraîner un débordement au-delà du lit du cours d'eau. Néanmoins, leur processus de déclenchement et leur fonctionnement sont similaires et donc, dans le cadre de cette recherche, il a été jugé essentiel de les intégrer, lorsque rencontré, dans la base de données pour établir un portrait de l'aléa torrentiel dans la région. De plus, il est à noter qu'aucun événement de coulée de débris ou de laves torrentielles (*debris flood, debris flow*) n'a été répertorié dans le BVRC. Ainsi pour la suite de ce mémoire, le terme « événement à caractère torrentiel » sera utilisé de manière à englober les deux phénomènes présents dans le BVRC, soit les crues et les inondations torrentielles.

La recension des événements historiques a été réalisée à partir de plusieurs sources documentaires, lesquelles sont détaillées ci-après en ordre d'importance. D'abord, la

base de données canadienne sur les catastrophes (BDC) a constitué une ressource précieuse en fournissant des informations détaillées sur les événements de sinistres de 1900 à aujourd'hui (Gouvernement du Canada, s.d.). La BDC est également sous forme de couche de points ce qui a permis d'extraire les endroits situés dans la zone à l'étude correspondant au BVRC. Nous avons également utilisé les données provenant de la base de données de la sécurité civile et appliqué la même méthodologie (Sécurité publique Québec, s.d.). La base de données AQUARISQ, qui contient des renseignements sur les sinistres passés et présents liés aux inondations au Québec, leurs impacts et les conditions météorologiques associées, a aussi été consultée (Ouranos, 2015). La combinaison de ces bases de données officielles a permis d'obtenir une première compilation d'événements historiques et des informations pertinentes, dont le degré de sévérité, les dommages, le nombre de personnes évacuées et d'autres détails supplémentaires associés à chacun des événements recensés. Les rapports de la Commission des eaux courantes du Québec pour les événements survenus entre 1912 et 1948 sur la rivière Chaudière ont aussi été consultés. Ceux-ci ont notamment fourni de plus amples informations sur l'une des crues estivales les plus importantes au Québec, soit celle de juin 1917.

Par la suite, une revue de presse a été effectuée dans les différents journaux régionaux à partir des archives numériques disponibles à la Bibliothèque des archives nationales du Québec (Banq). Les recherches ont été réalisées à partir de mots-clés liés aux aléas torrentiels tels que : pluie torrentielle, inondation estivale, orage, tempête, ouragan, érosion, crue éclair et gonflement de ruisseau. Cette étape a permis d'identifier d'autres événements non recensés dans les bases de données préalablement mentionnées. Ces sources documentaires sont fréquemment sollicitées dans les recherches visant la reconstruction de l'historique des inondations puisqu'elles permettent de bonifier le nombre d'événements retracés, fournissent fréquemment des images des sinistres, de plus amples détails sur l'étendue des dommages occasionnés, ainsi qu'un aperçu de l'impact sur la population (Jones, 1998 ; Saint-Laurent et Hähni, 2008). Les deux principaux journaux quotidiens de la région de Québec, *Le Soleil* et

Le Devoir, ont été utilisés à cet égard et aussi les quotidiens en ligne de *La Presse*, *Radio-Canada* et *TVA Nouvelles*. Nous avons également porté attention aux plateformes régionales, telles que des plateformes comme *En Beauce*, qui a consisté en une source secondaire d'informations.

Les informations recensées des événements enregistrés ont d'abord été organisés de manière chronologique en incluant la date de l'évènement, la municipalité affectée, la cause, les détails hydrométéorologiques, les dommages, les informations diverses, la rivière associée (lorsqu'il y en a mention) et la source utilisée. Ensuite, ces informations ont été incluses dans une couche shapefile de format point. Certains événements sont localisés de façon précise lorsque des informations vis-à-vis celles-ci étaient disponibles (données fournies, intersection de rue, marqueur spatial quelconque) tandis que d'autres présentent une localisation approximative, associée à la ou les municipalités principalement affectées, en l'absence de données spécifiques à cet égard.

3.1.2 Analyse des conditions météorologiques

Les événements à caractère torrentiel sont provoqués par des événements météorologiques courts et de fortes intensités, souvent en lien avec des épisodes orageux et ce, dans des petits bassins-versants, généralement non jaugés (Marchi et al., 2009 ; Recking et al., 2012). Dans un tel contexte, la reconstitution des conditions hydrométéorologiques est ardue face à la faible couverture des stations hydrométéorologiques dans le temps et dans l'espace, ce qui implique une forte incertitude quant aux données enregistrées (Recking et al., 2012). De manière à répondre aux objectifs de recherche préalablement mentionnés, nous tenterons néanmoins d'établir un portrait général des conditions hydrométéorologiques associées aux événements torrentiels historiques malgré les incertitudes associées aux données et à leur provenance. En effet, les données historiques officielles de précipitations et de débit enregistrés disponibles sur de longues durées et couvrant le territoire du BVRC étant limitées, une attention particulière a été portée aux méthodes de mesures utilisées, à la période de collecte et aux éventuelles discontinuités temporelles.

Les données pluviométriques mensuelles proviennent d'Environnement Canada (2023), plus spécifiquement des données canadiennes sur le climat ajustées et homogénéisées (DCCAH), qui constituent des ensembles de données provenant de stations climatologiques. Ces données subissent un traitement statistique afin de corriger les données historiques des stations en prenant en considération des facteurs non climatiques, dont les changements d'instruments de mesure ainsi que le déplacement des stations, le cas échéant (Environnement Canada, 2023). Les données de moyennes mensuelles des précipitations des mois de juin, juillet, août et septembre ont été extraites pour la période de 1913 à 2017 à partir de la station météorologique de Beauceville (ID 7027283). Cette station a été choisie en raison de la disponibilité des données sur une longue période et de son emplacement situé approximativement au centre du BVRC.

Les données hydrologiques relatives au débit proviennent du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), relevant du MELCCFP (CEHQ, 2023). Les informations quotidiennes, maximales et moyennes concernant le débit ont été extraites de la station Chaudière, située au pont-route 218 à Saint-Lambert-de-Lauzon (no de station 023402). Cette station a été choisie d'une part, pour créer une représentation hydrologique exhaustive du bassin-versant en raison de sa localisation en aval de la rivière Chaudière et, d'autre part, en raison de données continues depuis 1915 jusqu'à aujourd'hui. Cependant, on observe une absence de données de débit issues du CEHQ pour la période de 1927 à 1935.

Les précipitations totales mensuelles (mm) pour les mois de juin, juillet, août et septembre et les données de débit moyen et maximum ont été comparées et superposées pour chacune des années depuis 1913 à aujourd'hui. La valeur du débit journalier pour les événements à caractère torrentiel enregistré dans la recension historique a ensuite été extirpée.

3.2 Caractérisation géomorphologique des sous-bassins-versants

Afin de caractériser les bassins-versants d'un point de vue géomorphologique, nous avons localisé les cônes alluviaux et calculé les indices morphométriques influant sur la dynamique torrentielle.

3.2.1 Identification et localisation des cônes alluviaux

L'identification des cônes alluviaux situés à l'exutoire des tributaires de la rivière Chaudière repose sur l'inventaire réalisé par Juneau (2020) à partir d'une photo-interprétation exhaustive. Nous avons ensuite validé ces données et actualisé le tout à l'aide des orthophotos de 2015, ainsi que le logiciel Google Earth qui fournit des images jusqu'en octobre 2023. Cela a permis d'actualiser le nombre de cônes alluviaux recensés par Juneau (2020), lequel avait déjà préalablement mentionné dans son mémoire l'incertitude associée à la photo-interprétation due à la variation du niveau de la rivière en fonction du moment de la prise des photographies aériennes.

3.2.2 Caractérisation et indices morphométriques

Les limites des sous-bassins-versants (SBV) ont été extraites à partir de la couche des bassins hydrographiques multiéchelles du Québec, produites par le MELCCFP et disponibles sur Données Québec (MELCCFP, 2023). Afin de limiter le nombre de SBV à comptabiliser, les analyses ont été limitées à l'échelle des SBV de niveau 2, qui compte 93 SBV au total, dont sept ont été exclus (ID no 02340107, 02340065, 02340111, 02340248, 02340515, 02340319, 02340185) dû à des erreurs générées lors des calculs à partir du MNT. C'est donc 86 SBV de niveau 2 qui ont été considérés pour notre étude. Toutes les manipulations géomatiques ont été réalisées avec le logiciel ArcGis Pro.

Les travaux classiques de Horton (1945), Langbein (1947), Smith (1950), Strahler (1952), Miller (1953) et Schumm (1956) ont permis de mettre les bases quant à l'étude des propriétés morphométriques d'un bassin-versant. Les indices morphométriques les

plus influents selon les travaux de différents auteurs et autrices (Angillieri, 2008 ; Bhat et Ahmed, 2013 ; Mesa, 2006 ; Alam et al., 2021 ; Patton et al., 2022) quant à la dynamique torrentielle d'un SBV ont été ensuite calculés (Tableau 3.1). Des choix méthodologiques ont également discriminé certains indices jugés pertinents dans certaines études, comme le coefficient de rugosité (HU), ou les courbes hypsométriques (pour chaque SBV), dû à la complexité de leurs calculs.

Tableau 3.1 Indices morphométriques, méthode de calcul et sources associées.

Indice morphométrique	Méthode	Source
Aire (A)	Analyse SIG	Horton (1945)
Périmètre (P)	Analyse SIG	Horton (1945)
Pente moyenne du SBV (%)	Analyse SIG	(Besson, 1996)
Pente du cours d'eau (%)	Analyse SIG	(Besson, 1996)
Densité de drainage (Dd)	$Dd = \frac{L}{A}$ Où L = total de la longueur des cours d'eau et A = Aire du BV	Horton, (1945)
Coefficient de compacité de Gravelius (Kg)	$KG = \frac{P}{2\sqrt{\pi} * A}$	Gravelius, (1914)
Coefficient de Melton (Me)	$Me = \frac{(Altitude \text{ max} - altitude \text{ min})}{\sqrt{A}}$	Melton, (1957)

Les indices linéaires tels l'aire et le périmètre des SBV ont été obtenus à partir de l'outil *Add Surface Information* dans ArcGisPro, qui calcule des statistiques linéaires basées sur un modèle numérique de terrain (MNT), avec dans ce cas-ci une résolution de 10 mètres. Le MNT a été construit à partir des données Lidar disponibles sur la plateforme du MRNF, Forêt Ouverte. Ensuite, les pentes moyennes des SBV ont été extraites à partir de l'outil *Summarize Within*, où les données du MNT ont été utilisées pour

obtenir les pentes à une échelle de 10 mètres, puis transformées en une moyenne à partir des polygones des SBV. La pente des cours d'eau a été extraite également à partir du MNT, mais en utilisant l'outil *Add surface Information* pour inclure la pente dans la table attributaire d'une couche Shapefile de format ligne, qui représentait les principaux cours d'eau. Ensuite, la moyenne de l'entière des lignes a été réalisée à l'échelle du SBV à partir de l'outil *Summarize Within*.

La densité de drainage (Dd) représente un indicateur fondamental de la topographie du bassin-versant et fournit une mesure quantitative à la fragmentation du relief et au potentiel d'écoulement des eaux (Horton, 1945). Une valeur supérieure à 1,5 suggère un environnement avec des zones escarpées et imperméables, particulièrement dans les régions où l'on retrouve de grandes quantités de précipitations (Horton, 1945). Une densité de drainage de 0 à 1 implique une perméabilité suffisante pour que les précipitations s'infiltrent dans le sol (Horton, 1945).

Le coefficient de compacité Gravelius (Kg) renseigne sur la forme générale du bassin-versant. Plus l'indice est élevé, plus le bassin possède une forme allongée. Un indice faible indique un bassin-versant de forme circulaire (Musy, 2005).

Le coefficient de Melton correspond au relief divisé par la racine carrée de l'aire du bassin-versant (Melton, 1957 dans Wilford et al., 2004). À partir des résultats (entre 0 et 1), il est alors possible d'identifier le processus hydrogéomorphologique dominant, à savoir : un écoulement fluvial (*floods*) avec une valeur inférieure à 0,23, un écoulement hyperconcentré (*debris floods*) pour des valeurs entre 0,23 et 0,57 et, une coulée de débris (*debris flows*) si la valeur est supérieure à 0,57. Le coefficient de Melton est donc un indicateur indirect de la capacité de transport sédimentaire du bassin-versant à partir des caractéristiques morphologiques de celui-ci.

3.3 Analyse et modélisation des facteurs de vulnérabilité

3.3.1 Analyse des changements de l'occupation du sol

Les variations de l'occupation du sol au sein du BVRC ont été déterminées par l'analyse des changements dans l'aire occupée par chaque catégorie d'utilisation du sol pour les périodes 2000-2010, 2010-2020 et 2000-2020 à partir des données d'Agriculture Canada (2020). Ces données, en format de couches raster contiennent 19 valeurs, chacune représentant une classe de couverture terrestre (Tableau 3.2). Afin de faire la comparaison, nous avons utilisé les classes regroupées de celles-ci, définies par le GIEC, qui regroupent les valeurs sous six grandes catégories, soit *settlement*, *water*, *forest*, *cropland*, *grassland*, *wetland* et *other land*.

Tableau 3.2 Catégories d'occupation du sol par Agriculture Canada (2020) et classe du GIEC correspondantes.

GridCode (valeur)	Classe de couverture terrestre	Classe GIEC correspondante
1	Temperate or sub-polar needleleaf forest/forêt de conifères tempérée ou subpolaire	<i>forest</i>
2	Sub-polar taiga needleleaf forest/forêt de conifères (taiga) ou subpolaire	<i>forest</i>
5	Temperate or sub-polar broadleaf deciduous forest/Forêt feuillue tempérée ou subpolaire	<i>forest</i>
6	Forêt feuillue tempérée ou subpolaire/Forêt mixte	<i>forest</i>
8	Temperate or sub-polar Shrubland/Arbustaie tempérée ou subpolaire	<i>forest</i>
10	Temperate or sub-polar grassland/Prairie tempérée ou subpolaire	<i>forest</i>
11	Sub-polar or polar shrubland-lichen-moss/Arbustaie à lichens et à mousses polaire ou subpolaire	<i>forest</i>
12	Sub-polar or polar grassland-lichen-moss/Prairie à lichens et à mousses polaire ou subpolaire	<i>forest</i>
13	Sub-polar or polar barren-lichen-moss/Lande à lichens et à mousses polaire ou subpolaire	<i>forest</i>
14	Wetland/Terre humide	<i>wetland</i>
15	Cropland/Terre agricole	<i>Cropland</i>
16	Barren lands/Terre stérile	<i>Other land</i>
17	Urban/Milieu urbain	<i>Settlement</i>
18	Water/Eau	<i>Water</i>

Afin d'analyser l'évolution de l'occupation du sol, nous avons extrait, pour chaque catégorie du GIEC, l'aire occupée par celle-ci, et ce pour les années 2000, 2010 et 2020. Ensuite nous avons calculé la différence et le pourcentage de variation.

Pour calculer et cartographier l'évolution des surfaces urbanisées pour la période de 2000 à 2020 par SBV, nous avons extrait de la couche raster d'occupation du sol, la catégorie *settlement*, puis à partir de l'outil *Raster Calculator* nous avons appliqué la formule suivante.

$$\left(\frac{(\text{Catégorie X 2020} - \text{Catégorie X 2000})}{\text{Catégorie X 2000}} \right) * 100$$

La moyenne de cette évolution a ensuite été calculée pour chaque sous-bassin à l'aide de la méthode Zonal Statistics, ce qui a permis ainsi de générer la moyenne de changement pour chaque catégorie d'occupation des sols. Néanmoins, nous avons appliqué cette méthode seulement à la catégorie d'occupation du sol *settlement* puisque le calcul des autres catégories générerait des erreurs dues au trop faible pourcentage de changement détectable à une résolution de 30 mètres.

3.3.2 Analyse multicritère et indice de vulnérabilité environnementale

L'analyse multicritère (AMC) est une approche pertinente pour évaluer la susceptibilité des bassins-versants aux aléas torrentiels, puisqu'elle permet de prendre en considération une diversité de facteurs qui influencent ces phénomènes (Choudhury et al., 2022 ; Shawky et Hassan, 2023). Dans le cadre de ce mémoire, l'ambition est de tester la création d'un indice de vulnérabilité environnementale calculé en utilisant une méthode d'analyse multicritère à partir d'indices pondérés. Cette méthode consiste à additionner les pondérations attribuées à chaque indice, en fonction de leur contribution potentielle à l'aléa torrentiel. L'indice de vulnérabilité environnementale pourrait alors bonifier notre compréhension des zones sensibles aux aléas torrentiels lors d'un événement météorologique intense dans le BVRC.

Les indices inclus sont des facteurs clés considérés comme influents dans la littérature sur la dynamique torrentielle d'un bassin-versant, soit la pente (Besson, 1996), l'occupation du sol (Whol, 2006) et le potentiel de ruissellement (Liébault et al., 2005). Ces indices ont également été choisis en fonction de la disponibilité des données géospatiales. Tous les indices, décrits en détail ci-dessous, ont été calculés à une résolution uniforme de 30 m², en concordance avec la résolution des données disponibles, et choisies pour l'effet de lissage qu'elle permet, limitant ainsi les valeurs extrêmes observées dans les données issues de la technologie Lidar à haute résolution (1 m) (Mailhot et al., 2008). L'analyse a été réalisée à partir de données géospatiales matricielles traitées avec le logiciel ArcGIS Pro.

a) Indice de pente

La pente est le critère prépondérant dans la dynamique torrentielle et détermine la dynamique de ruissellement dans le bassin-versant (Besson, 1996 ; Recking et al., 2012 ; Whol, 2005). L'indice de pente (P) représente la pente moyenne du terrain à une échelle de 10 m² et a été réalisé à partir des données issues du MNT. La résolution de 30 m² permet de limiter les extrêmes dans les données contrairement aux données Lidar à une résolution plus fine (Mailhot et al., 2008). La pondération choisie se base sur les travaux de Mailhot et al. (2008) dans lesquels la pente moyenne du bassin-versant a été classifiée en quatre catégories : 1 étant la plus faible contribution au ruissellement et 4 étant la plus élevée (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Pondération de l'indice de pente (en pourcentage) selon la contribution au ruissellement de surface à partir des travaux de Mailhot et al. (2008)

Classe	Pente (%)
1	[0 – 3[
2	[3-8[
3	[8-13[
4	> 13

b) Indice de couverture du sol

Les données utilisées pour calculer l'indice de couverture du sol proviennent de « Couverture des terres du Canada » en date de 2020 et sont classifiées à une échelle de 30 mètres en fonction de l'utilisation principale du sol (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 Catégories provenant des données de Couvertures des terres du Canada (2020) utilisées pour l'indice d'occupation du sol.

Grid code	Catégorie
0-1	Temperate or sub-polar needleleaf forest
5	Temperate or sub-polar broadleaf deciduous forest
6	Mixed forest
8	Temperate or sub-polar shrubland
10	Temperate or sub-polar grassland
14	Wetland
15	Cropland
16	Barren lands
17	Urban
18	Water

L'indice de couverture du sol a été évalué, de façon qualitative en se basant sur la littérature scientifique (Andréassian, 2004 ; Bravard, 2002 ; Fortugno et al., 2017 ; Liébault, 2005, Whol ; 2006), par sa propension à amplifier le ruissellement. Les typologies utilisées ont ensuite été regroupées en quatre grandes catégories, présentées au tableau 3.5, puis pondérées selon une échelle de 1 à 4 : 1 étant la plus faible influence sur le ruissellement et 4 la plus élevée.

Tableau 3.5 Classes des catégories d'utilisation du sol et GridCode (GC) associé aux valeurs de la couche raster de Couvertures des terres du Canada (2020).

Classe	Catégories	GC
1	Eaux et forêts	0,1,5,6,18
2	Prairies et milieux humides	8,10,14
3	Terres cultivées et arides	15,16
4	Urbain	17

c) Indice de potentiel de ruissellement

L'indice de ruissellement est basé sur les travaux de Gagné et al. (2013), qui a classifié le potentiel de ruissellement à partir de la cartographie des dépôts de surface (Tableau 3.6). Les données utilisées des dépôts de surface dans le BVRC proviennent de SIGÉOM (2022), où la couche de polygone a été transformée en une couche raster avec une résolution de 30 m² et reclassifiée en quatre classes en fonction de leur potentiel de ruissellement.

Tableau 3.6 Indice de potentiel de ruissellement à partir du classement des sols minéraux à partir des travaux de Gagnée et al. (2013).

Classe	Catégorie	Code dépôt
1 (A)	Faible potentiel de ruissellement quand humide	A/Gs/Gx/GxT/O/Qa
2 (B)	Potentiel de ruissellement modérément faible	Ed/T
3 (C)	Potentiel de ruissellement modérément élevé quand humide	L/LGb/LGd/MGa/MGb /MGd/R/Ap
4 (D)	Potentiel de ruissellement élevé	Aucun présent sur le BVRC

d) Analyse multicritère

Les indices ont ensuite été standardisés sur une échelle de 0 à 1 afin de permettre leur intégration via l'outil *Weighted Overlay* dans ArcGIS Pro à partir de l'outil « Raster calculator » et en utilisant la formule suivante:

$$\frac{(Valeur\ indice - valeur\ indice\ minimum)}{(Valeur\ indice\ maximum - valeur\ indice\ minimum)}$$

La pondération des indices (Tableau 3.7) est fondée sur la revue de littérature réalisée préalablement en fonction des facteurs aggravants du ruissellement et représente donc le potentiel de réactivité d'un SBV à une précipitation importante en fonction de ces conditions environnementales fixes. Puisque les conditions vulnérables sont variables d'une région à une autre, la pondération utilisée est basée sur une interprétation de la littérature scientifique et des méthodes d'AMC employées pour ce type d'aléa (Choudhury et al., 2022 ; Shawky et Hassan, 2023 ; Pande et Moharir, 2017). Ainsi, la

pente étant le critère prépondérant pour la présence d'une dynamique torrentielle (Besson, 1996 ; Neboit-Guillot, 2010, Newson, 1978, Obeidat, 2021) s'est vue attribuer la plus haute pondération. L'indice de l'occupation du sol et du coefficient de ruissellement (Gagné et al., 2013) ont tous deux des valeurs de 0,25, puisque ces critères comportent la plus grande incertitude en raison de la résolution de 30 m² utilisée. Finalement, les résultats de l'indice de vulnérabilité environnementale à une échelle de 30 m² ont été calculés pour chaque sous-bassin-versant en utilisant l'outil *Summarize Within*.

Tableau 3.7 Pondération des indices standardisés de pente, d'utilisation du sol et de potentiel de ruissellement dans l'analyse multicritère de la vulnérabilité environnementale.

Indices	Pondération
Pente	0,50
Utilisation du sol	0,25
Potentiel de ruissellement	0,25

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus à partir des méthodes d'analyses énoncées dans le précédent chapitre. D'abord sont présentés les résultats pour réaliser le portrait historique de l'aléa, soit la recension des événements torrentiels dans le BVRC, les conditions hydrométéorologiques d'occurrence ainsi que les facteurs de déclenchement associés. Ensuite, afin de modéliser la vulnérabilité environnementale, les résultats issus de la caractérisation morphométrique et l'évaluation des facteurs de vulnérabilité sont présentés.

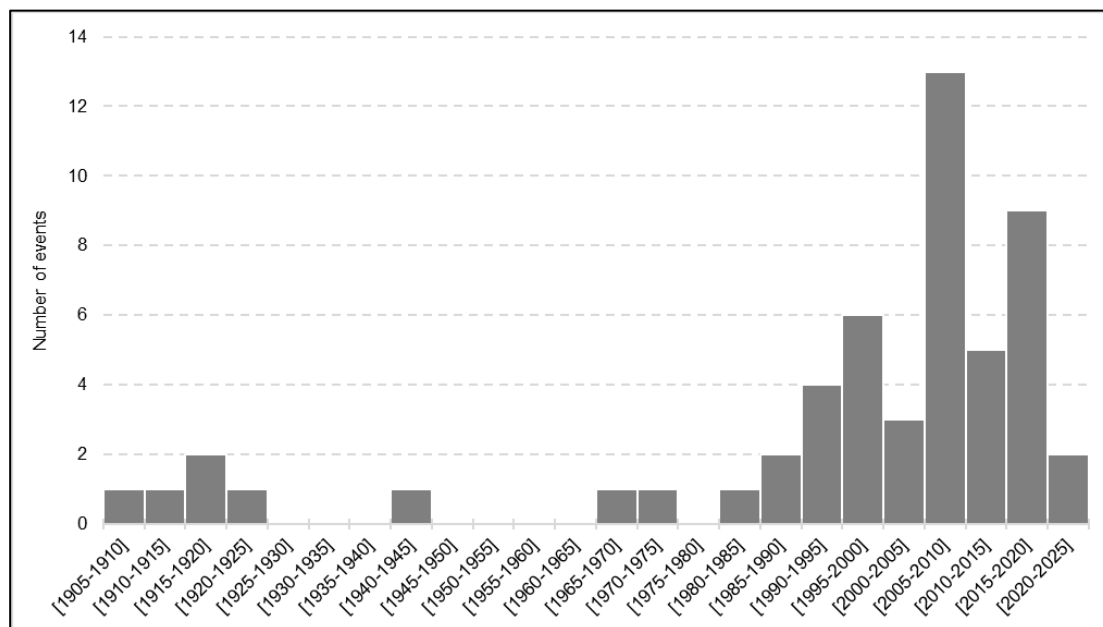
4.1 Recension des événements torrentiels

L'analyse des bases de données couplée à la revue de presse a permis de répertorier 53 événements à caractère torrentiel au cours de la période allant de 1900 à aujourd'hui. De plus, il est à noter qu'aucun événement de coulée de débris ou de laves torrentielles (*debris flood, debris flow*) n'a été répertorié dans le BVRC. Les événements répertoriés et leurs caractéristiques sont présentés de manière chronologique dans le tableau fourni en Annexe A. Les informations cartographiques et les figures du présent chapitre sont issues des statistiques tirées de ce tableau.

4.1.1 Répartition temporelle des événements au cours des 20^e et 21^e siècles

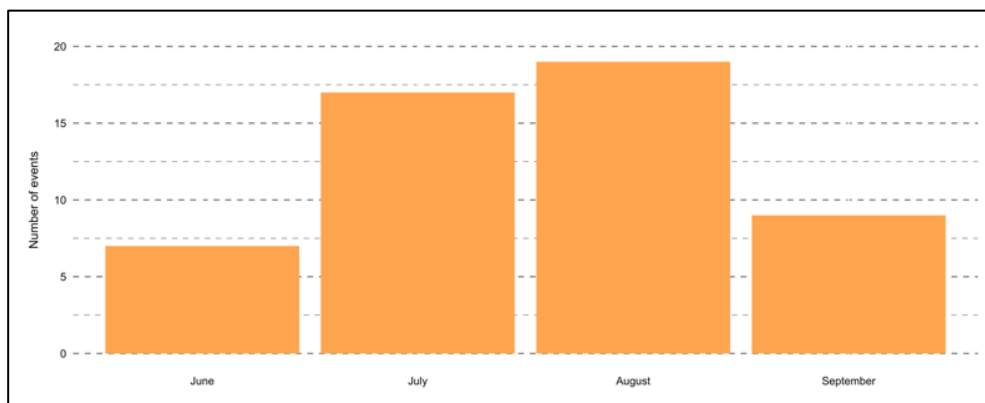
Les figures 4.1 et 4.2 montrent la répartition quinquennale et mensuelle des événements historiques recensés.

Figure 4.1 Répartition des évènements de crues torrentielles par période quinquennale de 1900 à aujourd'hui dans le BVRC.



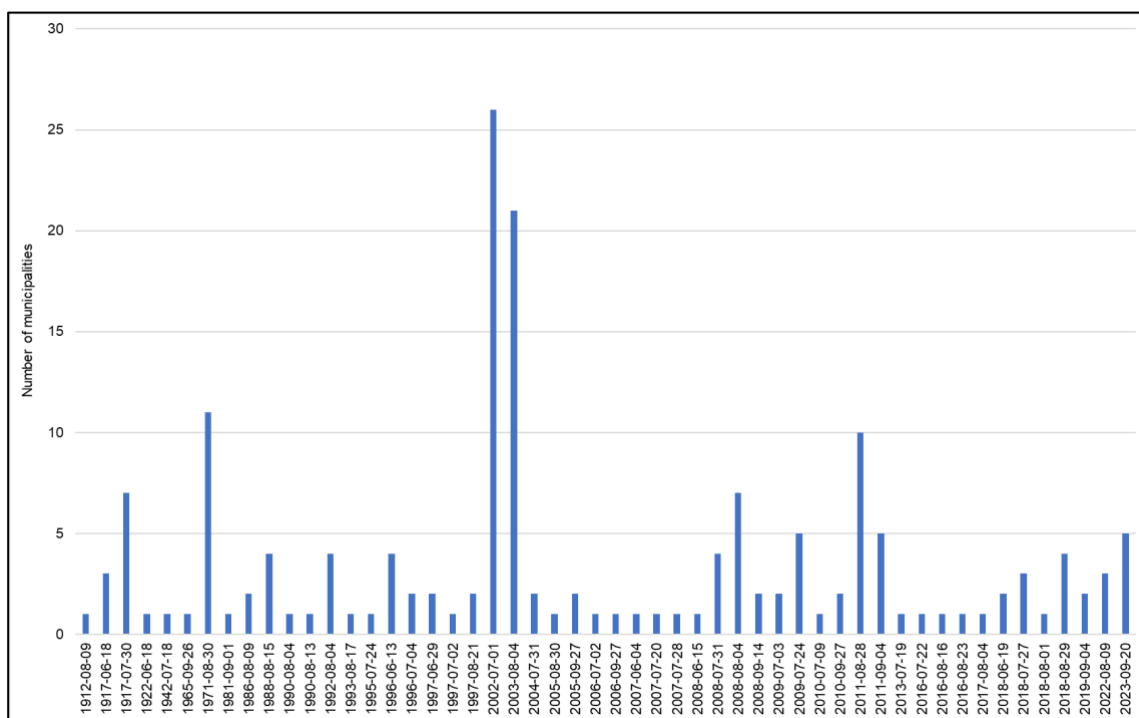
L'occurrence dans le temps révèle une variabilité importante (Figure 4.1). En effet, on constate que le 20^e siècle se distingue par la présence de longues périodes de faible occurrence alors que le 21^e siècle concentre la majorité des évènements recensés. Entre 1905 et 1975, les évènements de crues torrentielles sont relativement rares, avec au plus deux évènements par période quinquennale. La période de 1980 à 2000 a connu une augmentation constante jusqu'à atteindre un maximum de six évènements. Les années de 2005 à 2010 sont celles qui ont connu l'activité torrentielle la plus forte avec un maximum de 13 évènements.

Figure 4.2 Répartition des évènements recensés par mois pour la période de 1900 à aujourd'hui dans le BVRC.



La répartition mensuelle des évènements recensés (Figure 4.2) révèle une tendance forte pour les mois de juillet et août, alors que le mois de juin présente le moins grand nombre d'évènements. Ce constat correspond également à une tendance plus large au sein du BVRC, dont les évènements en juillet et août représentent respectivement 16 % et 15 % des occurrences d'inondations (Boyer-Villemaire, 2022).

Figure 4.3 Nombre de municipalités affectées par chacun des évènements historiques recensés.

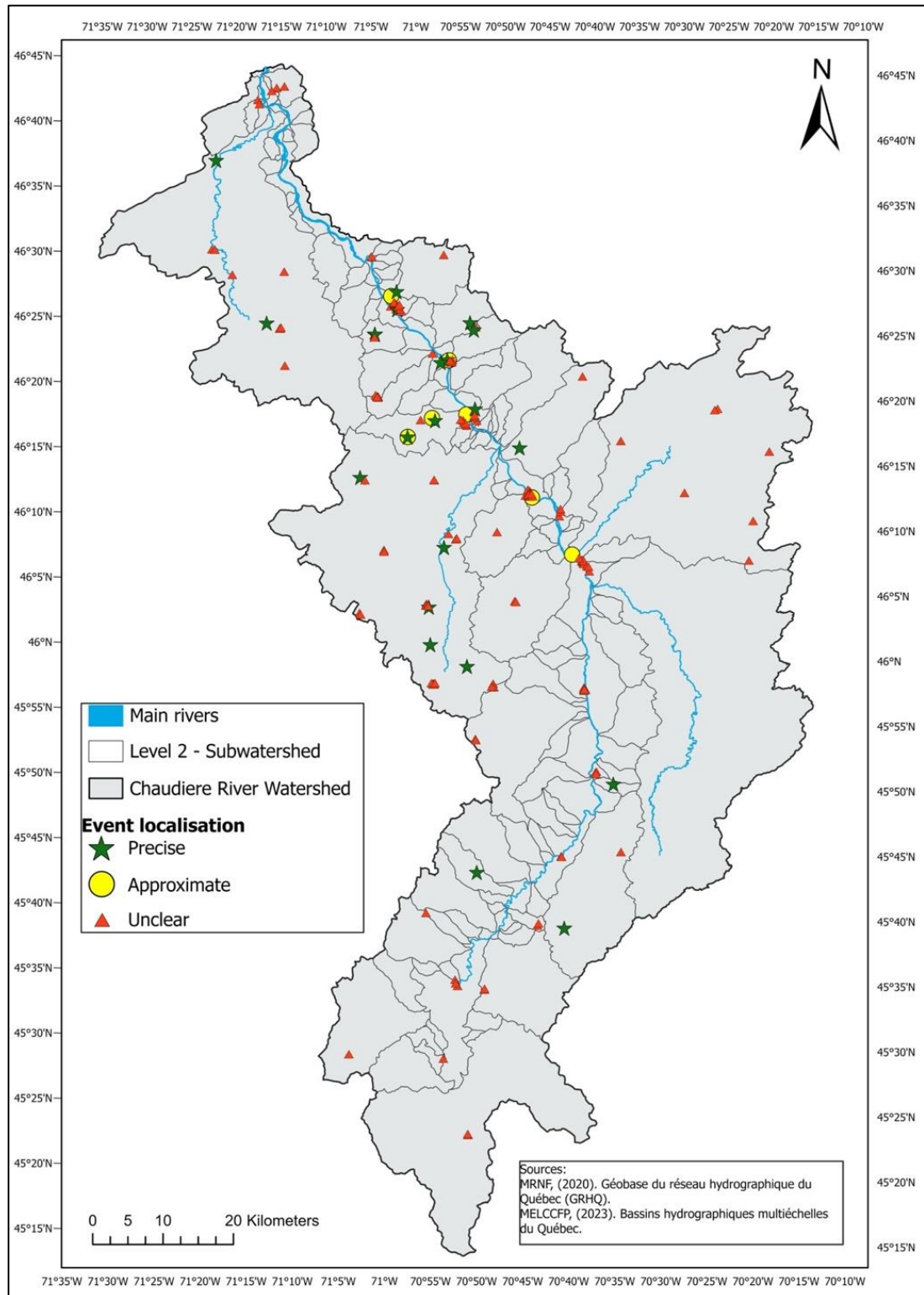


La majorité des évènements historiques enregistrés ont affecté cinq municipalités ou moins (Figure 4.3), ce qui corrobore la nature géographique localisée des crues et inondations torrentielles. Néanmoins, on constate que deux évènements ont provoqué des crues et dommages dans plus de 20 municipalités, soit les évènements du 1^{er} juillet 2002 et du 4 août 2003, lié au passage de précipitations d'origine convective. L'occurrence à un an d'intervalle entre ces évènements est assez remarquable.

4.1.2 Répartition géographique des évènements torrentiels

La localisation géographique des évènements torrentiels recensés dans le BVRC met en évidence certains SBV propices à ce type de crue. Si pour certains évènements des coordonnées géographiques de localisation ont été fournies (étoiles vertes à la Figure 4.4), il en est autrement pour plusieurs autres évènements. En effet, la localisation approximative (cercles jaunes) d'autres évènements est issue d'indicateurs spatiaux disponibles dans les sources consultées, à savoir des intersections de rue, des bâtiments municipaux, etc. La localisation imprécise (triangles rouges) représente les évènements où aucun marqueur spatial n'était disponible et mentionné dans les sources consultées. Ces évènements ont donc été localisés à l'intérieur des limites des municipalités affectées.

Figure 4.4 Représentation géographique des événements torrentiels recensés de 1900 à aujourd'hui et niveau de précision associé à leur localisation.



Une grande partie des événements recensés se situe dans la section de la Moyenne-Chaudière (Figure 4.4). En effet, dans la Haute-Chaudière et la Basse-Chaudière les événements sont plus disparates dans l'espace. La plupart des événements sont concentrés aux abords de la rivière Chaudière ou de ses principaux affluents, bien que pour plusieurs événements la localisation demeure imprécise. On note aussi une plus grande quantité d'événements à proximité des grandes municipalités comme Sainte-Marie, Saint-Georges et Beauceville. Ces trois municipalités sont les plus touchées avec 10 à 17 événements (Figure 4.5). Les zones plus au sud comme Saint-Martin montrent également une fréquence modérée à élevée d'événements torrentiels recensés (5 à 9). Les zones périphériques du bassin-versant ont généralement moins d'événements (1 à 4), tandis que certaines municipalités n'ont, apparemment, enregistré aucun événement à caractère torrentiel. Néanmoins, il est important de souligner que l'on observe au moins un événement torrentiel dans 49 (soit 48 %) des 102 municipalités du BVRC depuis 1900.

Figure 4.5 Répartition des évènements recensés en fonction des limites municipales.

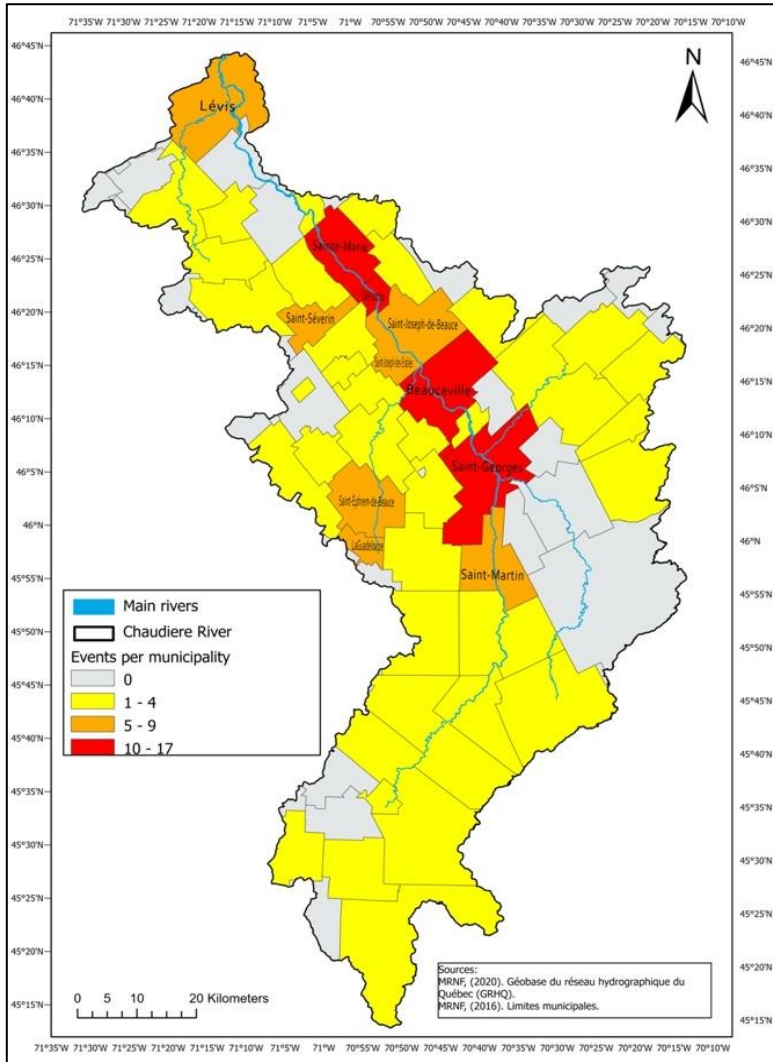


Figure 4.6 Répartition des évènements recensés en fonction des limites des sous-bassins-versants

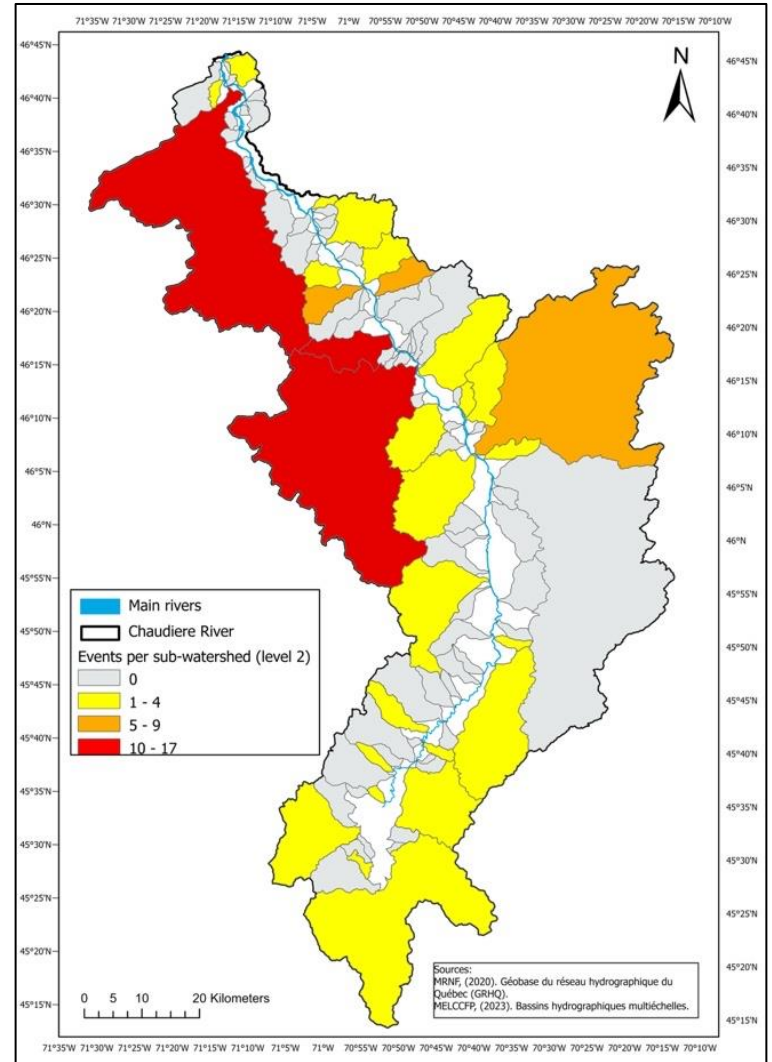


Tableau 4.1 Sous-bassins-versants ayant été affectés par plus de trois évènements torrentiels incluant le nombre d'évènement associé, la superficie, la pente moyenne (%) et la présence (1) ou l'absence (0) de cône alluvial.

Bassin-versant	Évènement (nb)	Superficie (km ²)	Pente (%)	Cône alluvial
Bras Saint-Victor	27	733,07	1,85	0
Des Fermes	12	64,64	3,33	1
Beaurivage	10	718,88	1,44	0
Morency	8	34,06	3,40	0
Famine	8	712,58	1,26	0
Nadeau	6	39,64	7,69	1
Savoie	4	22,93	5,83	1
Bélaïr	4	44,47	2,66	1
Chassé	3	77,34	2,74	1
Ardoise	3	22,71	2,65	0
Cantin	3	19,29	1,42	0

En général, les plus grands SBV ont connu plusieurs évènements, puisqu'ils regroupent davantage de SBV de niveau 3 à l'intérieur de leurs limites géographiques (Figure 4.6). Le bassin du Bras Saint-Victor a connu le plus grand nombre d'évènements à caractère torrentiel avec 27. La rivière des Fermes a le nombre d'évènements le plus significatif (12) par rapport à sa petite superficie (65 km²). Le bassin de la rivière Morency, avec moins de 35 km², a tout de même connu huit évènements à caractère torrentiel. Quatre SBV se caractérisent par des pentes moyennes supérieures à 3,0 %, soit ceux des Fermes, Morency, Nadeau et Savoie. Parmi les SBV avec le plus d'évènements, la moitié (50 %) ont un cône alluvial à leur embouchure avec la rivière Chaudière. Ces SBV sont généralement d'une plus petite taille par rapport aux autres sous-bassins du tableau 4.1 et ont une pente moyenne supérieure à 2,66 %.

4.2 Conditions hydrométéorologiques d'occurrence et facteurs déclencheurs

La compilation des débits mensuels moyens et maximaux pour les mois de juin à septembre est présentée aux figures 4.7 à 4.10, et couplée avec les données de précipitations mensuelles pour la période de 1913 à 2017. Les débits maximaux

quotidiens enregistrés lors des événements torrentiels recensés ont aussi été indiqués (triangles noirs) pour faciliter les comparaisons. Cela permet d'avoir un aperçu des conditions hydrométéorologiques requises, en fonction d'une approche historique, pour l'occurrence des crues torrentielles. À noter que les débits de 1926 à 1936 sont manquants dans la série de données du CEHQ pour la station de Saint-Étienne-de-Lauzon, néanmoins, aucun événement torrentiel n'a été recensé pour cette période.

Figure 4.7 Conditions hydrométéorologiques pour le mois de juin. Données mensuelles de pluie, représentées par l'histogramme. Débit moyen (en vert) et maximum mensuel (en rouge) enregistrés pour les années correspondantes. Débit journalier associé à un événement torrentiel, représenté par un triangle noir.

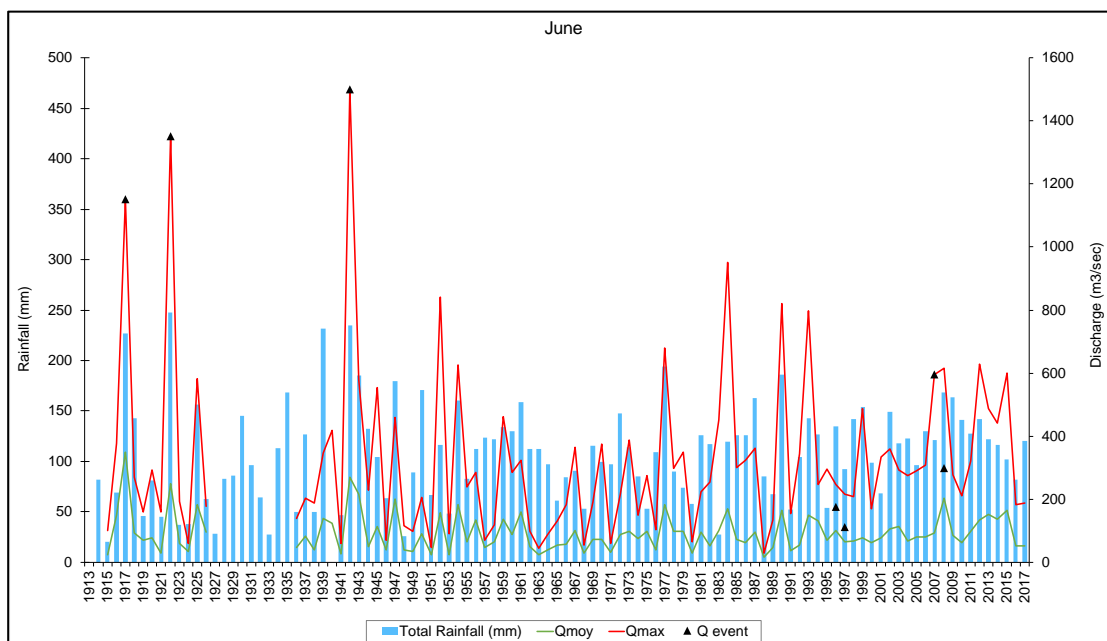


Figure 4.8 Conditions hydrométéorologiques pour le mois de juillet. Données mensuelles de pluie, représentées par l'histogramme. Débit moyen (en vert) et maximum mensuel (en rouge) enregistrés pour les années correspondantes. Débit journalier associé à un évènement torrentiel, représenté par un triangle noir.

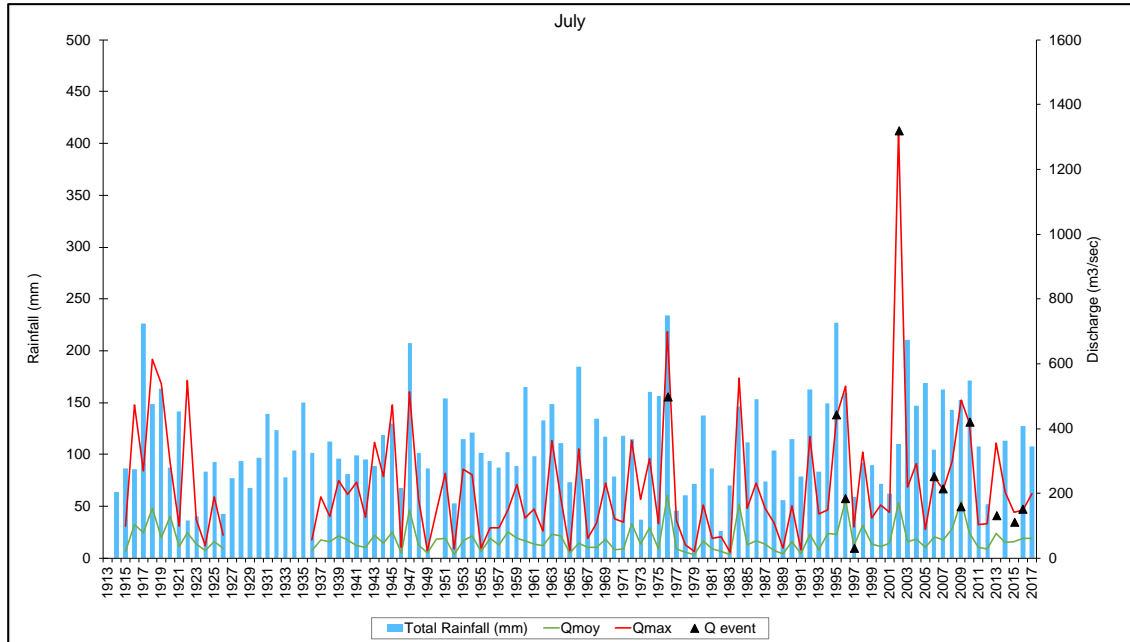


Figure 4.9 Conditions hydrométéorologiques pour le mois d'août. Données mensuelles de pluie, représentées par l'histogramme. Débit moyen (en vert) et maximum mensuels (en rouge) enregistrés pour les années correspondantes. Débit journalier associé à un évènement torrentiel, représenté par un triangle noir.

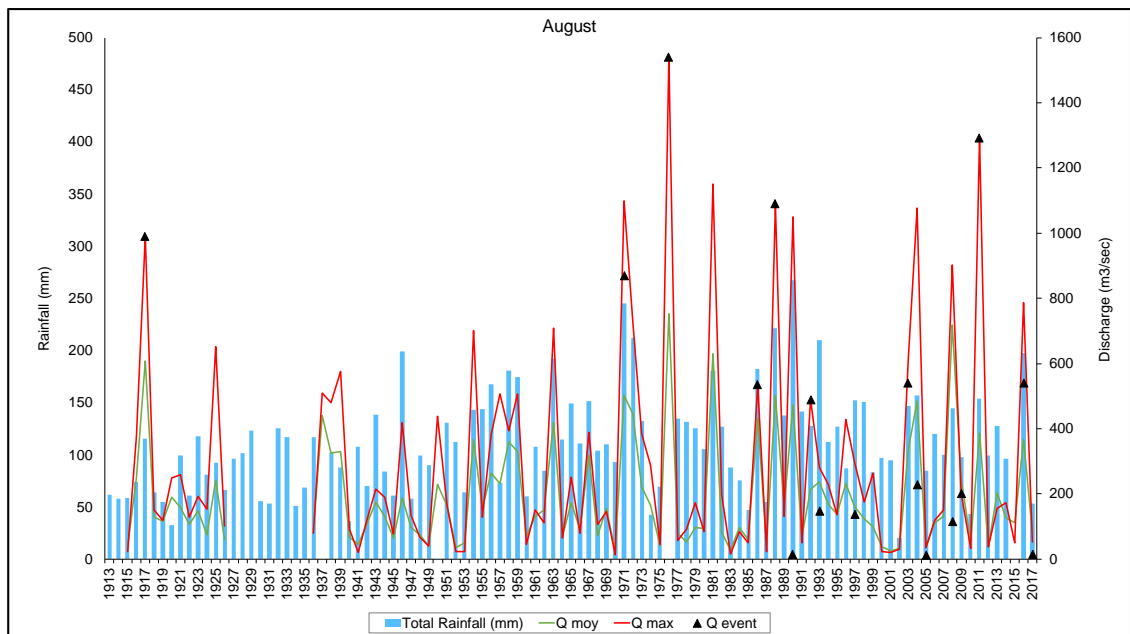
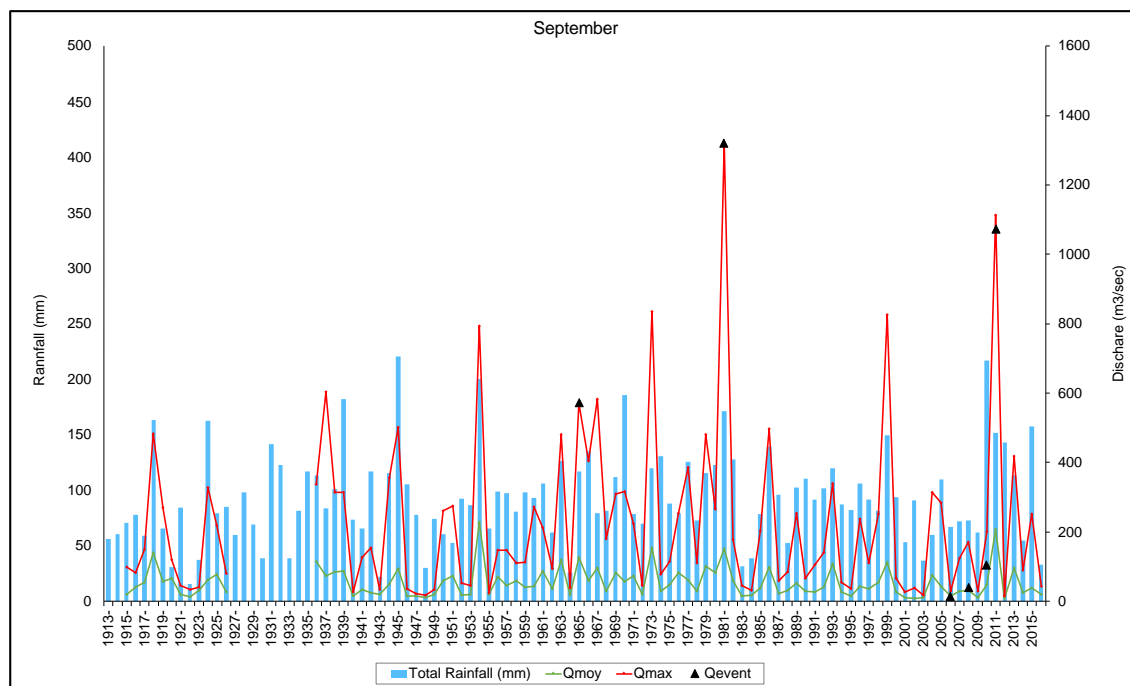


Figure 4.10 Conditions hydrométéorologiques pour le mois de septembre. Données mensuelles de pluie, représentées par l'histogramme. Débit moyen (en vert) et maximum mensuel (en rouge) enregistrés pour les années correspondantes. Débit journalier associé à un évènement torrentiel, représenté par un triangle noir.



On note une forte relation entre la quantité mensuelle de précipitations et le débit maximal atteint pour une même année. En effet, les pointes de crues sont généralement associées aux grandes valeurs de précipitations. Cette relation n'est cependant pas toujours présente, ce qui laisse supposer que d'autres facteurs influent de manière significative sur les débits maximums en été. En revanche, les débits quotidiens enregistrés lors d'un évènement torrentiel correspondent assez souvent au pic de crue mensuelle maximale atteint pour l'année correspondante. Il existe toutefois des exceptions pour certains évènements recensés qui, par exemple, présentent des débits journaliers très faibles. Cela pourrait indiquer l'influence d'autres facteurs géographiques ou encore la non représentativité des données disponibles.

4.2.1 Facteurs déclencheurs de nature météorologique

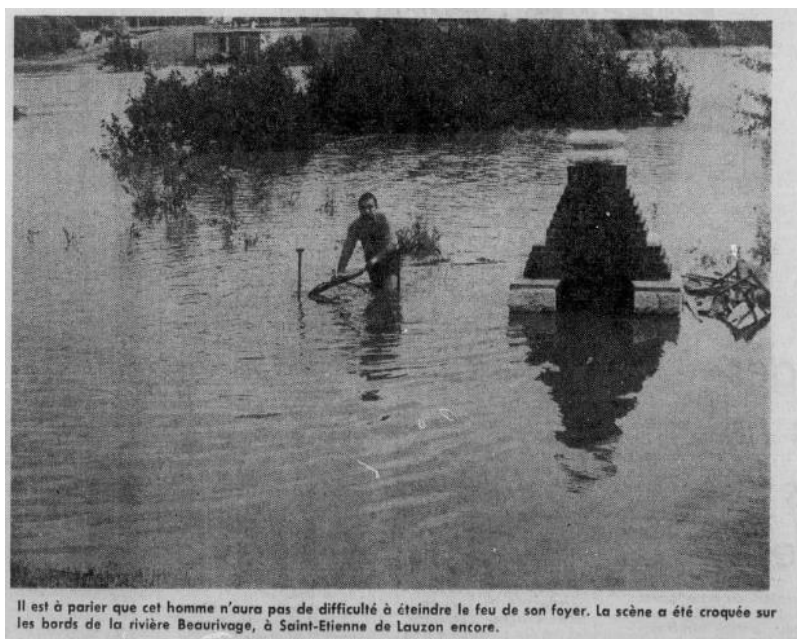
Dans cette perspective, la recension historique et l'analyse détaillée des conditions météorologiques associées à chacun des événements torrentiels recensés a permis d'identifier avec plus de précision trois catégories de facteurs déclencheurs : les facteurs de nature météorologique, anthropique et géomorphologique. Ceux-ci sont détaillés dans les paragraphes qui suivent et mis en relation avec les événements historiques recensés.

Les épisodes d'orages violents semblent être un facteur déclencheur important dans le BVRC. En effet, 11 événements ont été recensés en lien avec des phénomènes d'orages violents. Au cours de la nuit du 1^{er} juillet 2002, un orage violent a déversé 58 mm de pluie en quatre heures et provoqué des inondations dans 27 municipalités, ce qui en fait l'évènement torrentiel avec l'emprise spatiale la plus vaste sur le territoire beauceron. Les conséquences ont été significatives avec des dégâts aux infrastructures routières municipales et provinciales ainsi que des pannes électriques localisées. Un an plus tard, le 4 août 2003, un évènement similaire survient lors d'un orage violent. Au plus fort de l'orage, 71,1 mm de pluie sont déversés en quelques heures seulement, mais les pluies demeurent abondantes sur une période de trois jours. Vingt et une municipalités ont été touchées par la crue importante de plusieurs affluents, occasionnant des dommages évalués à près de 300 000\$. Au cours des vingt années qui ont suivi, trois autres crues torrentielles sont survenues, mais de manière plus localisée avec quelques municipalités touchées à chaque fois. La sévérité de ces crues varie de mineure à modérée. À titre d'exemple, le 9 août 2022, un orage important déverse l'équivalent de deux mois de pluie en deux jours, avec un pic de 70,3 mm de pluie en 24 heures enregistré à la station météorologique de Beauceville. Les rivières Famine et Chaudière débordent, mais ne causent que des inondations mineures à Beauceville, Saint-Georges et Saint-Joseph-des-Érables.

Les tempêtes atmosphériques, en provenance des masses d'eaux chaudes océaniques, sont aussi à l'origine de précipitations abondantes capables de générer des crues torrentielles. Trois épisodes ont été recensés dans le BVRC. Le premier épisode remonte au 30 août 1971 avec la tempête tropicale Doria, laquelle a déversé

50 mm de pluie en moins de trente heures avec pour résultat le débordement de cours d'eau dans 10 municipalités (Figure 4.11) (Le Soleil, 1971 ; Ouranos, 2015).

Figure 4.11 L'inondation du 30 août 1971 à Saint-Étienne-de-Lauzon suite au passage de la tempête tropicale Doria.



Le second épisode a eu lieu le 11 août 1976. Les vestiges de l'ouragan Belle ont entraîné de 50 à 75 mm de pluie en peu de temps sur le territoire beauceron (Le Soleil, 1976). Les pluies torrentielles ont provoqué la sortie du lit de plusieurs rivières, y compris la rivière Chaudière. Les médias régionaux ont qualifié cet événement comme étant « la pire inondation estivale depuis 1917 » (Le Soleil, 1976, p.14). Enfin, le 28 août 2011, l'ouragan Irène frappe le sud du Québec et affecte fortement la région de la Beauce avec des précipitations avoisinant les 100 mm en vingt-quatre heures (Sécurité publique Canada, s.d.). Plusieurs infrastructures routières sont alors endommagées sévèrement.

4.2.2 Facteurs déclencheurs de nature anthropique

Le 2 octobre 1905 à Sainte-Marie, un embâcle de bois, directement lié aux activités intensives d'exploitation forestière sur le territoire à cette époque, est à l'origine d'une inondation torrentielle. Couplée à des précipitations abondantes en peu de

temps, l'accumulation de billots de bois dans le lit de la rivière crée un embâcle de bois et provoque une inondation à Sainte-Marie. Dans la décennie suivante, trois évènements majeurs et de nature similaire sont survenus en lien avec l'exploitation forestière intensive dans le BVRC. Le 18 juin 1917, suite à des pluies torrentielles, 60 000 cordes de bois obstruent le passage des eaux à Sainte-Marie (Grenier, 2005 ; Ouranos, 2018). Un mois plus tard, le 31 juillet 1917, se produit la pire inondation de l'histoire de la Beauce où un orage violent, qualifié de tempête électrique par les médias régionaux, déverse près de 140 mm de pluie dans la nuit du 30 juillet, ce qui correspond à la fonte d'un couvert de neige de 1,4 mètre (Grenier, 2005 ; Société historique de Sartigan, 2015). La rivière Chaudière en furie emporte alors 98 bâtiments et déplace 113 maisons, en plus de causer plus de 100 000 \$ de dommages au réseau ferroviaire du Québec central (Société historique de Sartigan, 2015). Suite à cet évènement, l'ingénieur Bourbonnais présente un rapport qui dénonce la présence d'estacades appartenant aux compagnies forestières qui obstruent le libre passage des eaux de la rivière (Bourbonnais, 1917). Il propose alors des mesures d'atténuation du risque d'inondation, telles que des plantations sur les berges et la construction de barrages en amont pour réguler le débit d'eau. Il suggère également le déplacement des routes, la relocalisation du village de Sainte-Marie et de déclarer inhabitable certains secteurs de Vallée-Jonction, Saint-Joseph et Beauceville (Grenier, 2005). Ces recommandations, en raison des coûts importants qu'elles engendreraient de la part du public et du privé, n'ont pas eu de suivi adéquat à l'époque.

Figure 4.12 Dégâts à Saint-Georges suite à l'inondation du 31 juillet 1917 (BANQ, s.d.a).



Cinq ans plus tard, le 18 juin 1922, une inondation mémorable liée au dragage se produit à Sainte-Marie. Suite à la pression exercée par les citoyens et citoyennes de Sainte-Marie, la Brown Corporation termine le stockage du bois dans les tributaires à proximité de Sainte-Marie cette année-là. Il faudra néanmoins patienter jusqu'en 1947 afin que « toute accumulation de bois cesse dans le lit de la Chaudière » (Grenier, 2005, p.17).

4.2.3 Facteurs déclencheurs de nature géomorphologique

À Beauceville, le 15 août 1988, on mentionne dans les médias que « le gonflement d'un ruisseau a entraîné le bris d'un tuyau situé tout près d'une école et l'effondrement d'une partie d'un muret de terre sur lequel passait une voie ferrée » (Le Devoir, 1988, p.8). Cet évènement est survenu suite à des précipitations d'une durée de seulement quatre heures, mais « d'une intensité rarement observée » (Le Devoir, 1988, p.8). L'utilisation des termes « gonflement d'un ruisseau » suggère un changement rapide de la dimension et de l'écoulement du ruisseau en réponse aux précipitations violentes. D'un point de vue géomorphologique, un tel changement dans l'écoulement est fréquemment associé à de l'érosion, du transport

des sédiments et une modification rapide de la morphologie du lit. Lors de cet évènement, le Bureau de la protection civile du Québec a émis une alerte de niveau quatre pour les riverains de la rivière Chaudière, un niveau d'alerte qui est habituellement réservé aux crues printanières importantes.

Figure 4.13 Crue du ruisseau d'Ardoise le 13 août 1990 (Le Soleil, 1990; p.A-3).



Le 13 août 1990, des pluies torrentielles s'abattent sur Saint-Georges avec 100 mm en moins de 48 heures (MSPC, s.d.). L'inondation qui a suivi a été principalement attribué aux gonflements des ruisseaux, plutôt qu'au débordement de la rivière Chaudière, et est considérée, en 1990, comme l'une des pires inondations estivales depuis celles de juillet 1917 et 1976 (Le Soleil, 1990). Les conséquences sont dévastatrices avec des ponceaux emportés, des tronçons de route endommagés, des sous-sols inondés et des glissements de terrain, entraînant une facture qui s'élève à près de 5 799 000\$. Le maire de Saint-Georges souligne que « Les Beaucerons sont habitués à la traditionnelle débâcle du printemps. Cependant, cette inondation est la

plus dévastatrice à survenir en saison estivale » (Le Soleil, 1990, p.3). Le ruisseau d'Ardoise a été identifié comme le principal responsable des dégâts. L'article du Soleil (1990) mentionne que le ruisseau, habituellement d'une hauteur de 10 cm en été, est passé de son état habituel à une rivière en un court laps de temps (Figure 4.13). Cette transformation, accentuée par la rupture d'un barrage situé en amont du ruisseau, a généré une crue particulièrement chargée en sédiments, puisqu'alimentée par l'érosion des berges et les glissements de terrain. L'impact sur l'hôpital de Saint-Georges a été particulièrement sévère, où la boue charriée par la crue a laissé une trace de cinq pieds sur les murs du sous-sol, où on estime les dommages à environ 150 000\$ (Le Soleil, 1990).

4.3 Caractérisation des sous-bassins-versants

Les résultats obtenus, présentés de façon détaillée dans le tableau de caractérisation des SBV à l'Annexe B, sont présentés ici sous forme de tableaux, graphiques et cartes afin de mettre en évidence les principaux constats issus de cette analyse.

4.3.1 Identification des cônes alluviaux

Au total, 26 sous-bassins-versants sur un total de 86 présentent un cône alluvial à leur embouchure, soit environ 30 %. Les cônes alluviaux identifiés sont principalement localisés dans la section centrale du BVRC, à savoir la Moyenne-Chaudière, bien que quelques-uns soient également présents dans la partie amont correspondant à la Haute-Chaudière (Figure 4.14). Aucun cône alluvial n'a été répertorié dans la Basse-Chaudière. Dix-sept cônes ont été identifiés et recensés sur le versant ouest de la rivière Chaudière par comparaison à neuf cônes alluviaux sur le versant est.

Figure 4.14 Localisation (en rouge) des sous-bassins-versants qui présentent un cône alluvial à leur embouchure dans le bassin-versant de la rivière Chaudière.

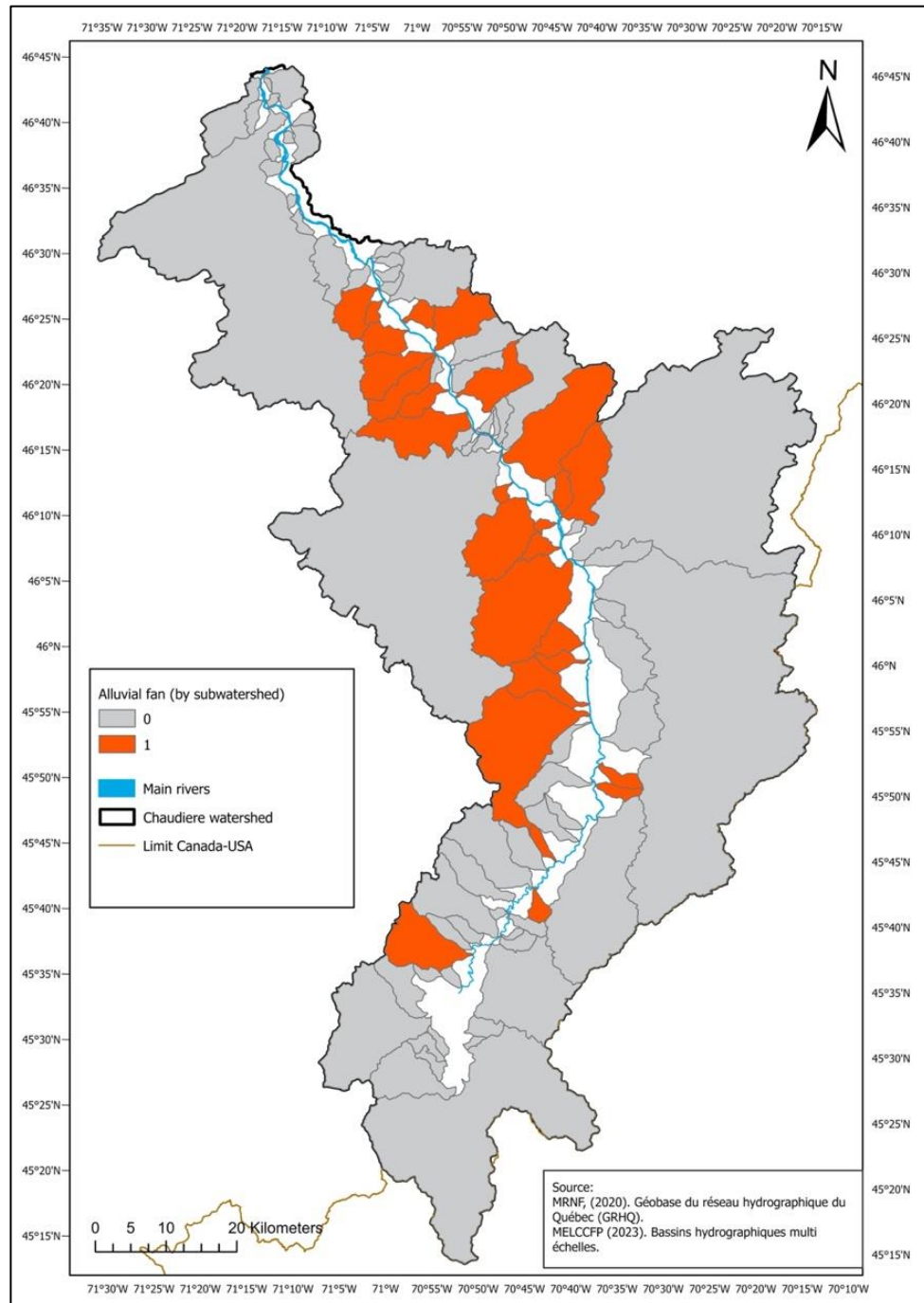


Figure 4.15 Cônes alluviaux présents à l’embouchure des rivières Cliche (à gauche) et Pouliot (à droite) à partir des images satellitaires de Google Earth (2023).



Tableau 4.2 Caractéristiques (aire, pente moyenne et pente des cours d’eau) des SBV avec la présence d’un cône à leur embouchure.

Nom bassin	Superficie (km ²)	Pente moyenne (%)	Pente moyenne des cours d’eau (%)
Basque, Ruisseau	3,5	4,2	4,6
Fermes, Rivière des	64,6	3,3	3,0
Carter, Ruisseau	10,6	4,2	3,4
Cliche, Rivière	17,1	7,7	4,3
Coop, Ruisseau de la	10,6	5,6	3,0
Dutil, Ruisseau	11,3	1,9	1,7
Nadeau, Rivière	39,6	7,7	3,5
Belair, Rivière	44,5	2,7	2,7
Gilbert, Rivière	63,0	2,7	2,8
Glen, Rivière	63,5	2,5	2,0
Mathieu, Rivière	4,6	3,7	3,7
Savoie, Rivière	22,9	5,8	4,4
Moulin, Rivière du	77,7	2,0	2,9
Plante, Rivière des	120,9	2,6	2,7
Pouliot, Rivière	43,6	3,2	2,5
Roy, Ruisseau	20,5	2,3	2,0
Saint-Elzéar, Ruisseau	5,8	3,8	3,0
Chassé, Rivière	77,3	2,7	2,8
Shenley, Rivière	35,1	2,7	1,5
Vallée, Rivière	28,8	2,3	2,1
Vidal-Morin, Ruisseau à	9,0	3,8	2,8
02340076 ¹	11,0	4,5	3,8
02340413 ¹	7,0	2,0	2,3

02340419 ¹	9,1	5,1	4,3
02340620 ¹	7,8	1,9	1,9

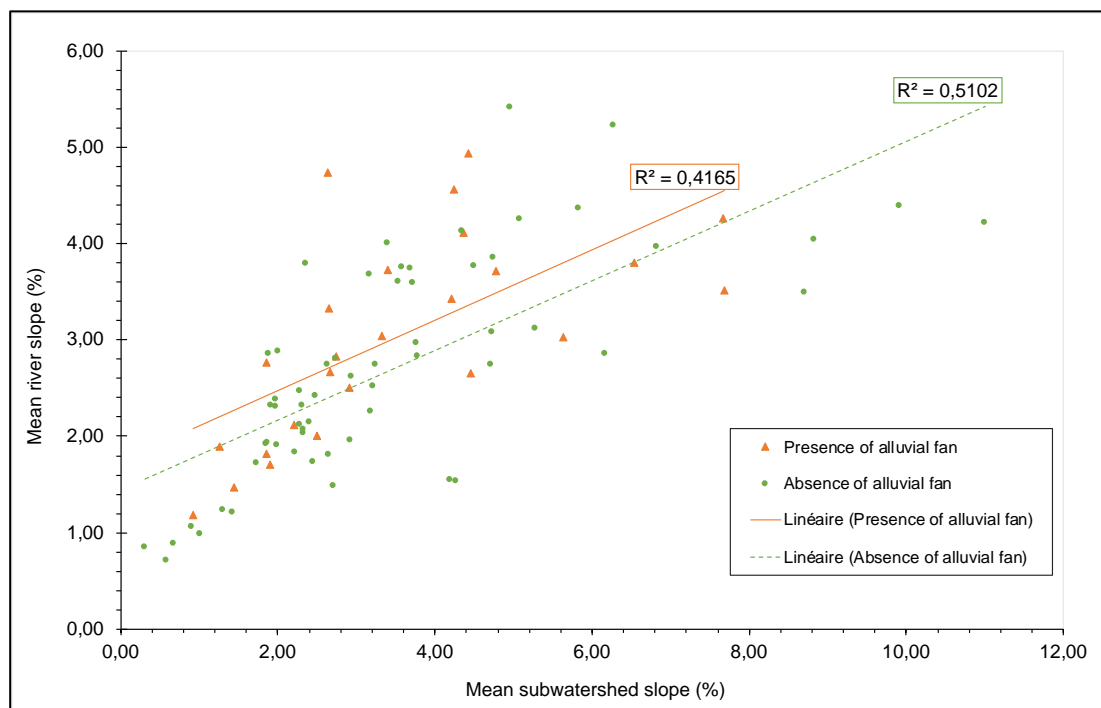
¹Appellation conforme aux toponymes attribués par la CEHQ (2023)

Généralement, les SBV de petites superficies avec des pentes prononcées affichent des conditions propices à la formation de cônes alluviaux, tels que le ruisseau Basque, avec une petite superficie (3,5 km²) et des pentes moyennes respectivement de 4,2 % pour le bassin et de 4,56 % pour le cours d'eau. En revanche, on retrouve également des sous-bassins de plus grande superficie, comme la rivière des Plante (120,9 km²), ce qui laisse présager une disponibilité sédimentaire et une énergie du cours d'eau (pente moyenne de 2,7 %) suffisante au transport de ceux-ci. La présence généralisée de cours d'eau supérieures à 2 % pour la majorité des sous-bassins avec la présence d'un cône alluvial souligne le rôle crucial de cet indice dans la dynamique torrentielle et la présence de dépôt à l'embouchure de ces tributaires.

4.3.2 Pente

On observe une relation linéaire positive entre la pente moyenne des SBV et la pente moyenne des cours d'eau (Figure 4.16).

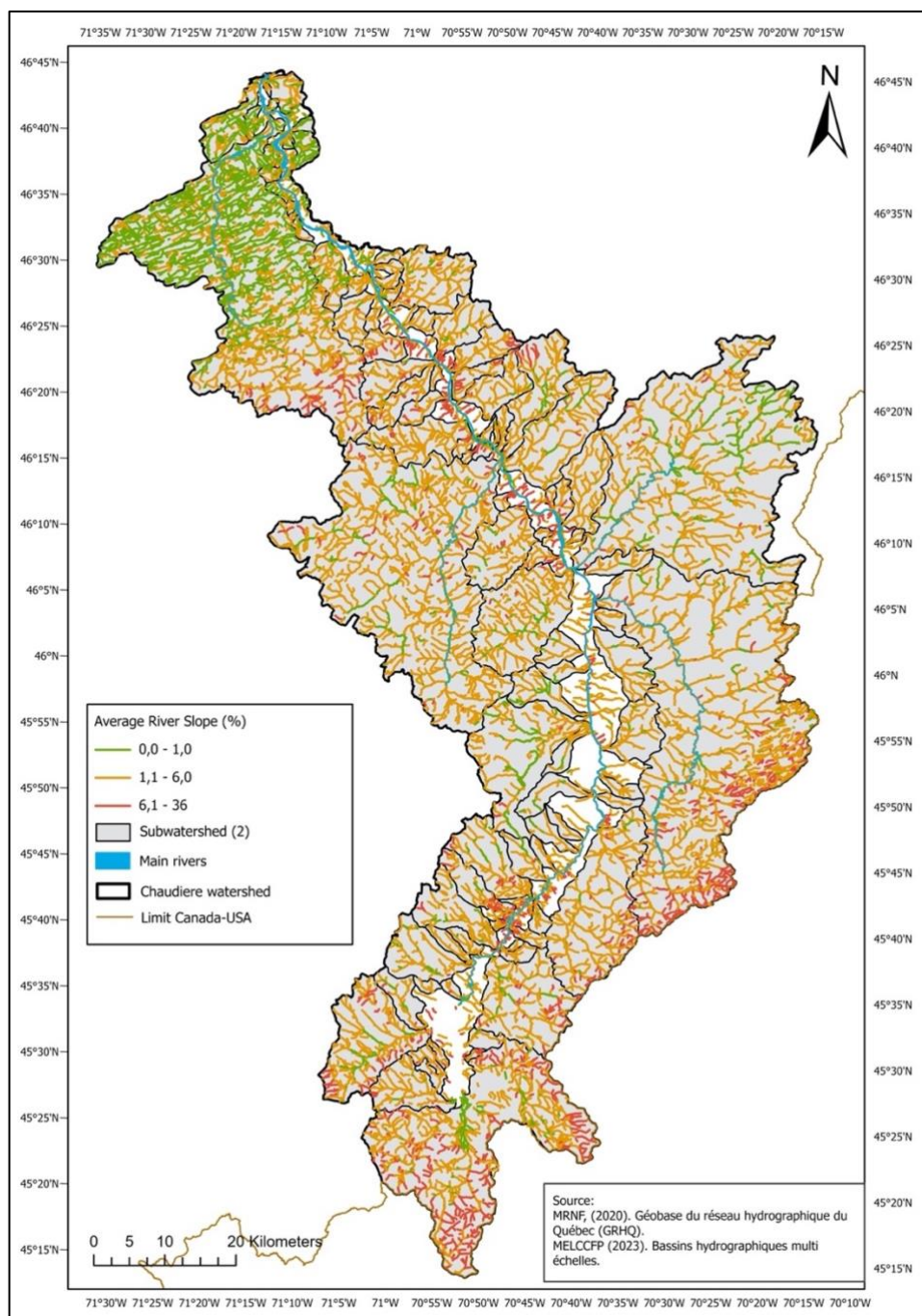
Figure 4.16 Relation entre la pente moyenne des SBV et la pente moyenne de leur cours d'eau principal. Les triangles oranges indiquent les SBV avec un cône à leur embouchure et les cercles verts les SBV qui en sont dépourvus.



Il est possible d'observer une relation linéaire positive entre la pente moyenne du SBV et la pente moyenne des cours d'eau. Une forte proportion des SBV présente une pente de 2 à 4 % et une pente du chenal de 1 à 3 %. Les SBV avec des pentes raides (> 8 %) montrent cependant une moins grande variabilité avec une concentration significative autour de 4 % pour la pente des cours d'eau. On observe que les plus fortes pentes des cours d'eau (> 4 %) se situent généralement dans les SBV avec des pentes moyennes de 4,5 à 6 %.

Les SBV avec un cône alluvial à l'embouchure ont en moyenne des pentes de 2 à 5 % et présente une variabilité plus importante de la relation (R^2 de 0,4165) entre la pente moyenne du cours d'eau et la pente moyenne du SBV. Les SBV dépourvus de cônes alluviaux montrent une variété de pentes, mais une prédominance pour les pentes douces inférieures à 3 % avec des cours d'eau aux pentes modérées à faibles. Les SBV avec une pente moyenne supérieurs à 8 % ne semblent pas favoriser la formation de cône alluvial. Il est toutefois à noter que seulement quatre SBV sont dans cette situation, ce qui n'est peut-être pas représentatif.

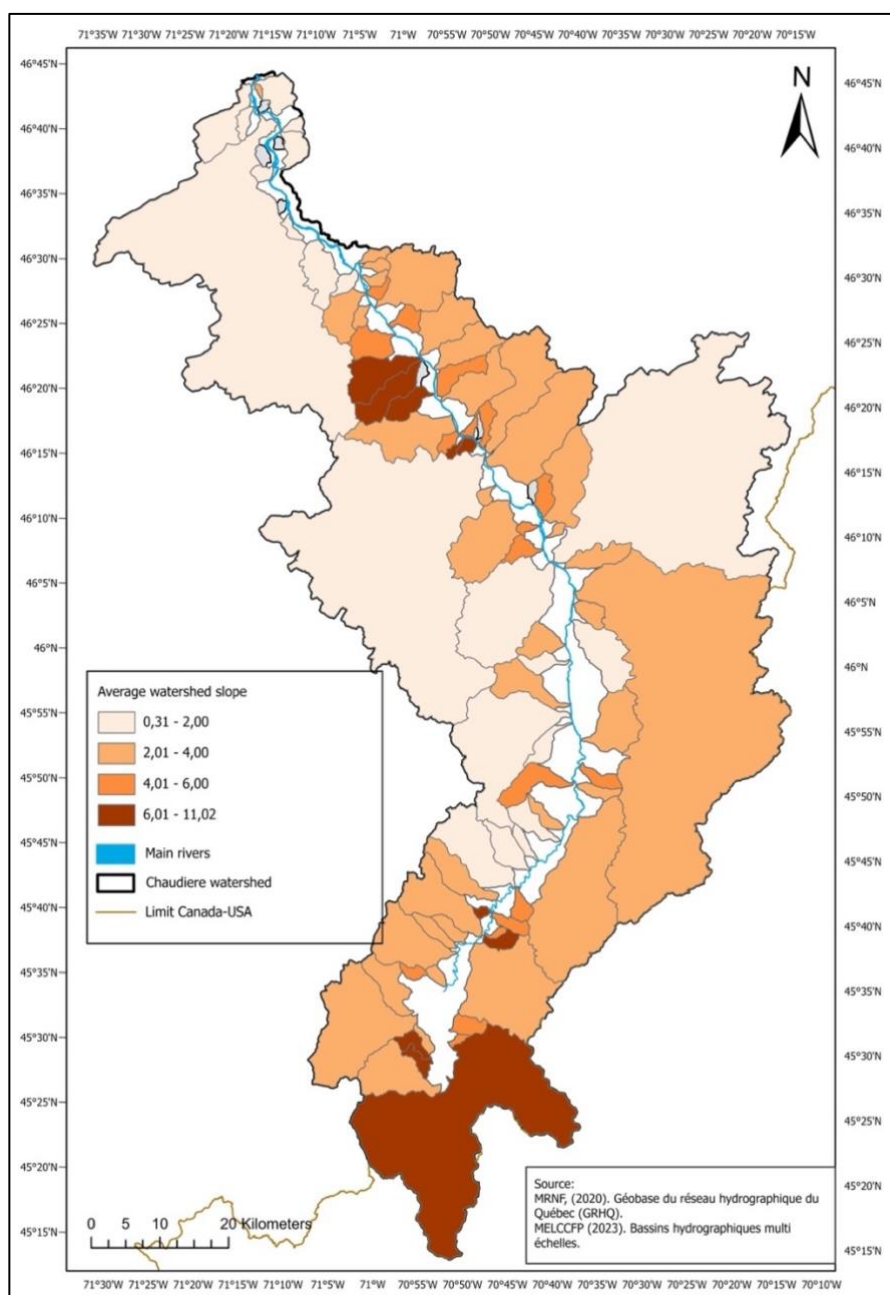
Figure 4.17 Pentés moyennes des cours d'eau selon la typologie de Besson (1996).



La figure 4.17 illustre la pente des cours d'eau (%) représentée en fonction de la classification de Besson (1996), où les rivières de plaines ont des valeurs de 0 à 1 %, les rivières torrentielles de 1 à 6 % et les torrents des pentes supérieures à 6 %. Il est ainsi facile de voir la distinction entre les unités physiographiques du BVRC.

En amont, où l'on retrouve les plus hauts sommets, se situe la plus grande concentration de cours d'eau à forte pente ($> 6\%$). Dans la Moyenne-Chaudière, on observe des cours d'eau avec une pente de 1 à 6 %, soit les rivières torrentielles. Il est également intéressant de noter que plusieurs cours d'eau avec des pentes supérieures à 6 %, soit des torrents, se retrouvent à la confluence avec la rivière Chaudière. De façon générale, les cours d'eau avec des pentes supérieures à 6 % appartiennent généralement à des cours d'eau de premier ordre selon de classification de Strahler. Il est également possible d'observer la délimitation correspondant au début des Basses-Terres du Saint-Laurent avec des cours d'eau d'une pente de 0 à 1 %. De plus, on observe que ces rivières ont été fortement linéarisées en raison de l'usage agricole dominant dans cette région.

Figure 4.18 Pente moyenne des sous bassin-versant de niveau 2 au sein du BVRC.



On retrouve les SBV avec les valeurs de pente moyenne les plus élevées (supérieures à 6 %) principalement dans la Haute-Chaudière en-tête de bassin-versant ainsi que de façon sporadique dans la Moyenne-Chaudière (Figure 4.18). Les SBV d'une plus grande superficie présentent des valeurs moyennes moins élevées que pour les plus petits SBV. On remarque également que les tributaires de la Moyenne-Chaudière ont un SBV avec une pente moyenne supérieure à 4 %. En

Moyenne-Chaudière, les SBV Cliche, Lessard et Nadeau, tous limitrophes ont des pentes moyennes supérieures à 6 %. La partie aval du BVRC présente des pentes plus faibles, voir très faibles (0,7 à 1 %).

4.3.3 Densité de drainage

La densité de drainage influence le temps de réaction d'un bassin-versant lors de précipitations (Horton, 1945). Cette réaction dépend, bien entendu, de plusieurs variables telles que les conditions météorologiques, la végétation, le sol, la géologie, le relief, la perméabilité des dépôts et de la roche, et la répartition et l'intensité des processus géomorphologiques en cours (Schumm, 1956 ; Melton, 1958 ; Horton, 1945 ; Tucker et al., 2001). Un indice de densité de drainage élevé peut alors indiquer une susceptibilité accrue aux crues rapides (Alam et al., 20201 ; Benzougagh, 2019 ; Kouedjou et al., 2021).

Les valeurs de densité de drainage, à une résolution de 10 mètres, sont présentées à la figure 4.19. La valeur maximale pour le BVRC est de 1,5 km/km², ce qui représente une densité de drainage moyenne. Les valeurs de densité de drainage les plus élevées sont situées à la jonction des principaux affluents de la rivière Chaudière, soit à celle de la rivière du Loup, au Bras-Saint-Victor, à la rivière Famine. La rivière du Moulin présente également de fortes valeurs de densité de drainage au sein de son bassin-versant. On observe également des valeurs élevées à la confluence de cours d'eau avec un ordre Strahler différent. Le carte des SBV en fonction de la densité de drainage (figure 4.20) montre des disparités significatives tout au long de la rivière Chaudière. En effet, on note des valeurs élevées pour plusieurs SBV associés à des ruisseaux comme ceux des Basque, Scully, Des Graines, Poulin et Paul-Lessard, tous situés en Moyenne-Chaudière.

Figure 4.20 Carte de densité de drainage à une résolution de 10 mètres du BVRC.

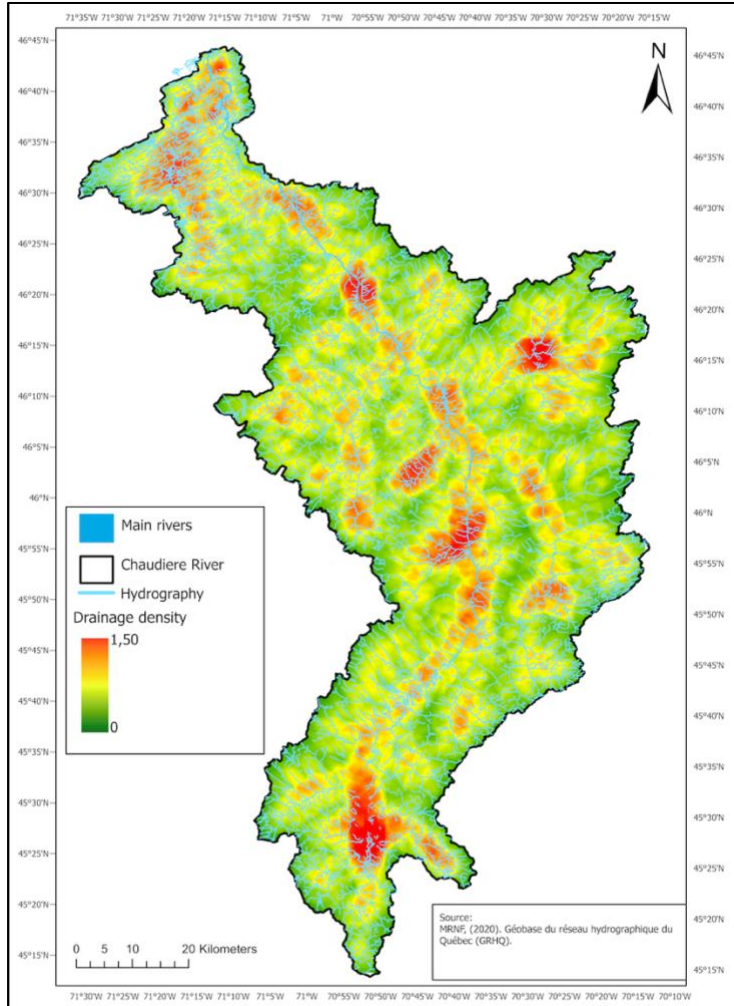
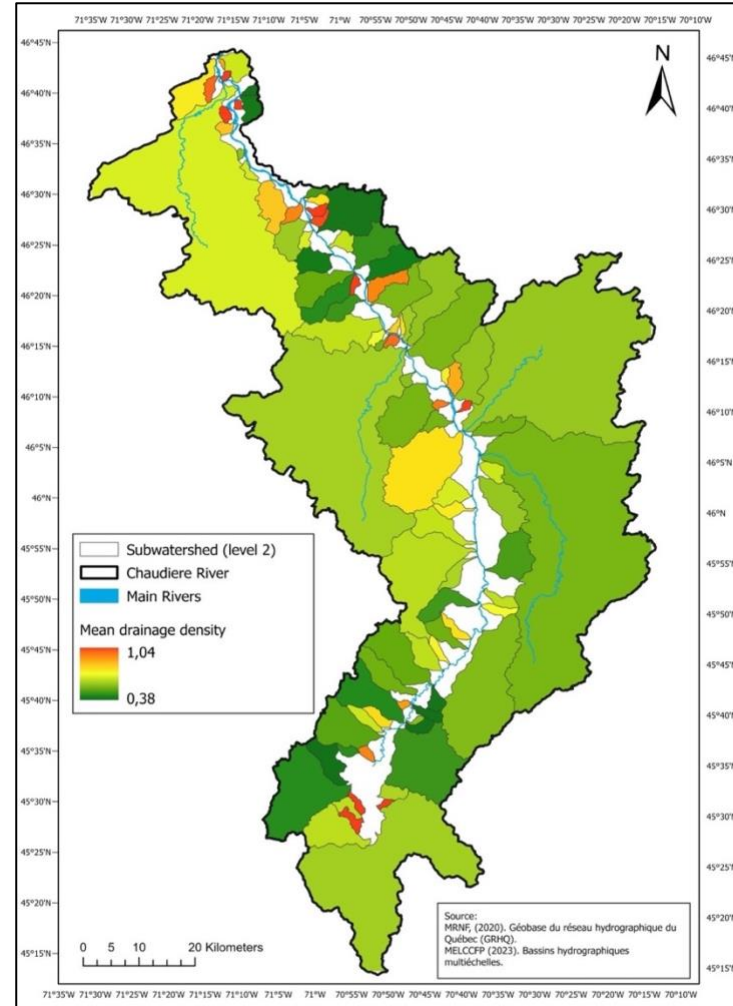


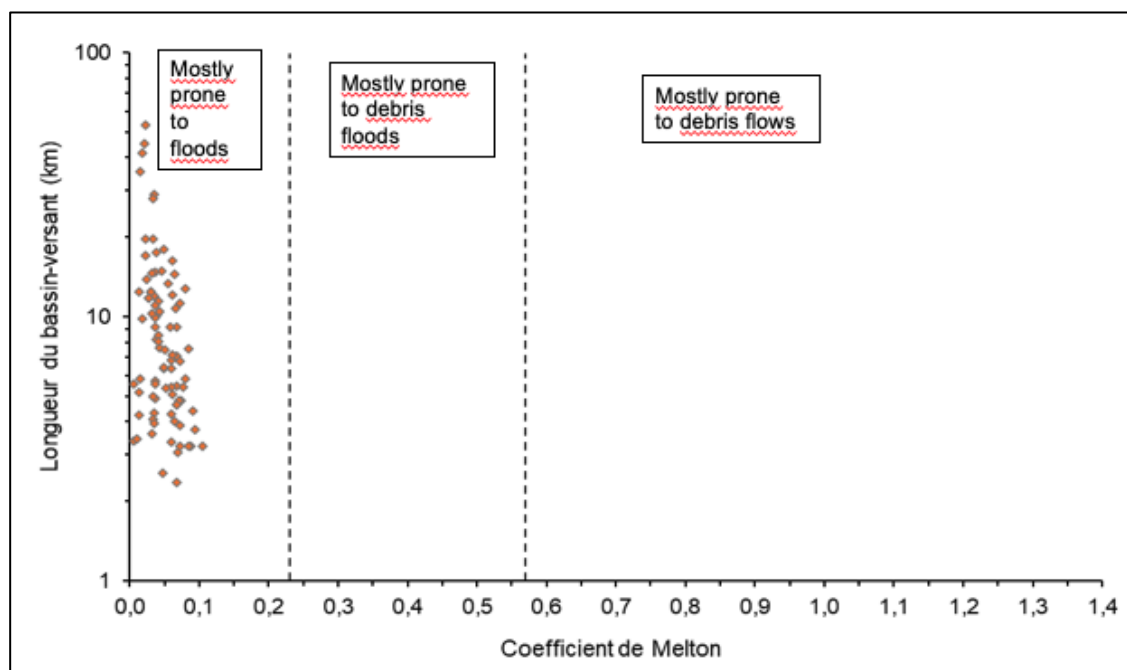
Figure 4.19 Moyenne de la densité de drainage par SBV.



4.3.4 Processus torrentiel

La relation entre le coefficient de Melton et la longueur du cours d'eau permet de discriminer les écoulements torrentiels des écoulements hyperconcentrés et des coulées de débris (Melton, 1945 ; Wilford et al., 2004). Tous les SBV de la rivière Chaudière montre un comportement hydrologique similaire et ce, peut importe la longueur des cours d'eau (Figure 4.21).

Figure 4.21 Processus torrentiels dominants en fonction de la relation entre le coefficient de Melton et la longueur du bassin-versant (km) selon Melton (1957) (Wilford et al., 2004).



4.4 Facteurs de vulnérabilité environnementale

4.4.1 Évolution de l'occupation du sol depuis 2000

L'analyse de l'occupation du sol informe sur les principaux usages du territoire du BVRC et leur variation dans le temps. L'usage prédominant du bassin est représenté par les forêts (*forest*), avec un peu plus de 5000 km² en 2020. Les terres cultivées (*cropland*) constituent le deuxième usage prédominant avec 1000 km². Ces deux

catégories d'utilisation du sol ont connu une très légère baisse depuis 2000, comme il est possible d'observer sur la figure 4.22. À l'inverse, on note une augmentation progressive des zones urbanisées entre 2000 et 2020 avec des valeurs récentes avoisinant les 400 km². En ce qui concerne les autres usages du sol moins importants en termes de superficie –soit les étendues d'eau (*Water*), les prairies (*Grassland*), les milieux humides (*Wetland*) et les autres (*Other land*)– les changements au cours des deux dernières décennies sont difficiles à percevoir ou semblent peu significatifs compte tenu de leurs superficies restreintes.

Figure 4.22 Évolution de l'occupation du sol, à partir des données de couvertures des terres du Canada (2020) entre les années 2000, 2010 et 2020.

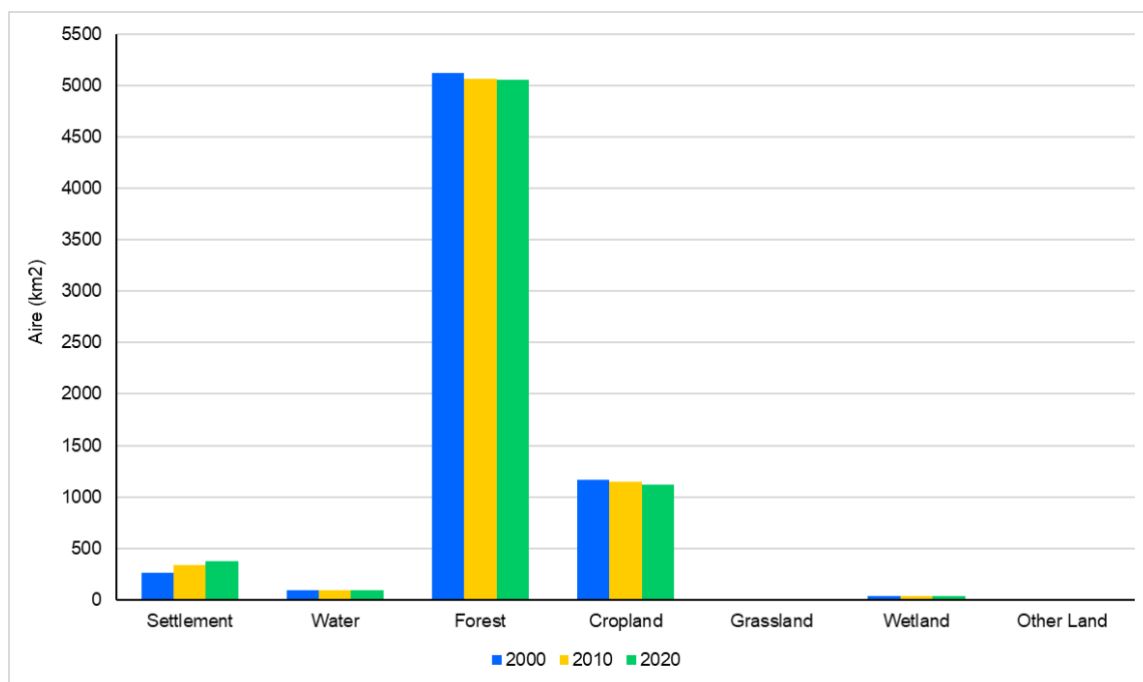
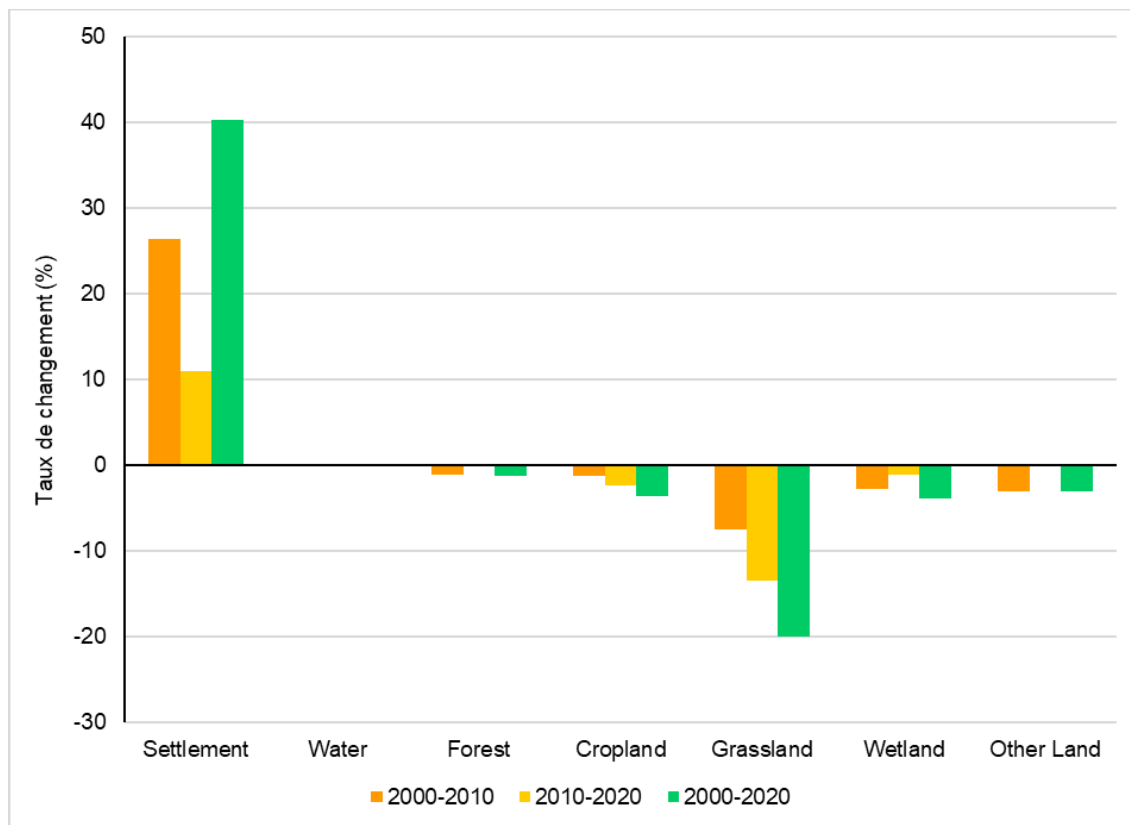
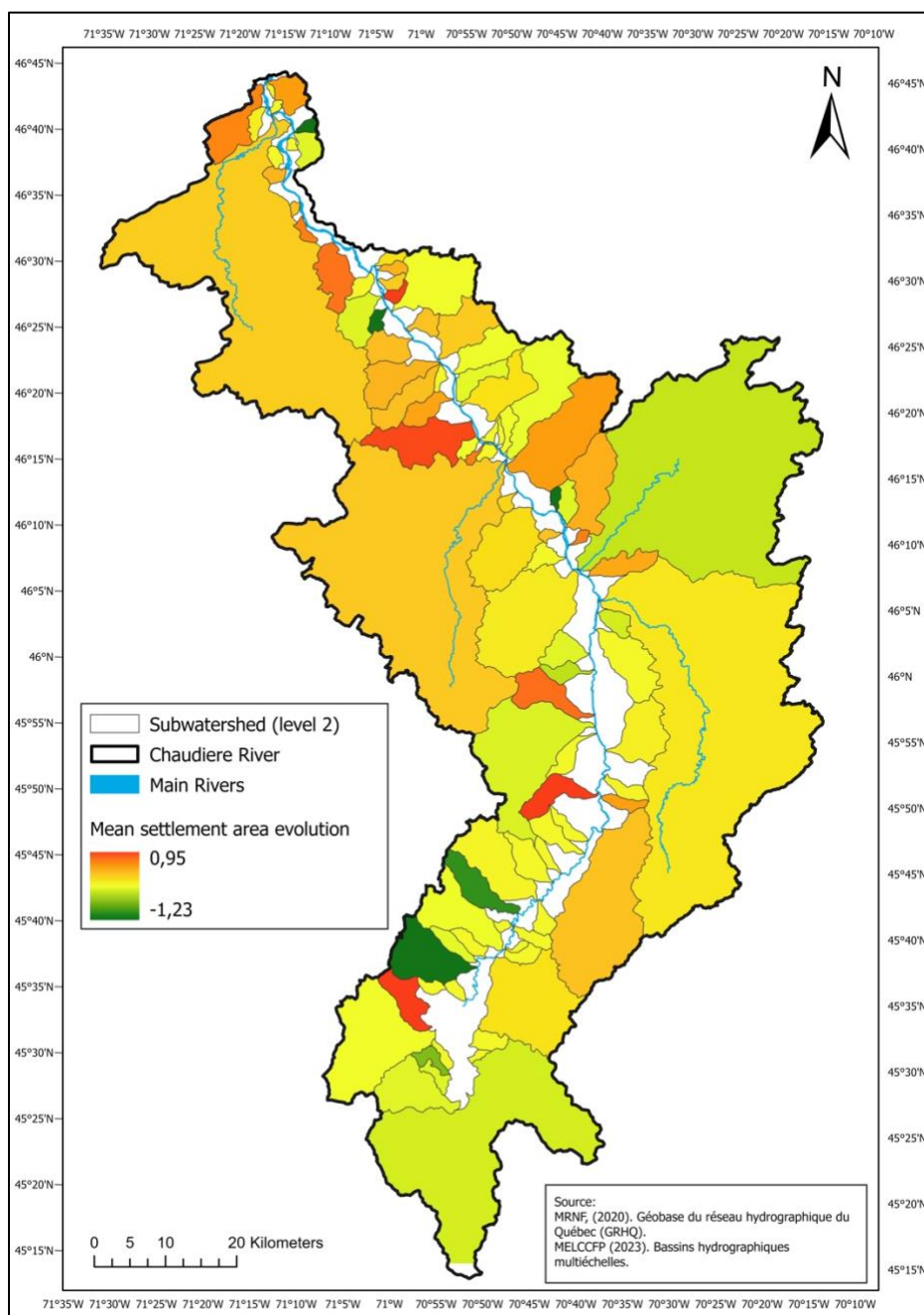


Figure 4.23 Changement de l'occupation du sol entre les années 2000, 2010 et 2020 à partir des données de couvertures des terres du Canada (2020).



La figure 4.23 montre les variations de superficie (%) pour les différentes utilisations du sol au fil des deux dernières décennies. On constate que toutes les catégories d'occupation du sol présentent un taux de changement négatif (perte de superficie), à l'exception des zones urbanisées qui sont en progression. En effet, les zones urbanisées ont connu une croissance de 40 % pour la période de 2000 à 2020. Les prairies (*Grassland*), malgré leur faible superficie, ont connu une diminution significative (-20 %) pour la même période.

Figure 4.24 Moyenne par SBV pour la période de 2000 à 2020 du changement de surfaces urbanisées à partir des données de Couvertures des terres du Canada (2020).



4.4.2 Analyse multicritère des facteurs de vulnérabilité

L'analyse multicritère des facteurs de vulnérabilité environnementale à travers la pondération des indices issue des facteurs aggravants (la pente, l'utilisation du sol et le coefficient de ruissellement en fonction des dépôts de surface), permet de

visualiser les secteurs théoriquement les plus susceptibles aux aléas torrentiels. La spatialisation des indices standardisés pour chacun des facteurs environnementaux aggravants analysés est présentée aux figures 4.23 à 4.25.

Figure 4.25 Représentation par SBV de l'indice standardisé de pente (de 0 à 1).

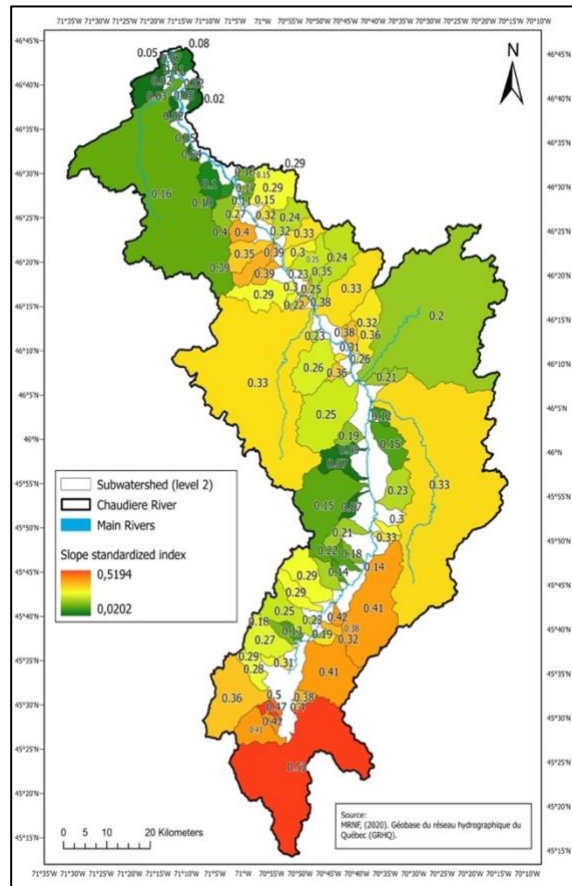


Figure 4.26 Représentation par SBV de l'indice standardisé d'occupation du sol (de 0 à 1).

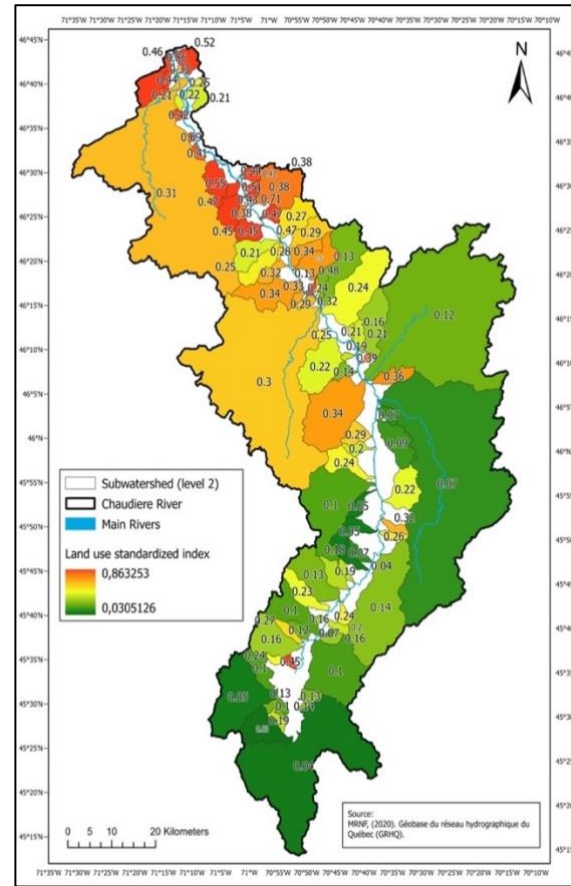
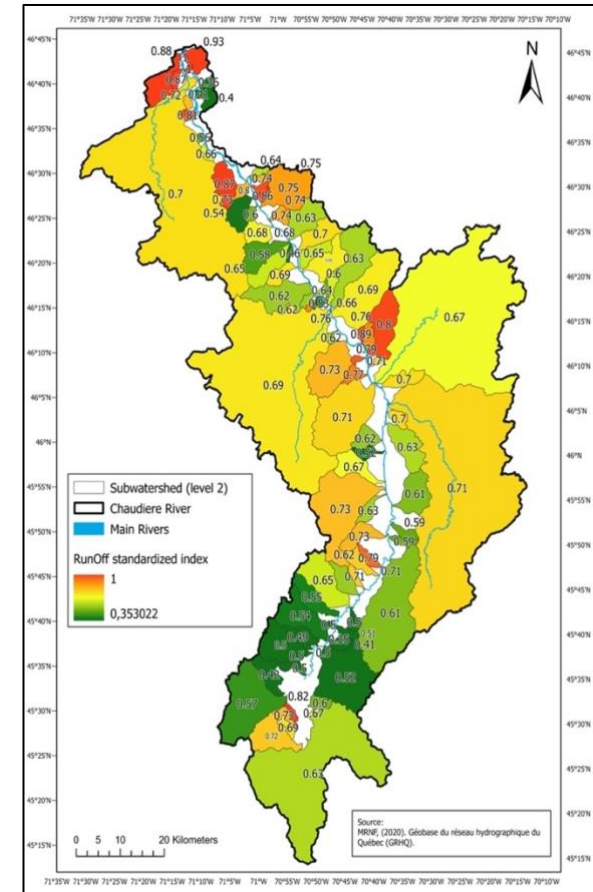


Figure 4.27 Représentation par SBV de l'indice standardisé de ruissellement (de 0 à 1).



L'indice standardisé de pente (Figure 4.25) illustre bien la topographie du BVRC. On retrouve des valeurs fortes en Haute-Chaudière avec le relief appalachien. Les SBV de la Moyenne-Chaudière présentent une plus grande hétérogénéité avec des pentes modérées et élevées. La Basse-Chaudière est caractérisée par des pentes faibles correspondant à la topographie plane des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les valeurs les plus élevées de l'indice d'utilisation du sol ($> 0,8$) sont situées dans la Moyenne et Basse-Chaudière, avec un potentiel de ruissellement accentué dans ces zones. À titre d'exemples, on note les SBV des rivières Savoie, Carter, Saint-Elzéar, Paul-Lessard, Poulin, Vallée, et Îles brûlées de la Basse-Chaudière, et les SBV des rivières Gilbert, Veilleux et Basque dans la Moyenne-Chaudière. Ces SBV sont situés à proximité des villes les plus peuplées de la région, soit Sainte-Marie, Beauceville et St-Georges et donc ont davantage de surfaces imperméabilisées. À l'opposé, la section de la Haute-Chaudière présente les valeurs les plus faibles, puisqu'elle concentre la moins grande densité de population du BVRC où l'occupation est majoritairement forestière.

La forte hétérogénéité des valeurs de ruissellement est liée à la nature des dépôts de surface, plus compacts et moins favorables à l'érosion, lorsqu'humide pour la section de la Haute-Chaudière. Néanmoins on constate que les SBV Gilbert, Morency, Bolduc et Veilleux, en raison de la prédominance d'affleurement rocheux (R) présentent les valeurs les plus élevées dans la Moyenne-Chaudière. Les SBV situés à l'embouchure de la rivière Chaudière présentent également de fortes valeurs du coefficient de ruissellement en lien avec les dépôts argileux et leur nature peu perméable

Figure 4.28 Résultats de l'analyse multicritère à une résolution de 30 m pour le BVRC (de 0 à 1)

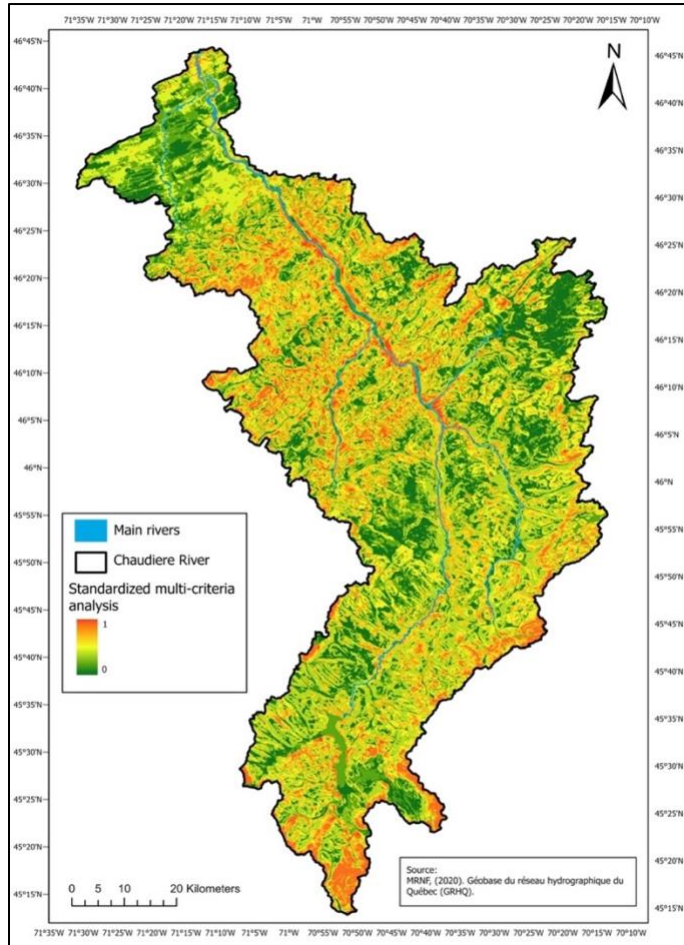
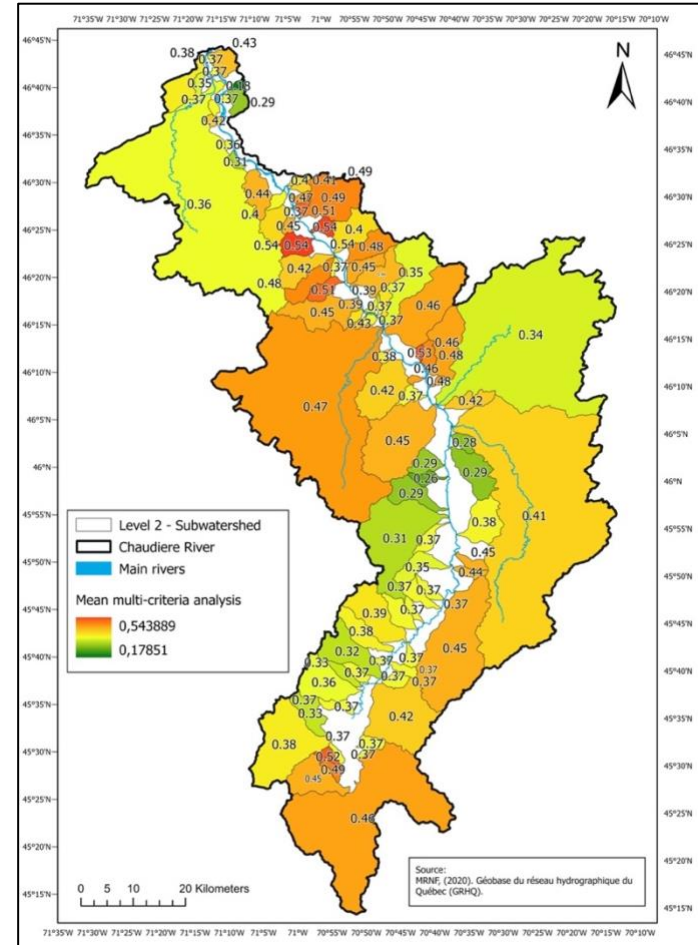


Figure 4.29 Moyenne de l'analyse multicritère par SBV



Les résultats (pondération de 0 à 1) de l'analyse multicritère à une résolution de 30 mètres sont présentés à la figure 4.28. On remarque que les plus fortes valeurs se concentrent dans la Moyenne-Chaudière ainsi qu'aux abords des tributaires. De façon générale, les plus faibles valeurs se retrouvent en Basse-Chaudière malgré la forte anthropisation de cette région. Malgré la présence de forte pente en Haute-Chaudière, l'usage principalement forestier peut expliquer la présence d'îlot à très faible valeur résultante de l'AMC.

L'indice moyen par SBV, cartographié et représenté à la figure 4.29 illustre le cumul des indices pondérés en fonction du poids associé. Selon les résultats de l'AMC, le bassin de la rivière Savoie (0,54) et celui du ruisseau Carter (0,54) présentent la plus forte susceptibilité aux crues torrentielles. De plus, il est possible d'observer que de nombreux SBV de la Moyenne-Chaudière présente des valeurs supérieures à 0,40 correspondant à des SBV susceptibles à l'aléa torrentiel. On note aussi que dans la Haute-Chaudière, la rive ouest de la rivière présente des valeurs plus élevées que la rive est, principalement lié à l'influence du facteur de pente. À l'inverse, les SBV de la Basse-Chaudière présentent surtout des valeurs inférieures à 0,40 bien que certains SBV ont des valeurs plus élevées liées à leur fort potentiel de ruissellement.

CHAPITRE V

DISCUSSION

5.1 Portrait de l'aléa torrentiel

Le BVRC est reconnu pour ses épisodes récurrents d'inondations, comme en témoignent les nombreux événements historiques recensés depuis plus d'un siècle dans les différentes bases de données. Les études réalisées jusqu'à présent (e.g., Biron et al., 2020 ; Boyer-Villemare et al., 2021 ; COBARIC, 2014 ; Grenier, 2005 ; Hamelin, 1958) attribuent cette situation à la configuration physiographique de la région. La topographie accidentée de la Haute-Chaudière et la pente forte de ses affluents favorisent une évacuation rapide des eaux vers la section de la Moyenne-Chaudière. Dans cette dernière section, le chenal de la rivière Chaudière est particulièrement plat, communément désigné comme la « zone des eaux mortes », ce qui entraîne une augmentation rapide du niveau d'eau et la formation d'embâcles de glace à l'hiver (Biron et al., 2020 ; COBARIC, 2014). De cette configuration hydrologique propice aux inondations et embâcles, on note également une planification territoriale désuète, où les rives ont hérité d'une planification centrée autour des besoins de la drague et de l'industrie forestière de l'époque, ce qui contribue à exacerber le risque d'inondation (Gagnon et al., 1970 ; Hamelin, 1958, Quilbé et al., 2008). En effet, les plus grandes villes de la région, comme Saint-Georges et Beauceville, sont situées aux abords de la

rivière Chaudière ou près d'une confluence importante. De plus, le déboisement intensif au profit de l'expansion de l'agriculture et de l'urbanisation au fil des ans a vraisemblablement contribué à accentuer le ruissellement de surface, et ce, particulièrement lors de précipitations intenses (Gagnon et al., 1970 ; Quilbé et al., 2008).

Dans ce contexte, les évènements à caractère torrentiel émergent comme une composante critique, et intrinsèquement liée au changement climatique et l'accroissement de l'occurrence des événements météorologiques extrêmes. Bien que ces évènements ne soient pas nouveaux dans le BVRC, l'attention qui leur est accordée par les autorités et les médias ainsi que la multiplication des événements météorologiques extrêmes ces dernières années témoignent de la nécessité d'approfondir notre compréhension à leur égard. La modélisation des impacts du changement climatique sur les régimes hydrologiques demeure variable d'une région à l'autre, mais difficilement quantifiable avec précision à l'échelle locale où se manifeste l'aléa torrentiel (Giorgi et al., 2011 ; Keiler et al., 2010 ; Leconte, 2020 ; Planton et al., 2005 ; Saint-Laurent et Hähni, 2008). L'accroissement des événements météorologiques extrêmes demeure pourtant un facteur déterminant sur l'évolution des écosystèmes fluviaux (Giorgi et al., 2011 ; Leconte, 2020), d'où l'impératif de mieux prévoir et anticiper leur trajectoire d'évolution future.

Bien que les données utilisées soient issues de sources variées (bases de données, revue de presse, etc.), l'inventaire réalisé des événements à caractère torrentiel n'est certainement pas exhaustif en raison de l'occurrence localisée, dans le temps et l'espace, de certains événements torrentiels. La complexité des facteurs environnementaux impliqués dans l'occurrence d'un événement torrentiel contribue aussi à une certaine incertitude quant aux conclusions que l'on peut tirer (Borga et al., 2014 ; Marchi et al., 2009 ; Leconte, 2019 ; Patton et al., 2018 ; Piton et al., 2018). Néanmoins, certains constats peuvent être émis à partir des données historiques sur les événements torrentiels recensés dans le BVRC depuis 1900. En effet, l'analyse des caractéristiques géomorphologiques et des facteurs environnementaux aggravants pour

la dynamique torrentielle renseigne sur les conditions qui contribuent à exacerber le risque torrentiel dans le BVRC.

5.1.1 Dynamique temporelle de l'aléa torrentiel

La recension de 53 évènements historiques à caractère torrentiel montre l'omniprésence de la dynamique torrentielle dans le BVRC. L'occurrence de ces évènements, pour la période de 1900 à aujourd'hui, révèle une variabilité importante et l'absence d'une périodicité. En effet, la répartition des évènements dans le temps illustre notamment la présence de longues périodes caractérisées par une faible activité torrentielle. À l'opposé, on note une forte concentration d'évènements torrentiels au 21^e siècle. Cela suscite diverses considérations pour tenter d'expliquer ce constat.

Tout d'abord, il convient de rappeler que les évènements à caractère torrentiel, de par leur nature, sont souvent très localisés dans le temps et l'espace puisque pour la plupart du temps issu des précipitations liées à des systèmes convectifs d'instabilité atmosphérique (Gagnon et al., 1970). Cette caractéristique intrinsèque soulève la possibilité que certains évènements aient pu échapper aux enregistrements historiques d'un point de vue hydrologique et météorologique. En raison de leur étendue spatiale limitée, certains évènements pourraient par exemple, avoir causé des inondations mineures de manière très localisée ou encore généré des dommages pas suffisamment significatifs pour figurer dans les registres officiels. Des recherches supplémentaires lors des périodes d'accalmie torrentielle pourraient peut-être révéler des évènements historiques passés inaperçus jusqu'à présent.

À l'inverse, l'occurrence rapprochée de certains évènements rend parfois difficile leur recension. Ce fut le cas en juin et juillet 1917, où à un mois d'intervalle ont eu lieu deux évènements torrentiels parmi les plus importants en termes d'intensité et dommages jusqu'à ce jour sur le territoire beauceron. Le géographe Louis-Edmond Hamelin, dans son article concernant les crues de la rivière Chaudière en 1958, classe la crue du 30 juillet 1917 comme étant d'origine météorologique liée à des précipitations abondantes sur un sol déjà saturé, situation inhabituelle pour la période

estivale. Il note ensuite que ce type de crue est le plus difficile à prévoir en raison de l'équilibre hydrologique fragile du BVRC et de l'imprévisibilité des aléas climatiques (Hamelin, 1958).

Les évènements torrentiels sont majoritairement liés à l'occurrence et la manifestation de phénomènes météorologiques extrêmes, tels que des tempêtes post-tropicales ou des ouragans, caractérisés par une faible fréquence, mais une forte intensité. Parmi les 53 évènements recensés, 28 correspondent au seuil de pluie torrentielle établi par l'INSPQ (2014), soit des précipitations de plus de 50 millimètres en 24 heures. Comme mentionné dans la section 3.1.1, les événements sous ce seuil n'ont pas été rejetés dû aux nombreux facteurs qui influencent l'occurrence et l'intensité d'une crue, ainsi que l'incertitude associée aux mesures des stations météorologiques présentes sur le territoire.

Les mois de juillet et août sont les plus propices aux évènements à caractère torrentiel dans le BVRC, ce qui correspond aussi à la saison des ouragans dans l'Atlantique Nord. Selon les travaux de Gagnon et al. (1970) sur les conditions météorologiques critiques des crues exceptionnelles des rivières Chaudière et Saint-François, cela s'explique aussi par le fait que les mois de juillet et août sont généralement ceux qui reçoivent les plus grandes quantités de précipitations. Celles-ci sont souvent le résultat d'orages et d'averses localisés et concentrés le long des fronts météorologiques instables, correspondant aux périodes avec les plus hautes températures.

À partir des années 1970, on observe une augmentation graduelle des épisodes torrentiels dans le BVRC avec une intensification notable depuis le début des années 2000. Cette tendance est cohérente avec les prédictions d'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes liés au changement climatique (Beniston et Stephenson, 2004 ; GIEC, 2012 ; Leconte 2020 ; Planton et al., 2005). Ce constat corrobore également les conclusions de Tucker (2000) dans son étude sur les inondations au Canada. Sur une période de près d'un siècle, il avance que cette tendance à l'augmentation des évènements d'inondations est liée à une variété de facteurs : « [...] *the occurrence of more extreme events, an increase in disasters*

proportional to the increase of population, better reporting of events in more recent years and/or increased concentration of population in vulnerable areas » (Tucker, 2000, p.78). Dès lors, il devient difficile d'attribuer cette augmentation des événements torrentiels dans le BVRC aux seules conditions météorologiques.

5.1.2 Dynamique spatiale de l'aléa torrentiel

La recension historique des événements torrentiels dans le BVRC a montré que les municipalités les plus fréquemment touchées sont Sainte-Marie, Beauceville, Saint-Georges et Vallée-Jonction, toutes situées le long de la rivière Chaudière. Ce constat s'explique par différents facteurs. Bien que les crues torrentielles soient généralement associées aux petits cours d'eau, la physiographie régionale du BVRC avec de fortes pentes favorise un écoulement rapide des affluents vers la rivière Chaudière. Cette dernière, en raison de sa pente faible dans la section de la Moyenne-Chaudière aussi appelée zone des eaux mortes, connaît alors une montée rapide des eaux. Par ailleurs, la densité élevée de tributaires dans cette section (e.g., les rivières des Fermes et Sainte-Marie) et la présence de cônes alluviaux à l'embouchure de certains tributaires témoignent de la dynamique géomorphologique de ces cours d'eau. La faible pente de la rivière Chaudière et la présence de tributaires contribuent donc à aggraver les risques associés aux événements torrentiels pour les municipalités concernées. L'urbanisation croissante de ces municipalités et la concentration démographique liée aux villes accentuent l'exposition des biens et des personnes aux inondations. Ces constats sont à considérer dans l'analyse des impacts des inondations, car avec des dommages potentiels plus élevés, il est plus probable que ces événements figurent dans les registres historiques.

À partir des années 1970, on assiste à une diversification des municipalités affectées par la torrencialité par comparaison au début du 20^e siècle, où les dommages étaient concentrés (quasi) exclusivement aux municipalités riveraines de la rivière Chaudière, comme mentionnée précédemment. Cela s'explique, en partie du moins, par les dynamiques d'aménagement à l'époque. Premièrement, on observe un accroissement

rapide des terres agricoles au détriment des forêts en raison de l'orientation économique privilégiée (Grenier, 2005 ; Quilbé et al., 2008). Deuxièmement, l'accroissement démographique lié à l'industrialisation de la région au 20^e siècle accentue l'établissement de nombreuses personnes à proximité des centres urbains tels Saint-Georges et Sainte-Marie. Ceux-ci ont connu à cette époque une effervescence économique importante (Billette et Carrier, 1995) qui, avec l'étalement urbain, ont provoqué l'apparition de nouvelles zones à risque en plus de contribuer à l'expansion des surfaces imperméables et favorables à un ruissellement accentué.

5.2 Facteurs de vulnérabilité à l'aléa torrentiel dans le bassin-versant de la rivière Chaudière

Maintenant qu'il est établi que le BVRC se caractérise par une dynamique torrentielle variable dans le temps et dans l'espace, différents constats sont présentés par rapport aux facteurs de vulnérabilité identifiés à partir du croisement des résultats issus des approches qualitative et quantitative. Les facteurs météorologiques, anthropiques et géomorphologiques qui contribuent à la vulnérabilité du BVRC aux aléas torrentiels sont discutés dans les sections ci-après.

5.2.1 Facteurs météorologiques

La recension des événements historiques de nature torrentielle a néanmoins permis certains constats qu'il convient de souligner. Ces événements sont généralement liés à des épisodes de pluies intenses, soit en lien avec des phénomènes convectifs ou encore le passage de tempêtes tropicales issues d'ouragans dans l'océan Atlantique. À titre d'exemples, les tempêtes tropicales Doria (août 1971), Belle (août 1976) et Irène (août 2011) ont d'ailleurs généré les débits maximums enregistrés pour la période étudiée. Ces événements ont d'ailleurs causé de forts dommages sur le territoire. Bien qu'il soit difficile d'établir des prévisions pour ce type d'évènement, les projections climatiques du GIEC (2023) anticipent néanmoins une augmentation des situations extrêmes dans le futur. Enfin, la forte corrélation entre la quantité de précipitations reçues et les débits

maximums enregistrés, viennent corroborer le fait que l'occurrence des aléas torrentiels dans le BVRC est d'abord et avant tout liée au passage de phénomènes météorologiques extrêmes.

5.2.2 Changements dans l'occupation du sol

La fin du 20^e siècle correspond à un changement progressif dans l'occupation du sol, correspondant à des conditions plus favorables aux crues torrentielles dans le BVRC. Bien que les crues de nature anthropique présentes dans notre recension historique soient liées aux pratiques de dragage présentes sur le territoire au début du 20^e siècle, certaines pratiques d'occupation du sol actuelle sont également un facteur aggravant. En effet, il est aujourd'hui reconnu et documenté que l'anthropisation du territoire a le potentiel d'exacerber l'aléa torrentiel en modifiant le fonctionnement hydrologique des bassins-versants (Lyons et Beschta, 1987 ; Muller et al., 2002 ; Whol, 2006 ; Demers et al., 2017 ; Saint-Laurent et Hähni, 2008). En ce sens, la diminution des forêts, des prairies et des milieux humides couplée à une augmentation des surfaces imperméables (urbaines) observées dans le BVRC pour la période 2000-2020 représente des conditions favorables aux crues torrentielles.

Quilbé et al. (2008), dans ses recherches sur les dynamiques territoriales pour la période de 1970 à 2003 dans le BVRC, notait une diminution des forêts au profit des terres cultivées. Ces auteurs ont démontré que les forêts, avec leur couverture végétale dense, diminuent le ruissellement dans le BVRC en interceptant les pluies par comparaison aux terres agricoles. Dans le cadre de cette recherche et pour la période analysée (2000-2020), on note une légère diminution des terres cultivées au profit des surfaces urbanisées. L'expansion des superficies urbaines et agricoles aux dépens des milieux humides réduit aussi la capacité d'atténuation des crues et augmente le risque d'exposition à celles-ci (GIEC, 2012 ; Demers et al., 2017).

La pression anthropique sur les milieux riverains se traduit également par le déboisement des rives, la présence de débris dans les fossés et l'artificialisation des berges (Demers et al., 2017 ; Saint-Laurent et Hähni, 2008). L'étude de Demers et al.

(2017) sur les aléas fluviaux de la rivière Coaticook souligne que « la présence de fossé de drainage sur des sols à forte pente a pu amplifier la réponse hydrologique et sédimentaire des sous-bassins [...] ». Ainsi, il convient de rappeler que les petits cours d'eau sont particulièrement sensibles aux aménagements, tant sur le plan hydrologique que sédimentaire.

5.2.3 Facteurs géomorphologiques

La réaction d'un bassin-versant à un évènement météorologique dépend de nombreux facteurs et repose sur des caractéristiques tant pérennes que variables (Newson, 1978 ; Quéfféléan, 2015). Newson (1978) soulignait que les trois variables morphométriques les plus déterminantes sur l'occurrence des crues torrentielles étaient l'aire drainée, la pente et l'organisation du réseau de drainage (mesure comparable à la densité de drainage). Le tableau 5.1 présente les caractéristiques morphométriques des SBV avec plus de trois évènements recensés, alors que les résultats pour tous les SBV sont présentés à l'Annexe B.

Tableau 5.1 Caractéristiques morphométriques des sous bassin-versants avec 3 évènements et plus recensés.

Nom bassin	Nb event	Superficie (km ²)	Cône	Pente moy. (%)	Pente moy des cours d'eau (%)	Melton	Gravelius	Densité de drainage
Saint-Victor, Bras	27	733,074	0	1,848	2,763	0,018	1,894	1,205
Fermes, Rivière des	12	64,642	1	3,325	3,040	0,061	1,692	1,427
Beaurivage, Rivière	10	718,885	0	1,444	1,466	0,021	2,011	2,104
Famine, Rivière	8	712,575	0	1,262	1,899	0,015	1,857	0,974
Morency, Rivière	8	34,056	0	3,397	3,731	0,073	1,461	1,361
Nadeau, Rivière	6	39,638	1	7,689	3,519	0,066	1,481	1,206
Belair, Rivière	4	44,466	1	2,659	2,672	0,040	1,463	1,184
Savoie, Rivière	4	22,930	1	5,830	4,361	0,061	1,341	1,365
Ardoise, Ruisseau d'	3	22,710	0	2,652	1,809	0,043	1,563	1,024
Cantin, Ruisseau	3	19,929	0	1,429	1,211	0,015	1,349	1,768
Chassé, Rivière	3	77,342	1	2,746	2,799	0,028	1,452	1,372

L'aire drainée des SBV avec le plus d'évènements torrentiels enregistrés est variable. En effet, on constate que le Bras Saint-Victor enregistre le plus grand nombre d'évènements, mais possède aussi la plus grande superficie. Ce constat peut s'expliquer par l'échelle de caractérisation utilisée pour les SBV, soit celle de niveau 2 alors que ce bassin-versant renferme plusieurs SBV de niveau 3. Ainsi, avec sa plus grande superficie, ce SBV se caractérise par plus d'évènements, mais cela ne veut pas nécessairement dire qu'il est très vulnérable aux aléas torrentiels. Le constat est le même pour les SBV Beaurivage et Famine, qui couvrent de grandes superficies et qui ne présentent pas les caractéristiques typiques des SBV réactifs aux aléas torrentiels (forte pente, petite superficie). Au regard du tableau 5.1, on constate que sept sur 11 des SBV avec plus de 3 évènements enregistrés sont d'une taille inférieure à 100 km², ce qui corrobore le fait que les petits bassins-versants sont susceptibles de réagir fortement aux épisodes de pluie intense.

La topographie et la pente jouent un rôle déterminant, certes, dans la dynamique hydrologique et sédimentaire. La présence de pentes raides dans certains SBV de la Haute- et Moyenne-Chaudière est intrinsèquement liée au contexte appalachien, ce qui favorise une évacuation rapide des précipitations et des eaux de ruissellement, laquelle exacerbe le potentiel d'aléas torrentiels. Les deux SBV avec les pentes les plus raides sont les bassins 02340246 (11%) et 0234A024 (9,9%), tous deux situés en Haute-Chaudière. Cependant, aucun évènement pour ces SBV ne figure dans les archives. L'explication pourrait être liée à leur positionnement géographique, situé en Haute-Chaudière, avec une plus faible densité de la population. Cette absence pourrait donc résulter d'une exposition plus faible des biens et des personnes. Les SBV des rivières Lessard (8,83%) et Nadeau (7,67%) se situent respectivement au 3^e et 5^e rang des pentes les plus raides, alors que la rivière Nadeau enregistre 6 évènements et aucun pour la rivière Lessard et ce, malgré une frontière commune. S'agit-il d'une erreur de recension ou de localisation? Peut-être mais les données actuelles n'apportent pas de réponse à cet égard.

Les pentes fortes, combinées à une densité de drainage élevée (> 1) avec la présence de nombreux tributaires importants favorisent une montée rapide du niveau de la rivière Chaudière, notamment dans la « zone des eaux mortes » (Moyenne-Chaudière) où sont situées les municipalités de Sainte-Marie, Saint-Georges et Beauceville, caractérisées par le plus grand nombre d'évènements historiques de nature torrentielle.

Par ailleurs, la configuration morphométrique des SBV, caractérisée par une variation notable des pentes moyennes et de la déclivité des cours d'eau, suggère une réponse hétérogène aux évènements de pluies torrentielles. Malgré la présence de cours d'eau avec de fortes pentes à certains endroits, on constate, à partir de la relation entre le coefficient de Melton et la longueur du cours d'eau, une capacité limitée de ceux-ci à accumuler et concentrer les sédiments et l'eau nécessaire pour provoquer des processus plus extrêmes, tels que des écoulements concentrés et des coulées de débris. Ce constat s'aligne avec l'absence de ces types d'évènements dans la recension historique.

On constate également que la plupart des SBV sont de natures plus compactes, puisqu'ils présentent une valeur moindre du coefficient de Gravelius. La rivière Beurivage détient la valeur maximum de 2,01, ce qui est en accord avec sa superficie plus grande. Ainsi, les SBV avec plus de 3 évènements sont de nature compacte ce qui favorise la concentration du ruissellement lors d'une pluie intense (Alam et al., 2021 ; Bhatt et Ahmmed, 2002 ; Horton, 1945).

La présence de cônes alluviaux à l'embouchure de 25 tributaires dans la section de la Moyenne-Chaudière témoigne d'une activité géomorphologique importante. De plus, on constate que 50 % (5/10) des SBV avec le plus d'évènements enregistrés disposent d'un cône alluvial à leur embouchure. Ainsi, il est possible d'affirmer que la dynamique torrentielle du BVRC n'est pas uniquement confinée aux tributaires caractérisés par la présence d'un cône alluvial. Plusieurs questions demeurent toutefois quant aux processus responsables de leur mise en place. Juneau (2020) pose l'hypothèse que la mise en place des cônes serait redevable, pour l'essentiel, à des évènements d'une faible fréquence, mais d'une forte intensité, comme ceux recensés dans le cadre de cette recherche. Certains évènements recensés, comme celui du 13 août 1990, font état de

l'abondance de débris suite au passage de la crue. Ce genre d'évènement de forte intensité combiné à la présence de nombreux débris pourrait être responsable de l'accumulation sédimentaire notable à l'embouchure de plusieurs tributaires.

Contrairement à d'autres régions, les cônes alluviaux dans le BVRC ne se trouvent pas à l'interface du risque torrentiel, comme souligné par Garitte (2006) et Buffin-Bélangier dans Locat et al. (2008), mais plutôt directement dans le lit de la rivière Chaudière en raison de la configuration topographique de la vallée. Par conséquent, ces cônes ne sont pas habités et n'augmentent donc pas la vulnérabilité aux aléas torrentiels pour la population. En revanche, il est possible qu'ils puissent ralentir l'évacuation des eaux issues des tributaires, entraver la libre circulation de la rivière Chaudière et contribuer à l'élévation de son niveau d'eau (Juneau, 2020).

5.3 Pertinence de l'analyse environnementale multicritère pour cibler les zones vulnérables

L'analyse multicritère des facteurs environnementaux qui accentuent le ruissellement a permis de déterminer, de façon théorique, les SBV les plus réactifs aux évènements de fortes précipitations. À partir de la recension historique, il est alors possible de faire un exercice de validation quant à la localisation des endroits vulnérables à l'aléa torrentiel (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 Comparaison des résultats obtenus à partir de l'analyse multicritère pour les SBV avec plus de trois évènements torrentiels recensés.

Bassin-versant	Évènements (nb)	Moyenne AMC¹
Bras Saint-Victor	27	0,47
Des Fermes	12	0,44
Morency	8	0,48
Famine	8	0,34
Nadeau	6	0,42

Savoie	4	0,54
Bélaïr	4	0,40
Chassé	3	0,49
Ardoise	3	0,42
Cantin	3	0,43

¹ Résultat standardisé de l'analyse multicritère (sur 1)

Les valeurs calculées pour l'indice de vulnérabilité montrent en ordre décroissant les SBV suivants: Savoie (0,543), Carter (0,539), Veilleux (0,533), Lionel (0,52), Cliche (0,514), Paul-Lessard (0,513), Quirion (0,491), Chassé (0,489), Lessard (0,484) et Bolduc (0,482). Parmi ceux-ci, 6 ont plus d'un évènement historique recensé. Le SBV de la rivière Savoie (0,54) est celui avec l'indice de vulnérabilité environnementale le plus élevé et pour lequel on note quatre évènements historiques. Les SBV avec plus de trois évènements torrentiels ont pour la majorité, mis à part celui de la rivière Famine, des indices supérieurs à 0,40. Ainsi, l'analyse spatiale des facteurs contribuant au ruissellement peut contribuer à cibler, de façon sommaire, les endroits propices aux crues torrentielles. Cela atteste qu'une configuration propice au ruissellement peut être un facteur aggravant lors de fortes précipitations pour les aléas torrentiels.

Cette méthode peut être pertinente lorsque l'on travaille à l'échelle d'un bassin-versant afin d'avoir une vue d'ensemble de type « pinceau large » des secteurs vulnérables aux aléas hydrométéorologiques. Néanmoins, elle implique son lot d'incertitude lié à la présence de plusieurs biais méthodologiques. D'abord, les données et la résolution utilisées peuvent comporter des incertitudes, entre autres par rapport à la variabilité spatiale des données utilisées ou encore l'actualisation de celles-ci. Il aurait été pertinent de faire des analyses de sensibilité afin de mesurer l'incertitude associée aux données utilisées. Ensuite, la pondération utilisée des critères, bien que basée sur la littérature scientifique, demeure sujette à discussion et interprétation. L'échelle des SBV de niveau 2 utilisée pour faire la moyenne de l'AMC, initialement calculée à une résolution de 30 m² exclut toutes les portions de rives de la rivière Chaudière qui sont plus vulnérables au débordement causé par la montée des eaux et les SBV qui sont d'une plus grande taille favorisent une dilution de la valeur moyenne de l'AMC par

comparaison aux SBV d'une plus petite taille. Ainsi, la représentation des endroits susceptibles à l'aléa torrentiel peut être légèrement altérée par rapport à la réalité.

5.4 Limites et perspectives futures

Bien que cette étude ait permis de dresser un premier portrait de l'aléa torrentiel dans le bassin-versant de la rivière Chaudière (BVRC), certaines limites méthodologiques méritent d'être soulignées. L'approche historique comporte des incertitudes liées à la couverture incomplète des événements torrentiels. En premier lieu, la méthodologie utilisée, soit la recension historique, repose sur une définition large des phénomènes torrentiels puisque les définitions des aléas torrentiels varient d'une région à l'autre et au sein de la littérature scientifique. Par exemple, certains auteurs privilégient une validation sur le terrain à l'aide de techniques comme la dendrochronologie ou la datation des dépôts alluviaux (Rodriguez-Morata et al., 2016). Ces validations permettent de corroborer les archives historiques et d'enrichir les bases de données avec des données empiriques robustes. Cependant, comme mentionnée, la nature ponctuelle dans le temps et l'espace des crues torrentielles complique leur enregistrement systématique. Ainsi, il est probable que la série d'évènements établie dans le présent mémoire présente des lacunes et que certains SBV soient surestimés ou encore sous-estimés quant à leur dynamique torrentielle.

Pour l'analyse des conditions hydrométéorologiques associées, l'utilisation d'une seule station météorologique introduit des biais dans la représentativité des données à l'échelle du bassin-versant, encore plus dans le contexte d'un évènement très localisé. Une analyse reposant sur des données journalières de précipitations, plutôt que mensuelles, aurait pu améliorer la précision des corrélations entre les conditions météorologiques et les événements torrentiels. L'intégration de réseaux de stations multiples, couplée à des méthodes d'interpolation, aurait également permis une meilleure estimation spatiale des conditions hydrométéorologiques.

L'utilisation des données géospatiales, bien qu'efficace pour extraire des caractéristiques topographiques telles que la pente, la densité de drainage et la superficie des sous-bassins, présente des incertitudes inhérentes à la résolution et la qualité des données utilisées. Des variations locales comme les microreliefs et les singularités géomorphologiques peuvent ne pas être correctement considérées, ce qui limite l'exactitude des analyses. Des méthodes avancées, comme l'utilisation de modèles numériques de terrain corrigés par des relevés terrain et des données Lidar à haute résolution, pourraient enrichir l'analyse en capturant ces nuances locales.

Par ailleurs, l'approche multicritère, bien qu'elle offre une vision intégrée de l'aléa, repose en partie sur des pondérations subjectives des indices sélectionnés (pente, densité de drainage, présence de cônes alluviaux, etc.). Ces pondérations, influencées par l'expérience et l'expertise des analystes, peuvent introduire des biais non négligeables dans les résultats. L'application de méthodes comparatives, telles que l'analyse hiérarchique multicritère (AHP) ou les modèles basés sur les réseaux neuronaux, pourrait contribuer à réduire ces biais et à accroître la robustesse des résultats. Ces approches permettent d'évaluer différentes pondérations de manière plus systématique et de tester la sensibilité des résultats en fonction des variables intégrées. Une analyse approfondie aurait bénéficié de l'intégration de tests statistiques permettant de mieux comprendre les interactions entre les variables hydrométéorologiques et géomorphologiques. Par exemple, des tests de corrélation statistiques, tels que les coefficients de Pearson ou de Spearman, auraient pu être menés afin d'évaluer les relations entre la quantité de précipitations et les caractéristiques géomorphologiques des sous-bassins-versants, comme la pente et la densité de drainage. Ces analyses auraient permis de quantifier la contribution relative de ces facteurs aux crues torrentielles et d'identifier des relations potentielles non linéaires, souvent présentes dans les systèmes naturels.

De plus, l'influence des facteurs anthropiques, tels que l'occupation du sol et le degré d'urbanisation, pourrait faire l'objet d'une exploration plus approfondie. Par exemple, des analyses de régressions multiples ou une analyse de variance (ANOVA) auraient

pu être employées pour modéliser l'impact combiné de plusieurs variables, comme l'imperméabilisation des sols et les changements d'usage des terres, sur la fréquence et l'intensité des crues torrentielles. Ces méthodes permettraient de distinguer les contributions relatives des facteurs naturels et anthropiques tout en offrant des perspectives pour la gestion des risques et l'aménagement du territoire. Une telle démarche aurait enrichi la compréhension des mécanismes à l'origine des crues et renforcé la valeur prédictive des modèles utilisés dans cette étude.

Enfin, une campagne de terrain exhaustive, combinant des relevés géomorphologiques détaillés, des mesures hydrologiques *in situ* et des analyses sédimentologiques, constituerait un complément essentiel pour valider et affiner les résultats issus de l'analyse multicritère. Ces travaux permettraient de renforcer la précision des modèles et d'accroître leur utilité pour la gestion des risques torrentiels à l'échelle régionale.

CONCLUSION

L'objectif général de cette étude consistait à établir un portrait de l'aléa torrentiel dans le bassin-versant de la rivière Chaudière. Par le biais de la recension historique des évènements torrentiels et des conditions hydrométéorologiques associées, ainsi que l'analyse des facteurs de vulnérabilité environnementale, il est possible de tirer des conclusions sur les dynamiques spatiotemporelles et d'identifier les facteurs aggravants de l'aléa torrentiel. À la lumière des résultats, il est sans aucun doute possible d'affirmer que le bassin-versant de la rivière Chaudière, à travers ses nombreux tributaires, possède une dynamique torrentielle active et des éléments de vulnérabilité environnementale face aux aléas torrentiels.

L'approche historique a permis de retracer des évènements et d'identifier différents facteurs de déclenchement de nature variable (météorologique, anthropique et géomorphologique). Par la consultation des bases de données et d'une revue de presse exhaustive, 53 évènements à caractère torrentiel ont été identifiés pour la période de 1900 à aujourd'hui, le plus ancien remontant à 1905 et le plus récent à 2022. La consultation des données hydrométéorologiques associées à ces évènements a permis d'établir des constats de nature climatique en lien avec l'occurrence des crues torrentielles. Ainsi, les évènements historiques sont survenus dans les années avec des quantités de pluies records, dont le débit correspond généralement au pic de crue maximal enregistré.

On note aussi que l'absence de cône alluvial à la confluence avec la rivière Chaudière ne signifie pas automatiquement l'absence d'une dynamique torrentielle. En effet, seulement cinq des dix sous-bassins-versants les plus actifs (avec le plus d'évènements torrentiels recensés) présentent un cône alluvial. Un suivi hydrosédimentaire sur ces

cours d'eau permettrait de mieux comprendre la dynamique sédimentaire responsable de la mise en place des cônes alluviaux. Le croisement des données historiques avec les indices morphométriques et les analyses SIG a également permis de révéler le comportement des SBV les plus réactifs. La compilation des indices morphométriques les plus influents sur la dynamique torrentielle a permis d'obtenir des clés d'interprétation pour les SBV. Malgré la présence de cours d'eau avec de fortes pentes à certains endroits, on constate, à partir de la relation entre le coefficient de Melton et la longueur du cours d'eau, une capacité limitée à accumuler et concentrer les sédiments et l'eau nécessaire pour provoquer des processus hydrogéomorphologiques plus extrêmes comme les écoulements hyperconcentrés et les coulées de débris. Ce constat s'aligne avec l'absence de ces types d'évènements dans la recension historique. La compilation des facteurs pondérés (pente, occupation du sol et potentiel de ruissellement en fonction des dépôts de surface) contribuant à la réactivité d'un SBV à une forte pluie a permis d'identifier les SBV les propices aux aléas torrentiels. En croisant ces données avec la recension historique, il est possible d'affirmer que les SBV avec plus de trois évènements enregistrés ont en moyenne un résultat d'analyse multicritère supérieur à 0,30 (entre 0 et 1; la valeur maximale enregistrée est à 0,54). Ainsi, lorsque l'on travaille à l'échelle d'un bassin-versant d'une grande superficie, l'analyse multicritère peut s'avérer une méthode pertinente, nécessitant peu de ressources en coûts et en temps pour réaliser un premier inventaire des endroits vulnérables aux aléas hydrométéorologiques en se basant sur des indicateurs spatiaux fixes.

Ainsi, l'aléa torrentiel dans le BVRC semble premièrement lié aux passages d'évènements météorologiques extrêmes. Les facteurs aggravants consistent en un aménagement du territoire amplifiant le ruissellement (augmentation des surfaces minéralisées et diminution des forêts, prairies et milieux humides) et une disposition géomorphologique des tributaires (forte pente et compacité, amplification du ruissellement lors des précipitations). Les SBV identifiés comme ayant le plus d'évènements sont en ordre décroissant : le Bras Saint-Victor (27), la rivière des

Fermes (12), la rivière Beaurivage (10), la rivière Morency (8), la rivière Famine (8) ainsi que la rivière Nadeau (6). Ces SBV montrent également des conditions propices au ruissellement, des pentes moyennes et une déclivité des cours d'eau plus élevées que les autres SBV.

Néanmoins, afin d'avoir un portrait holistique de la dynamique torrentielle, il serait nécessaire de se pencher davantage sur la dynamique sédimentaire des SBV identifiés dans cette étude comme fortement susceptibles à la torrencialité. Plusieurs avancées dans le domaine des SIG permettent d'analyser, à l'échelle de plus petits secteurs, la dynamique sédimentaire des affluents avec des outils comme ExZeco qui permet de modéliser les corridors possibles d'avulsion, ou encore le logiciel SedIn Connect qui permet de cartographier la connectivité sédimentaire. Ce type d'analyse requiert toutefois une correction onéreuse en temps, du modèle numérique de terrain (ponceaux, cuvettes, débris) afin de pouvoir représenter la réalité adéquatement.

De plus, une étude financée par le bureau de projets – inondations de la rivière Chaudière (ministère des Affaires municipales et de l'Habitation) est présentement en cours pour obtenir une meilleure connaissance de la dynamique hydrosédimentaire de la rivière Chaudière et de ses tributaires. Cette étude permettra notamment de compléter le portrait de la dynamique sédimentaire des tributaires torrentiels et de cartographier les zones en érosion dans le bassin-versant de la rivière Chaudière.

ANNEXE A

TABLEAU DE RECENSION HISTORIQUE

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
1912-08-09	1912-08-09	Région de la Beauce	Orage	« Durée de l'averse: 108 heures du 9 août 00:00 au 13 août 06:00 (sur toute la zone identifiée dont une petite partie concerne le projet). 9 pouces d'eau cumulés dans la région de la Beauce (d'après la carte des isohyètes) » (Aqarisq, s.p.)			Base de données AQUARIS Q, Gagnon, R.D. (1970)
1917-06-18	1917-06-18	Sainte-Marie	Pluie forte et	Débordement rivière Chaudière, à cause de pluies torrentielles et	Deux enfants perdent la vie. Récoltes perdues. Marchandises abîmées.	Brown corporation (entreprise forestière)	Base de données AQUARIS

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
		Saint-Joseph-de-Beauce	embâcles de bois	60,000 cordes de bois amoncelés sur la rivière à Sainte-Marie qui bloquent le passage des eaux ; Montée des eaux de la section des eaux mortes de 17 pieds à Saint-Joseph et 8,8 pieds à Sainte-Marie. ; «On rapporte que l'eau monta de plus de cinq mètres à Saint-Joseph, mais Sainte-Marie fut la principale victime du refoulement de toute cette masse d'eau charriant les billes de bois, les plantes arrachées aux champs cultivés, la paille et toutes sortes de débris y compris les produits des égouts.» (Grenier, F., 2005, p.16)	Dommmages de plus de 100,000\$ au réseau de chemin de fer du Québec Central. 98 bâtiments emportés et 113 maisons, hangars, granges déplacées. Dommages de 5 millions de \$.	reconnait sa responsabilité	Q, Ouranos (2018), Grenier, Fernand (2005).
		Beauceville					
1917-07-30	1917-07-31	Saint-Georges	Orage	Un orage violent, décrit comme une tempête électrique dans les médias, déclenche l'une des pires inondations de l'histoire régionale, avec des pluies diluviennes entraînant le débordement de la rivière	La Brown Corporation a subi des pertes d'un million de dollars lors du transport du bois par drave sur la rivière, entraînant des dommages évalués à 5 millions de dollars pour la	Présence de débris dans les cours d'eau (branches) ; L'ingénieur Bourbonnais propose des mesures telles que des plantations et des barrages pour atténuer les inondations, mais il	Grenier, Fernand (2005), Ouranos (2018), Société historique de Sartigan
		Sainte-Marie					

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
		Beauceville		<p>après douze heures de précipitations ; « Au cours de cette terrible tempête, la rivière est montée de trente pieds au-dessus de son niveau normal. Au matin suivant, les citoyens sont éberlués de voir la Chaudière large comme un fleuve, charriant des maisons, des granges, des remises, des ponts, des arbres et des animaux affolés. » (Société historique, s.d.) ; « Dans la journée du 30 juillet et pendant la nuit suivante, en moins de 24 heures, on enregistra à Beauceville près de quatorze centimètres de pluie. S'ensuivit le lendemain la pire inondation de toute l'histoire beauceronne dans la partie de la vallée s'étendant depuis Saint-Martin jusqu'à Sainte-Marie. » (Grenier, F. (2005), p.18)</p>	<p>population. Les inondations ont emporté 98 bâtiments et déplacé 113 maisons, en plus de causer des dommages au réseau ferroviaire du Québec Central. Plusieurs ponts, dont ceux de Saint-Côme et de la Famine à Saint-Georges, ont été emportés, provoquant la fermeture du pont de Saint-Georges pendant plusieurs jours selon L'Éclaireur du 9 août 1917. ; L'ingénieur Bourbonnais note que « <i>La crue a emporté un grand pont de chemin de fer, a rendu impassables 35 milles de ligne de chemin de fer, a enlevé 2 ponts en fer complets et le tiers d'un autre, deux grands ponts en bois et une foule de petits ponts sur les ruisseaux ayant leur embouchure sur la Chaudière ; elle a aussi emporté 98 bâtisses, déplacé 113 maisons ou hangars ou granges, ruiné une partie de 2</i></p>	<p>suggère également le déplacement des routes, la relocalisation du village de Sainte-Marie et la déclaration d'inhabitabilité de certaines zones, bien que ces recommandations n'aient pas été rapidement suivies en raison des coûts importants.</p>	
	Saint-Martin						
	Notre-Dame-des-Pins						
	Scott						
	Vallée-Jonction						

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
					<i>villages, détruit la récolte et bref affecté directement une population de 16,000 habitants » (Hamelin, 1958, p.223)</i>		
1922-06-18	1922-06-18	Sainte-Marie	Pluie forte et embâcles de bois		« Mais, l'inondation qui se produit en Beauce, le 18 juin 1922, demeure mémorable. Une fois encore, les dommages aux résidences et aux commerces des municipalités riveraines de la Chaudière sont considérables. » ; Le niveau de la rivière Chaudière dépasse largement la chaussée d'un pont en bois à l'intérieur du village de St-Georges lors de l'inondation du 18 juin 1922; le garde-corps est très endommagé et presque entièrement submergé; un pylône installé sur le pont est sur le point de s'effondrer.	« Lourdemement éprouvée, la patience des Mariverains a atteint son point limite. Au cours des audiences qui suivirent, on mentionnait que la compagnie Brown « n'a cessé, jusqu'à l'été de 1922 inclusivement, de se servir de la rivière en guise de cour à bois, où elle a stationné, pendant plusieurs mois, sans interruption, du printemps à l'automne, plusieurs milliers de cordes de bois chaque année.» (APBB, 2018, s.p.) ; « Cette année-là, en raison des pertes subies, la Brown Corporation met fin au stockage du bois dans le	Grenier, Fernand, (2005) ; Association des propriétaires de la Beauce (APBB), (2018)

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
						voisinage de Sainte-Marie. Il faut cependant attendre 1947 pour que cesse toute accumulation de bois dans le lit de la Chaudière.» (p.17) ;	
1942-07-18	1942-07-18	Sainte-Marie	Pluie forte	Violente précipitation, débit Rivière Chaudière 1530 m3/sec			Beudet (2019), CEHQ
1965-09-26	1965-09-26	Sainte-Marie	Pluie forte	Débit Rivière Chaudière 562 m3/sec			Beudet (2019), CEHQ
1971-08-30	1971-08-30	Vallée-Jonction Saint-Elzéar Sainte-Marie Saint-Jules Sainte-Clotilde-de-Beauce Saint-Victor	Tempête tropicale Doria	« Poussée par des vents atteignant une vitesse de 21 milles à l'heure, la précipitation a été de 2.55 pouces à partir de vendredi soir jusqu'à minuit, samedi. Ce record de pluie, en moins de trente heures, porte à 8.33 pouces le total de la chute au mois d'août. Ce chiffre fait plus que doubler la normale de 3.60 pouces » (Le Soleil, p.1)	« Un pont d'acier de 36 pieds de longueur a été déplacé de sa base à Saint-Victor, plusieurs ponceaux ont été démolis et emportés, des routes minées. Dommages aux propriétés domiciliaires, industrielles, publiques, agricoles et autres » (p.1). Total des dommages pour toutes les villes concernées: 151,800\$	« Dans le cas des citoyens de Saint-Joseph-des-Érables, ils sont complètement isolés puisque les routes conduisant à la municipalité de Saint-Joseph, Vallée-Jonction, Saint-Frédéric et Tring sont complètement fermées à la circulation. Le niveau de l'eau dépasse par fois quatre pieds. » ; « Pour la population du bas de la Beauce, soit Sainte-	Le Soleil (1971), base de données AQUARIS Q

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Dommmage	Divers	Source(s)
		Saint-Frédéric				Marie, Vallée-Jonction, et Saint-Joseph, le creusage de la rivière Chaudière à différents endroits est le seul remède qui s'impose pour mettre fin à ces maux annuels.» (Le Soleil, 1971, p.1) ; « A Saint-Frédéric de Beauce, les approches d'un ponceau de la voie ferrée du Québec-Central ont été minées sur une longueur de 50 pieds sur la route 276 et à plusieurs endroits dans cette municipalité les routes secondaires ont dû être fermées à la circulation. » (Le Soleil, 1971 p.1)	
		Saint-Joseph-de-Beauce					
		Saint-Joseph-des-Érables					
		Beauceville					
		Saint-Georges					
1976-07-11	1976-07-11	Vallée-Jonction	Pluie forte	« Une quarantaine d'heures de pluie diluvienne et de bourrasques de vent » (Le Soleil, 1976a)	« Dans la Beauce, surtout à Sainte-Marie, des résidences sont inondées, des routes secondaires sont endommagées et des récoltes sont ravagées à plusieurs endroits du comté. Les inondations ont déjà causé plus de \$125,000 de dégâts dans le comté, dont environ		Le Soleil (1976a)
		Beauceville					
		Sainte-Marie					
		Saint-Joseph					
		Saints-Anges					

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
					\$60,000 de dommages dans Sainte-Marie et la périphérie» (p.1)		
1976-08-11	1976-08-11	Saint-Joseph-de-Beauce Saint-Joseph-des-Érables Saint-Georges Beauceville Vallée-Jonction Sainte-Marie	Ouragan Belle	Entre 50 et 75mm de pluie ; « Les pluies diluviennes des derniers jours ont développé une crue des eaux qui a occasionné des situations désastreuses dans plusieurs régions du Québec, notamment dans les comtés de Charlevoix et de Beauce.» (Le Soleil, 1976b, p.1)	« Pire inondation estivale depuis 1917 » (p.14) ; « En plus des récoltes perdues, des arbres ont été déracinés, des pontons emportés, des routes secondaires minées, des campeurs délogés, puis des caves inondées.» (Le Soleil, 1976b, p.1)	« La rue Saint-Cyrille et la route Carter sont les endroits les plus affectés, car les approches ont été minées, comme ce fut le cas pour deux pontons sur la route secondaire reliant les municipalités de Sainte-Marie paroisse à Saints-Anges.» (Le Soleil, 1976b, p.1)	Le Soleil (1976b)
1981-09-01	1981-09-01	Sainte-Marie	Pluie forte	Débit Chaudière : 1320 m3/sec			Beudet (2019)
1986-08-09	1986-08-09	Saint-Éphrem-de-Beauce	Orage		Bris de structure	Sévérité : mineure	Base de donnée canadienne sur les catastrophes (MSPC)
1988-08-15	1988-08-15	Saint-Frédéric	Pluie forte	« Les pluies ont duré environ quatre heures, mais étaient d'une intensité	« A Beauceville, le gonflement d'un ruisseau a entraîné le bris d'un	Le Bureau de la protection civile du Québec a même décrété	Le Devoir (1988)

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
		Beauceville Tring-Jonction Saint-Joseph-des-Érables		rarement observée. Il a été impossible d'obtenir une évaluation exacte puisque Environnement-Canada n'a pas de station dans ces régions, mais des météorologues amateurs de la région de Thetford Mines ont indiqué avoir prélevé pas moins de 135 millimètres d'eau hier matin » (p.8) ; « D'autres ruisseaux normalement plus calmes ont profité de l'état général pour déborder et provoquer des affaissements de terrains » (p.8)	tuyau situé tout près d'une école et l'effondrement d'une partie d'un muret de terre sur lequel passait une voie ferrée.» ; « A Tring-Jonction, plusieurs routes ont été complètement sectionnées par l'action des eaux en furie.» (p.8) ; « Quelques mètres plus bas, plusieurs automobiles ont été partiellement ensevelies par le gravier et la boue. La voie ferrée inutilisée du Canadien Pacifique reposait pour sa part dans le vide sur une quinzaine de mètres.» (p.8)	l'état d'alerte de niveau quatre pour les riverains de la Chaudière, un état qui se constate normalement aux grandes crues du printemps. » (p.8)	
1990-08-04	1990-08-04	Saint-Éphrem-de-Beauce	Orage	Pluie estivale abondante: orages isolés.	Domages: Bris de structures	Sévérité: Mineure.	Base de donnée canadienne sur les catastrophes (MSPC)

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
1990-08-13	1990-08-14	Saint-Georges	Pluie forte	13/08/1990: 60.6 mm et 14/08/1990: 42 mm ; débit rivière Chaudière 1050 m3/sec ; L'article du Soleil (1990) mentionne que le ruisseau, habituellement d'une hauteur de dix centimètres en été, est passé de son état habituel à une rivière en un court laps de temps	Les conséquences sont dévastatrices avec des ponceaux emportés, des tronçons de route endommagés, des sous-sols inondés et des glissements de terrain par endroit ; « Les dégâts causés dans la région de Saint-Georges de Beauce par les inondations à la suite des pluies torrentielles du 13 août se chiffre à 5 799 000\$ » (Le Soleil, p.3) ; L'impact sur l'hôpital de Saint-Georges a été particulièrement sévère, où la boue charriée par la crue a laissé une trace de cinq pieds sur les murs du sous-sol, où on y estime les dommages à environ 150 000\$.	Rupture d'un barrage en amont du ruisseau	Le Soleil (1990), Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
1992-08-04	1992-08-04	Saint-Éphrem-de-Beauce La Guadeloupe	Pluie forte	Inondation due à des pluies abondantes estivales: 50 mm en 24 heures ;	La rivière Le Bras s'est frayé un chemin d'environ 50 pieds de large à travers les boisés. Aucune résidence n'a subi de dommage, mais le pont couvert est	Sévérité: Importante.	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Dommmage	Divers	Source(s)
		Saint-Honoré-de-Shenley			endommagé; Bris structures, fermeture de routes, 450 maisons et commerces inondés.		
		Saint-Georges					
1993-08-17	1993-08-17	Beauceville	Orage	Pluie estivale abondante: 117 mm en 2 heures. Les rues sont devenues des ruisseaux et les ruisseaux des rivières.	Dommmages: 96 résidences endommagées, bris structures. Route St-Philippe effondrée. Conduite maitresse de l'usine de filtration d'eau à Beauceville endommagée.	Évacuation: Environ 20 évacués. Sévérité: Modérée. Dégât évalué à 1 million et demi de \$	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC), Le Soleil (1993)
1995-07-24	1995-07-24	Saint-Georges	Pluie forte	« Le débit de la rivière Famine est passé de 13 m3/s (débit moyen) à 133 m3/s le 24 juillet 1995; celui de la rivière Chaudière est alors monté à 436 m3/s; la rivière Famine, en aval de la ville de Saint-Georges, a multiplié son débit par 13 en moins de quatre jours.» ; Crue importante des affluents que la Chaudière ne peut écouler, principalement à la convergence de la rivière			AQUARIS Q, Ouranos (2018)

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
				Chaudière avec la rivière Famine			
1996-06-13	1996-06-13	Sainte-Marie Saint-Elzéar Vallée-Jonction Saints-Anges	Pluie forte	50 mm de pluie en une heure accompagnée de grêlons. « Tandis que le pluviomètre de la municipalité enregistrait des précipitations d'au moins 50 mm, le quadrilatère formé par les rues Principale, des Pionniers, Beauséjour et de l'Eglise était transformé en rivières de trois à quatre pieds de hauteur. » (Le Quotidien, 1996, p.6)	Vallée-Jonction: Bris de structure ; Sainte-Marie : Plusieurs résidences inondées. « L'eau a inondé au moins une trentaine de maisons et de commerces, en plus d'emporter trois ponceaux et d'endommager des infrastructures publiques. Les dégâts se comptent par centaines de milliers de dollars. » (Le Quotidien, 1996, p.6)	Sévérité: Modérée.	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC), Historique des événements de sécurité civile du Québec (MSPQ), Le Quotidien (1996, p.6)

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
1996-07-03	1996-07-04	Sainte-Marie	Pluie forte	Pluie estivale abondante: 3/07/1996: 22.4 mm et 4/07/1996: 6.8 mm	Dommages: Plusieurs résidences inondées.	Sévérité: Modérée.	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
		Saint-Elzéar					
1997-06-25	1997-06-29	Saint-Séverin	Pluie forte	Saint-Séverin: Pluie estivale abondante: 3/07/1997: 42.6 mm et 2/07/1997: 30.4 mm.	Bris de structures.	Sévérité : Modérée	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC), Ouranos
		Vallée-Jonction		Vallée-Jonction: Pluie estivale abondante: 25/06/1997: 14.8 mm.			
1997-07-02	1997-07-03	Saint-Séverin	Orage	Pluie estivale abondante: 3/07/1997: 42.6 mm et 2/07/1997: 30.4 mm.	Bris de structures.		Historique des événements de sécurité civile du Québec (MSPQ)
1997-08-21	1997-08-22	Saint-Séverin	Pluie forte	21/08/1997: 61.4 mm et 22/08/1997: 25.8 mm (103.6 mm selon données EC)	Bris de structures	Sévérité: Mineure.	Historique des événements de sécurité civile du Québec
		Beauceville					

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
							(MSPQ), Base de données canadienne sur les catastrophes
2002-07-01	2002-07-01	La Guadeloupe Lac- Mégantic Notre- Dame-des- Pins Saint- Alfred Saint- Benoît- Labre Sainte- Aurélie Sainte- Cécile-de- Whitton Sainte- Clotilde- de-Beauce Sainte- Marie Saint- Éphrem- de-Beauce	Orage	La station d'observation de Beauceville a enregistré 58 mm de pluie entre une heure et cinq heures la nuit dernière ; Des accumulations de pluies de 50 à 94 millimètres ont provoqué des inondations dans plusieurs secteurs ;	Des dommages importants aux infrastructures routières municipales et provinciales ont eu lieu. Plusieurs pannes électriques localisées se sont produites. Plusieurs résidences et commerces ont été inondés et quelques-unes sont isolées. Saint-Éphrem-de-Beauce: 30 résidences inondées. Route 269, route 271 et rang 7 sont fermés; plusieurs pannes électriques et le réseau téléphonique est engorgé. 20 personnes évacuées et relocalisées dans le sous-sol de l'hôtel de ville.	Sévérité: Importante.	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC), Historique des événements de sécurité civile du Québec (MSPQ), Ouranos

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Dommage	Divers	Source(s)
		Sainte-Rose-de-Watford					
		Saint-Georges					
		Saint-Hilaire-de-Dorset					
		Saint-Honoré-de-Shenley					
		Saint-Joseph-de-Beauce					
		Saint-Joseph-des-Érables					
		Saint-Jules					
		Saint-Louis-de-Gonzague					
		Saint-Ludger					
		Saint-Martin					
		Saint-Odilon-de-Cranbourne					
		Saint-Prosper					

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
		Saints-Anges					
		Saint-Victor					
		Saint-Zacharie					
		Scott					
		Vallée-Jonction					
2003-08-04	2003-08-06	Adstock	Orage	Pluie estivale abondante: 5/08/2003: 27 mm; 6/08/2003: 71.1 mm et 7/08/2003: 18 mm	Dommages: Plusieurs résidences touchées, bris de structures ; Les autorités évaluent les dommages à plus de 300 000 dollars.	Sévérité: Importante. Saint-Séverin: Sévérité: Extrême.	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC), Ouranos, Le Devoir (2003).
		Beauceville					
		La Guadeloupe					
		Lévis					
		Saint-Benoît-Labre					
		Saint-Elzéar					
		Sainte-Marguerite					
		Sainte-Marie					
		Saint-Éphrem-de-Beauce					
		Saint-Georges					

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Dommage	Divers	Source(s)
		Saint-Hilaire-de-Dorset					
		Saint-Honoré-de-Shenley					
		Saint-Joseph-des-Érables					
		Saint-Martin					
		Saint-Narcisse-de-Beaurivage					
		Saint-Patrice-de-Beaurivage					
		Saint-Séverin					
		Saint-Sylvestre					
		Saint-Victor					
		Vallée-Jonction					
		Saint-Martin					

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
2004-07-31	2004-07-31	Vallée-Jonction Saints-Anges	Pluie forte			« L'article mentionne ici que les sinistrés peuvent soumettre une réclamation en vertu du Programme général d'aide financière du gouvernement québécois. Ce programme a été établi en 2003 pour permettre un versement rapide en cas de graves préjudices ou de dommages importants. »	AQUARIS Q, Ouranos (2018)
2005-08-30	2005-08-30	Saint-Georges	pluie forte	Pluie estivale abondante: 76.4 mm.		Évacuation du parc de roulottes. Sévérité: Mineure.	Base de donnée canadienne sur les catastrophes (MSPC)
2005-09-27	2005-09-27	Lévis Saint-Gilles	Ouragan Rita	La région de la Capitale-Nationale a reçu hier plus de 100 mm de pluie en 15 heures; Pluie estivale abondante: 25/09/2005: 11.3 mm et 26/09/2005: 108.5 mm.	Érosion à Saint-Gille ; Plusieurs résidences touchées, bris de structures.	Sévérité: Modérée.	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC), Historique des événements de sécurité civile du Québec (MSPQ)

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
2006-07-02	2006-07-04	Saint-Martin	Orage	Pluie estivale abondante: 2/07/2006: 16.6 mm orages isolés?	Plusieurs résidences touchées, bris de structures	Sévérité: Modérée.	MSPC
2006-09-27	2006-09-28	Saint-Honoré-de-Shenley	Pluie forte				Historique des événements de sécurité civile du Québec (MSPQ)
2007-06-04	2007-06-04	Beauceville	pluie forte	Pluie estivale abondante: 35.2 mm			Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
2007-07-20	2007-07-20	Lévis Sainte-Marie	pluie forte	Pluie estivale abondante: 19/07: 22.8 mm et 20/07: 37.4 mm (74 mm pour données EC).			Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
2007-07-28	2007-07-28	Sainte-Marie	pluie forte		Domages à des infrastructures routières municipales.		Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
2008-06-15	2008-06-15	Saint-Gédéon-de-Beauce	pluie forte	Pluie estivale abondante: 17/06/2008: 47,9 mm; 18/06/2008: 27,4 mm et 19/06/2008: 36,5 mm.			Base de données canadienne sur les

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
							catastrophes (MSPC)
2008-07-31	2008-07-31	Beauceville	Pluie forte	73 mm de pluie en 90 minutes.	L'augmentation de la rivière Chaudière avait provoqué l'inondation d'une dizaine de résidences.		Historique des événements de sécurité civile du Québec (MSPQ), Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
		Saint-Augustin-de-Woburn					
		Lac-Mégantic					
		Saint-Gédéon-de-Beauce					
2008-08-03	2008-08-04	Audet	pluie forte	Des tempêtes et de fortes pluies se sont abattues sur les régions de la Beauce, du Témiscouata et de la Gaspésie dans l'est du Québec et dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick voisin. Un déluge de plus 100 mm de pluie a provoqué de graves inondations qui ont raviné des dizaines de routes dans la région. « En quatre			Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
		Beauceville					
		Frontenac					
		Lac-Mégantic					
		Saint-Gédéon-de-Beauce					
		Piopolis					

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
		Saint-Augustin-de-Woburn		jours, il est déjà tombé plus de pluie sur l'est du Québec qu'il n'en tombe en moyenne pour tout le mois d'août. »			
2008-09-14	2008-09-14	Lévis	pluie forte	Pluie estivale abondante: 64.5 mm			Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
		Beauceville					
2009-07-01	2009-07-03	Saint-Patrice-de-Beaurivage	pluie forte		Quelques résidences touchées, bris de structures.	Sévérité: Mineure.	Base de donnée canadienne sur les catastrophes (MSPC)
		Vallée-Jonction					
2009-07-24	2009-07-29	Sainte-Marie	Orage	Pluie estivale abondante: orages isolés : 25/07/2009: 13.5 mm, 26/07/2009 : 12.6 mm et 29/07/2009 : 13 mm.	Dommages: Quelques résidences touchées, bris de structures.	Sévérité: Mineure.	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
		Saint-Joseph-de-Beauce					
		Saint-Patrice-de-Beaurivage					
		Saint-Séverin					
		Vallée-Jonction					

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
2010-07-09	2010-07-09	La Guadeloupe	pluie forte	Pluie estivale abondante	Bris de structures.	Sévérité: Mineure.	Base de donnée canadienne sur les catastrophes (MSPC)
2011-08-28	2011-08-30	Lévis Sainte-Marie Saint-Frédéric Saint-Gilles Saint-Joseph-de-Beauce Saint-Patrice-de-Beaurivage Saints-Anges Saint-Victor Tring-Jonction Vallée-Jonction Val-Racine East Broughton	Ouragan Irène	20 à 30 mm de pluie en journée et 50 à 70 mm de pluie pendant la nuit; débordement rivières Nadeau et Lessard.	Plusieurs résidences touchées. Plusieurs routes fermées. Huit résidences évacuées.	Sévérité: Modérée ; 31 890 clients Hydro-Québec sans électricité (Chaudière-Appalaches) ;	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC), Le Soleil (2011), COBARIC (2023).

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
2011-09-04	2011-09-04	Beauceville	pluie forte	Hausse de la rivière Morency. Rues Labaie et Principale inondée.	Dizaine de résidences avec infiltration d'eau. Rue Jacob affaissée.	Aucune évacuation. Sévérité: Mineure.	Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
		East Broughton					
		Lévis					
		Vallée-Jonction Saint-Gilles					
2013-07-19	2013-07-19	Frontenac	pluie forte	Des vents violents et des pluies abondantes sont survenus le 19 juillet 2013, dans des municipalités du Québec, causant des dommages aux biens essentiels.			Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
2016-07-22	2016-07-22	Sainte-Marie	Pluie forte		409 095\$ de dommages à Sainte-Marie (centre-ville)		Beauce Média
2016-08-16	2016-08-16	Saint-Gédéon-de-Beauce	Pluie forte	40 mm de pluie en 24h et plus pendant la nuit	Érosion		MSPQ
2016-08-23	2016-08-23	Saint-Honoré-de-Shenley	Pluie forte		Érosion		MSPQ
2017-08-04	2017-08-04	Saint-Joseph-de-Beauce	pluie forte	Tornade accompagnée de précipitations			Base de données canadienne sur les

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Dommmage	Divers	Source(s)
							catastrophes (MSPC)
2018-06-19	2018-06-19	Lac-Drolet	pluie forte		Érosion à Audet		Historique des événements de sécurité civile du Québec (MSPQ)
		Audet					
2018-07-27	2018-07-27	Audet	pluie forte				Base de donnée canadienne sur les catastrophes (MSPC) ; Historique des événements de sécurité civile du Québec (MSPQ)
		Saint-Ludger					
		Saint-Robert-Bellarmin					
2018-08-01	2018-08-01	Saint-Frédéric	Pluie forte				Historique des événements de sécurité civile du Québec (MSPQ)

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Domage	Divers	Source(s)
2018-08-29	2018-08-29	Adstock	Orage	« Le ruisseau d'Ardoise, situé dans le secteur de la 1re avenue à Saint-Georges, a vu son débit augmenter très rapidement, de sorte que l'eau s'est retrouvée sur la chaussée. Les dégâts sont toutefois mineurs. »			Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC), Ma Beauce
		La Guadeloupe					
		Saint-Georges					
		Saint-Joseph-des-Érables					
2019-09-04	2019-09-04	Saint-Benjamin	pluie forte				Base de données canadienne sur les catastrophes (MSPC)
		Sainte-Rose-de-Watford					
2022-08-09	2022-08-09	Beauceville	Orage	Environnement Canada indique que 70,3 mm de pluie sont tombés le 8 août à la station météorologique de Beauceville ; « Un mois de pluie en deux jours », rivière Famine et Chaudière qui déborde			En Beauce (journaux), Météomédia
		Saint-Georges					
		Saint-Joseph-des-Érables					
2023-09-20	2023-09-20	Saint-Georges	Pluie forte	« La rivière Chaudière est sortie de son lit dans plusieurs secteurs en début de soirée mardi. À St-			Ma Beauce, Journal de Québec

Date début	Date fin	Localité	Cause	Détail hydrométéo	Dommage	Divers	Source(s)
		Notre-Dame-des-Pins		Georges, les autorités municipales ont fermé l'accès aux passerelles de l'île Pozer. Une partie du parc Veilleux a aussi été inondée. »			
		Beauceville					
		Saint-Joseph-de-Beauce					
		Sainte-Marie					

ANNEXE B

CARACTÉRISATION DES SOUS-BASSINS VERSANTS

Nom bassin	Superficie (km ²)	Présence de cône alluvial	Pente moyenne du SBV (%)	Pente moyenne des cours d'eau (%)	Indice de Melton	Coefficient de Gravelius	Densité de drainage
Ardoise, Ruisseau d'	22,710	0	2,652	1,809	0,043	1,563	1,024
Aulnes, Ruisseau des	2,729	0	6,535	3,801	0,094	1,559	1,630
Basque, Ruisseau	3,532	1	4,246	4,567	0,088	1,374	1,279
Beaurivage, Rivière	718,885	0	1,444	1,466	0,021	2,011	2,104
Belair, Rivière	44,466	1	2,659	2,672	0,040	1,463	1,184
Bergeron, Rivière	55,682	0	2,647	3,332	0,037	1,448	1,342
Bolduc, Ruisseau à	12,180	0	4,778	3,718	0,059	1,374	1,547
Calway, Rivière	84,935	0	2,903	2,504	0,049	1,746	1,312
Cantin, Ruisseau	19,929	0	1,429	1,211	0,015	1,349	1,768
Carter, Ruisseau	10,612	1	4,209	3,433	0,067	1,338	1,364
Chassé, Rivière	77,342	1	2,746	2,799	0,028	1,452	1,372
Cliche, Rivière	17,129	1	7,669	4,270	0,085	1,390	1,126
Coop, Ruisseau de la	10,587	1	5,636	3,033	0,068	1,474	1,070
Doyon, Fossé	5,642	0	4,431	4,942	0,072	1,309	1,719

Doyon, Ruisseau	9,125	0	4,450	2,654	0,060	1,616	1,583
Drolet, Rivière	34,477	0	2,629	4,740	0,056	1,606	1,395
Dutil, Ruisseau	11,328	1	1,903	1,711	0,043	1,575	0,909
Famine, Rivière	712,575	0	1,262	1,899	0,015	1,857	0,974
Fermes, Rivière des	64,642	1	3,325	3,040	0,061	1,692	1,427
Gagnon, Ruisseau	5,361	0	2,201	2,122	0,036	1,322	1,535
Gilbert, Rivière	62,962	1	2,735	2,833	0,046	1,562	1,231
Glen, Rivière	63,480	1	2,502	2,010	0,030	1,362	0,962
Graines, Ruisseau des	19,437	0	4,370	4,120	0,068	1,584	1,455
Grand Ruisseau, Le	5,033	0	0,923	1,176	0,014	1,445	2,006
Grande Coudée, Rivière de la	164,438	0	1,862	1,824	0,022	1,641	0,996
Gunn, Ruisseau	29,896	0	2,482	2,417	0,033	1,545	0,896
Îles Brûlées, Rivière des	34,602	0	1,298	1,229	0,018	1,474	1,981
Lac des Joncs, Décharge du	438,615	0	6,278	5,224	0,034	1,902	1,479
Lessard, Rivière	31,688	0	8,833	4,039	0,081	1,670	1,504
Lionel, Ruisseau à	9,270	0	6,823	3,971	0,060	1,684	1,488
Loup, Rivière du	895,024	0	2,364	3,785	0,023	1,878	1,162
Ludgine, Rivière	69,732	0	1,892	2,849	0,036	1,489	1,185
Madisson, Rivière	62,071	0	3,249	2,745	0,065	1,590	1,182
Mathieu, Rivière	4,594	1	3,690	3,743	0,084	1,277	1,359
Morency, Rivière	34,056	0	3,397	3,731	0,073	1,461	1,361
Moulin, Rivière du	77,698	1	2,012	2,874	0,025	1,311	1,118
Nadeau, Rivière	39,638	1	7,689	3,519	0,066	1,481	1,206
Nadeau, Ruisseau	5,755	0	0,906	1,057	0,010	1,193	3,097
Nebnellis, Rivière	135,720	0	3,175	3,681	0,032	1,461	1,138
O'Hara, Ruisseau	11,690	0	2,927	1,961	0,042	1,476	1,438
Paul-Lessard, Cours d'eau	5,054	0	4,198	1,544	0,035	1,409	1,580

Petit Portage, Rivière du	27,893	0	4,275	1,536	0,041	1,588	0,659
Plante, Rivière des	120,925	1	2,639	2,744	0,033	1,407	1,192
Poulin, Ruisseau	5,446	0	2,406	2,144	0,033	1,311	1,629
Pouliot, Rivière	43,613	1	3,220	2,523	0,062	1,615	1,347
Pozer, Rivière	150,961	0	1,911	2,324	0,023	1,350	1,270
Quirion, Ruisseau	7,819	0	6,164	2,857	0,052	1,766	0,796
Roy, Ruisseau	20,527	1	2,336	2,033	0,036	1,276	0,955
Roy, Ruisseau	14,796	0	0,589	0,703	0,006	1,384	2,611
Roy-Labbé, Cours d'eau	5,756	0	2,229	1,833	0,037	1,417	1,239
Saint-Elzéar, Ruisseau	5,750	1	3,760	2,962	0,064	1,347	1,148
Saint-Louis, Ruisseau	4,625	0	0,311	0,849	0,005	1,305	1,305
Saint-Victor, Bras	733,074	0	1,848	2,763	0,018	1,894	1,205
Samson, Rivière	217,046	0	3,590	3,757	0,033	1,512	1,193
Savane, Ruisseau de la	7,152	0	0,669	0,887	0,013	1,455	2,766
Savoie, Rivière	22,930	1	5,830	4,361	0,061	1,341	1,365
Scully, Ruisseau	3,108	0	3,725	3,590	0,060	1,358	1,701
Shenley, Rivière	35,094	1	2,711	1,476	0,035	1,579	1,197
Stafford, Ruisseau	48,463	0	1,985	1,909	0,031	1,469	0,951
Terrebonne, Ruisseau	39,668	0	1,007	0,984	0,013	1,633	2,129
Truite, Rivière à la	48,033	0	2,319	2,313	0,037	1,339	0,983
Vallée, Rivière	28,793	1	2,281	2,113	0,039	1,327	1,317
Victoria, Rivière	142,226	0	3,400	4,004	0,038	1,464	1,424
Vidal-Morin, Ruisseau à	8,979	1	3,789	2,825	0,072	1,481	0,803
Young, Ruisseau	11,698	0	2,324	2,069	0,036	1,239	0,974
02340076	11,011	1	4,504	3,767	0,062	1,567	1,583
02340413	6,952	1	1,984	2,308	0,049	1,494	1,080
02340419	9,115	1	5,083	4,258	0,074	1,283	1,317
02340620	7,823	1	1,857	1,924	0,033	1,328	2,021
02340082	18,267	0	1,870	1,930	0,042	1,577	0,824
02340085	23,794	0	1,980	2,376	0,036	1,374	1,203

02340240	3,570	0	4,736	3,078	0,091	1,711	1,601
02340246	4,446	0	11,011	4,209	0,069	1,210	1,418
02340408	9,319	0	2,290	2,471	0,050	1,576	0,816
02340435	8,995	0	4,345	4,129	0,080	1,437	1,670
02340437	9,238	0	8,703	3,493	0,068	1,388	1,195
02340443	9,707	0	3,187	2,258	0,050	1,417	1,410
02340447	5,128	0	2,936	2,615	0,032	1,180	1,073
02340448	5,605	0	4,754	3,848	0,060	1,314	1,075
02340464	2,761	0	4,965	5,410	0,104	1,474	1,775
02340465	5,102	0	3,541	3,599	0,071	1,599	1,351
02340495	1,424	0	2,454	1,727	0,047	1,434	2,530
02340819	13,197	0	1,728	1,723	0,058	1,730	0,950
0234A024	2,867	0	9,922	4,385	0,068	1,292	2,750
0234A033	2,608	0	4,709	2,746	0,072	1,445	1,631
0234A178	11,490	0	5,287	3,120	0,076	1,357	0,860

BIBLIOGRAPHIE

- Abdel Hamid, H. T., Wenlong, W. et Qiaomin, L. (2020). Environmental sensitivity of flash flood hazard using geospatial techniques. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(1).
- Abdelkareem, M. (2017). Targeting flash flood potential areas using remotely sensed data and GIS techniques. *Natural Hazards*, 85(1), 19-37.
- Agriculture Canada (2020). Couverture des terres du Canada 2020, [En ligne], Canada. Récupéré de https://agriculture.canada.ca/atlas/data_donnees/landuse/. Page consultée le 1^{er} mars 2023.
- Amoros, C. and Petts, G.E. (1993). *Hydrosystèmes fluviaux* Paris: Masson.
- Ancey, C. (2005). *Une introduction à la dynamique des avalanches et des écoulements torrentiels*. Lausanne : École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Ancey, C. (2013). Debris Flows. Dans B. Schrefler et P. Delage (dir.), *Environmental Geomechanics*, 1-37.
- Ancey, C., Bohorquez, P. et Bardou, E. (2014). Sediment Transport in Mountain Rivers. *Ercoftac Bulletin*, 100, 37-52.
- Anctil, F., Rousselle, J. et Lauzon, N. (2012). *Hydrologie – Cheminement de l'eau*. Montréal : Presses internationales Polytechnique.
- Andréassian, V. (2004). Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins-versants. *La Houille Blanche*, 90(2), 31-35.
- Angillieri, M. Y. (2008). Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. *Environmental Geology*, 55(1), 107-111.
- Alam, A., Ahmed, B. et Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International*, 575-576, 295-307.

- Alcantara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, n°47, 107-124.
- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73(3-4), 247-265.
- Arattano, M. et Franzini, L. (2004). Analysis of different water-sediment flow processes in a mountain torrent. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(5/6), 783-791.
- Archer, D. R. et Fowler, H. J. (2015). Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S121-S133.
- Balica, S., Douben, N. et Wright N.G. (2009). Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Science and Technology*, vol. 60, no 10, 2009, p.2571
- Baraille, S. (2003). Pour une prévision des crues graves en haute Durance : typologie des situations météorologiques à risque. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 1(1), 215-222.
- Beniston, M., Diaz, H. F. et Bradley, R. S. (1997). Climatic Change at High Elevation Sites: An Overview. Dans H. F. Diaz, M. Beniston et R. S. Bradley (dir.), *Climatic Change at High Elevation Sites*, Springer Netherlands, p. 119.
- Beniston, M. et Stephenson, D. B. (2004). Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 44(1-4), 1-9.
- Beniston, M. (2009). Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100. *Geophysical Research Letters*, 36(7).
- Bendjoudi, H. et Hubert, P. (2002). Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins-versants. *Hydrological Sciences Journal*, 47(6), 921-930.
- Besson L. (1996). *Les risques naturels en montagne, traitement, prévention, surveillance*. Artès-Publialp, Grenoble.
- Blair, T. C. et McPherson, J. (1994). Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies, *Journal of Sedimentary Research*, 64, 451-490.
- Bhatt, S. et Ahmed, S. A. (2014). Morphometric analysis to determine floods in the Upper Krishna basin using Cartosat DEM. *Geocarto International*, 29(8), 878-894.

- Billette, A. et Carrier, M. (1995). *La régulation socio-identitaire dans le district de la Beauce (Québec) / A Quebec variant of the industrial district : la Beauce.*
- Bishop, M. P. (2013). 3.1 Remote Sensing and GIScience in Geomorphology: Introduction and Overview. Dans J. F. Shroder (dir.), *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, p. 1-24.
- Birkmann, J., Cardona, D., Carreño, L. (2013) Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural Hazards*, vol. 67, n° 2, p.193-211.
- Biron, P. M., Choné, G., Buffin-Bélanger, T., Demers, S. et Olsen, T. (2013). Improvement of streams hydro-geomorphological assessment using LiDAR DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(15), 1808-1821.
- Biron, P., Boucher, E., Taha, W., Martel, J.-L. et Fournier, A. (2020). *Comité expert visant à identifier des solutions porteuses pour la réduction de la vulnérabilité des risques liés à l'inondation par embâcles de glace sur la rivière Chaudière.* Rapport présenté au ministère de l'Environnement et la Lutte contre les changements climatiques, 103 p.
- Borga, M., Gaume, E., Creutin, J. D. et Marchi, L. (2008). Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes. *Hydrological Processes*, 22(18), 3883-3885.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F. et Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194-205.
- Bovis, M. J. et Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(11), 1039-1054.
- Boyer-Villemare, U., Lamy, A., Desjardins, R., Roques, J., Heinrich, D., Simard, C., Morin, H. et Braun, M. (2021). *Analyse coûts-avantages des options d'adaptation aux inondations et aléas fluviaux du bassin-versant de la rivière chaudière.* Rapport présenté à Ressources naturelles Canada. Ouranos. Montréal. 143 p. <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-07/proj-201419-ge-boyervillemare-etudecas02.pdf>. Page consultée le 17 juin 2024.
- Bracken, L. J. et Croke, J. (2007). The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 21(13), 1749-1763.
- Bracken, L. J., Turnbull, L., Wainwright, J. et Bogaart, P. (2015). Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 177-188.

- Bravard, J.P. and Petit, F. (1997). *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial*. Paris: Armand Colin.
- Bravard, J.-P. (2002). Les réponses des systèmes fluviaux à une réduction des flux d'eau et de sédiments sous l'effet du reboisement en montagne. *La Houille Blanche*, 88(3), 68-71.
- Bull, W. B. (1977). The alluvial-fan environment, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1, 2, 222-270.
- Buffin-Bélanger, T. dans Locat et al. (2008). *Les risques d'inondation sur les cônes alluviaux dans l'est du Québec*. Communication donnée dans le cadre de la 4^e conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion. Québec : Presses de l'Université Laval, 594p.
- Cardona Omar Dario, van Aalst Maarten, Birkmann Joern et al., (2012). *Determinants of risk: exposure and vulnerability*. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). New York, Cambridge University Press.
- Caron, O. (2013). *Synthèse et modèle cartographique 3D des formations quaternaires pour les bassins-versants des rivières Chaudière et Saint-François : géochronologie, stratigraphie et paléogéographie wisconsinienne du sud du Québec*. Montréal : Université du Québec à Montréal, Département des sciences de la Terre et de l'Atmosphère. [En ligne]. (<https://archipel.uqam.ca/5982/1/D2412.pdf>). Page consultée le 13 avril 2023.
- Cavallin, A., Marchetti, M., Panizza, M. et Soldati, M. (1994). The role of geomorphology in environmental impact assessment. *Geomorphology*, 9(2), 143-153.
- CEHQ. Centre d'expertise hydrique du Québec, (2024). Fiche signalétique de la station 023402 – Saint-Lambert-de-Lauzon. [En ligne], (https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/fiche_station.asp?NoStation=023402). Page consultée le 2 mai 2023.
- Choudhury, S., Basak, A., Biswas, S. et Das, J. (2022). Flash Flood Susceptibility Mapping Using GIS-Based AHP Method. Dans *Spatial Modelling of Flood Risk and Flood Hazards* (p. 119-142). Springer, Cham.
- COBARIC. Comité bassin-versant de la rivière Chaudière (2012). Atlas du réseau hydrographique du bassin-versant de la rivière Chaudière. [En ligne]. (https://cobaric.qc.ca/wp-content/uploads/2014/03/AtlasHydro_BVRC.pdf). Page consultée le 19 avril 2023.

- COBARIC. Comité bassin-versant de la rivière Chaudière, (2014). Plan directeur de l'eau du bassin-versant de la rivière Chaudière : Mise à jour 2014 - Portrait, 256 p.
- COBARIC. Comité bassin-versant de la rivière Chaudière, (2023). Inondations sur la rivière Chaudière ; document de vulgarisation destiné au grand public. [En ligne]. (https://cobaric.qc.ca/wp-content/uploads/2023/01/Vulgarisation_inondations-riv-Chaudiere_COBARIC_vfinale-20230120.pdf). Page consultée le 14 décembre 2024.
- COBARIC. Comité bassin-versant de la rivière Chaudière, (2019). Fiche problématique fort débit de pointe. [En ligne]. (https://cobaric.qc.ca/wp-content/uploads/2020/05/2019_fiche_prob%C3%A9matique_Forts-d%C3%A9bits-de-pointe-1.pdf). Page consultée le 23 avril 2023.
- Commission des eaux courantes du Québec (1916). *Cinquième rapport de la commission des eaux courantes du Québec*, [En ligne]. (https://diffusion.mern.gouv.qc.ca/public/Biblio/Perio/142120/Index_1912-1952.pdf). Page consultée le 3 mars 2023.
- Commission des eaux courantes du Québec (1918). *Septième rapport de la commission des eaux courantes du Québec*, [En ligne]. (https://diffusion.mern.gouv.qc.ca/public/Biblio/Perio/142120/Index_1912-1952.pdf). Page consultée le 3 mars 2023.
- Commission des eaux courantes du Québec (1942). *Trente et unième rapport de la commission des eaux courantes du Québec*, [En ligne]. (https://diffusion.mern.gouv.qc.ca/public/Biblio/Perio/142120/Index_1912-1952.pdf). Page consultée le 3 mars 2023.
- Collier, C. G. (2007). Flash flood forecasting: What are the limits of predictability? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(622), 3-23.
- Chauvin, L., Martineau, G., et LaSalle, P., (1985). Deglaciation of the lower St. Lawrence region, Québec. *Geological Society of America*, Special Paper no 197, pp. 111 -124.
- Cheng, J. D., Lin, L. L. et Lu, H. S. (2002). Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. *Forest Ecology and Management*, 18.
- Chin, A. (2003). The geomorphic significance of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, 55(1), 125-137.
- Chitra, C., Alaguraja, P., Ganeshkumri, K., Yuvaraj, D., Manivel, M. (2011). Watershed characteristics of Kundah sub basin using Remote Sensing and GIS techniques. *International journal of geomatics and geosciences volume 2* (1), 311-335.

- Church, M. (2002). Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 47(4), 541-557.
- Costa, J.E. (1983). Paleohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range. *Geological Society of American Bulletin*, vol. 94, p.986-1004.
- Demers, S., Olsen, T., Buffin-Bélangier, T., Marchand, J.-P., Biron, P. M. et 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). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, Volume 8, 67-88.
- Demers S., Massé S., Buffin-Bélangier T. (2017). *Cartographie des aléas fluviaux de la rivière Coaticook : diagnostic, méthodologie et recommandations*. Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis à la MRC de Coaticook et au ministère de la Sécurité publique du Québec.
- Destro, E., Amponsah, W., Nikolopoulos, E. I., Marchi, L., Marra, F., Zocatelli, D. et Borga, M. (2018). Coupled prediction of flash flood response and debris flow occurrence: Application on an alpine extreme flood event. *Journal of Hydrology*, 558, 225-237.
- Douvinet, J. et Delahaye, D. (2010). Caractéristiques des « crues rapides » du nord de la France (Bassin parisien) et risques associés. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 16(1), 73-90.
- En Beauce (2022). Secteur de Saint-Joseph : la route 276 fermée. Récupéré de <https://www.enbeauce.com/actualites/travaux-et-circulation/469591/secteur-de-saint-joseph-la-route-276-est-fermee>. Page consultée le 1^{er} novembre 2023.
- Environnement Canada, (2014). Résumé de la saison des cyclones tropicaux de 2011. [En ligne].(<https://www.ec.gc.ca/ouragans/hurricanes/default.asp?lang=Fr&n=9DE5BAD7-1&wbdisable=true>). Page consultée le 11 mai 2023.
- Environnement Canada (2023). Tendances des changements dans les précipitations basées sur les données ajustées et homogénéisées des stations climatologiques, Station de Beauceville. [En ligne]. (<https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/befc3f91-09d7-4c9f-8b29-7818f3726094>). Page consultée le 3 avril 2023.
- Food and Agriculture Organization (FAO), (1981). *Torrent control terminology*, [En ligne], Rome. (<https://www.fao.org/3/AD076F/AD076f02.htm>).
- Fort, M., Bétard, F. et Arnaud-Fasseta. (2015) *Géomorphologie dynamique et environnement*. Paris : Armand Colin.

- Fortugno, D., Boix-Fayos, C., Bombino, G., Denisi, P., Rubio, J. M. Q., Tamburino, V. et Zema, D. A. (2017). Adjustments in channel morphology due to land-use changes and check dam installation in mountain torrents of Calabria (southern Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2469-2483.
- Gagné, G. Beaudin, I., Leblanc, M., Drouin, A., Veilleux, G., Sylvain J.D., Michaud, A.R. (2013). Classement des séries de sols minéraux du Québec selon les groupes hydrologiques. Rapport final. IRDA, Québec, Canada, 81p. [En ligne]. (https://irda.blob.core.windows.net/media/2133/gagne-et-al-2013_rapport_classement_sols_mineraux_groupes_hydro.pdf). Page consultée le 3 décembre 2023.
- Gagnon, R.M., Pollock D.M. et Sparrow, D.M. (1970). *Conditions météorologiques critiques et crues exceptionnelles des rivières Chaudière et Saint-François*. Rapport présenté au Gouvernement du Québec, ministère des Richesses naturelles, direction générale des eaux, Service de la météorologie.
- Garcia, C., Laronne, J. B. et Sala, M. (2000). Continuous monitoring of bedload flux in a mountain gravel-bed river, *Geomorphology*, 34, 1, 23-31.
- 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 publiée. Lille : Université des Sciences et Technologies de Lille, département de géographie.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., ... Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1-2), 70-78.
- Giorgi, F., Im, E.-S., Coppola, E., Diffenbaugh, N. S., Gao, X. J., Mariotti, L. et Shi, Y. (2011). Higher Hydroclimatic Intensity with Global Warming. *Journal of Climate*, 24(20), 5309-5324.
- Graham, D. J., Rice, S. P. et Reid, I. (2005). A transferable method for the automated grain sizing of river gravels, *Water Resources Research*, 41, 7, 31-39.
- Gunnell, K., Mulligan, M., Francis, R. A. et Hole, D. G. (2019). Evaluating natural infrastructure for flood management within the watersheds of selected global cities. *Science of The Total Environment*, 670, 411-424.
- Grenier, F. (2005). 1773 à aujourd'hui : catastrophes hydrologiques en Beauce. *Cap-aux-Diamants : la revue d'histoire du Québec*, (82), 14-19.

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2012). Résumé à l'intention des décideurs, in C.B. Field et al. (dir.) *Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique - Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Cambridge : Cambridge University Press, p. 1-20.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2023). *Changements climatiques 2023 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).
- Giorgi, F., Im, E.-S., Coppola, E., Diffenbaugh, N. S., Gao, X. J., Mariotti, L. et Shi, Y. (2011). Higher Hydroclimatic Intensity with Global Warming. *Journal of Climate*, 24(20), 5309-5324.
- Glade T., (2005). Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. *Geomorphology*, vol. 66, 189-213.
- Gouvernement du Canada (s.d.). Base de données canadiennes sur les catastrophes. [En ligne]. (<https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/1c3d15f9-9cfa-4010-8462-0d67e493d9b9>). Page consultée le 4 avril 2023.
- Hallegatte, S., Ranger, N., Bhattacharya, S., Bachu, M., Priya, S., Dhore, K., Rafique, F., Mathur, P., Naville, N., Henriët, F., Patwardhan, A., Narayanan, K., Ghosh, S., Karmakar, S., Patnaik, U., Abhayankar, A., Pohit, S., Corfee-Morlot, J. et Herweijer, C. (2010). Flood Risks, Climate Change Impacts and Adaptation Benefits in Mumbai: An Initial Assessment of Socio-Economic Consequences of Present and Climate Change Induced Flood Risks and of Possible Adaptation Options. *OECD, Environment working papers*, 1-62.
- Hamelin, L.-E. (1958). Observations concernant les crues de la Chaudière (Canada). *Cahiers de géographie du Québec*, 2(4), 217-231.
- Harvey, A. M. (1991). The influence of sediment supply on the channel morphology of upland streams: Howgill Fells, Northwest England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(7), 675-684.
- Harvey, A. M. (1996). The Role of Alluvial Fans in the Mountain Fluvial Systems of Southeast Spain: Implications of Climatic Change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(6), 543-553.

- Hassan, M. A., Church, M., Lisle, T. E., Brardinoni, F. et Benda, L. (2005). Sediment transport and channel morphology of small, forested streams. *Journal of the American Water Resources Association*, (04072), 24.
- Hinojos, S., McPhillips, L., Stempel, P. et Grady, C. (2023). Social and environmental vulnerability to flooding: Investigating cross-scale hypotheses. *Applied Geography*, 157, 103017.
- Horton, R. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins ; Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275-370.
- Hugues, T.J., (1987). Ice dynamics and deglaciation models when ice sheet collapsed, In: Ruddiman, W.F., et Wright, H.E., dir.. *North America and Adjacent Oceans During the Last Deglaciation* (p. 183 220). Geological Society of America.
- Hungr, O., Morgan, G. C. et Kellerhals, R. (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(4), 663-677.
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), (2014). Inondations : guide d'intervention à l'intention des intervenants de santé environnementale, [En ligne], Québec. (https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/1956_inondations_guide_intervention.pdf). Page consultée le 2 septembre 2023.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, Cambridge : Cambridge University Press, p. 1-36.
- Institut national de santé publique (2014). *Inondations : guide d'intervention à l'intention des intervenants de santé environnementale*, [En ligne], Québec. (https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/1956_inondations_guide_intervention.pdf). Page consultée le 2 septembre 2023.
- Jones, N.K. (1998). A recent history of flooding in the Massawippi drainage basin. *Journal of Eastern Townships studies*, 13, p.41.
- Juneau, P. (2020). *Discrimination statistique quant à l'occurrence de cônes alluviaux à l'embouchure des tributaires de la rivière chaudière en Beauce*, mémoire de maîtrise non-publié. Montréal : Université du Québec à Montréal, Département de géographie.
- Keiler, M., Knight, J. et Harrison, S. (2010). Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1919), 2461-2479.

- Kouedjou, I. et Robert, A.B. (2021). Analyse morphométrique du bassin-versant de la Menoua pour une meilleure gestion des risques morphohydrologiques. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 12(5), p. 189-197.
- Laigle, D. (2015). Érosion et crues torrentielles, dans F. Naaim-Bouvet et D. Richard (dir.), *Les risques naturels en montagne*, Versailles Cedex : Édition Quae, p.237-302.
- La Presse (2011). Le Québec se remet d'Irène, 36 000 foyers sans électricité. *La Presse*. Récupéré de <https://www.lapresse.ca/international/dossiers/ouragan-irene/201108/29/01-4429894-le-quebec-se-remet-direne-36-000-foyers-sans-electricite.php>. Page consultée le 24 janvier 2023.
- Langbein, W. B. (1947). Topographic characteristics of drainage basins, In Wrather et al. (dir.) *Topographic characteristics of drainage basins*, Washington : United States Government Printing Office, p. 125-157.
- Leconte, Robert (2019). Le québec récemment frappé par les crues extrêmes: une manifestation des changements climatiques? *Le Climatoscope*, 1, 40-45.
- Le Devoir (1988). La pluie fait des ravages en Beauce. Récupéré de <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2761767?docsearchtext=inondation%20torrentielle%20beauce>. Page consultée le 1^{er} novembre 2024.
- Le Devoir (1990). Les inondations ont causé pour 5,8 millions \$ de dommages dans la région de Saint-Georges. Récupéré de https://diffusion.banq.qc.ca/pdfjs-1.6.210-dist_banq/web/pdf.php/X8TJfnhIAZmMFGRNqxeVfA.pdf#page=2. Page consultée le 1 novembre 2023.
- Le Soleil (1971, 30 août). Pluies diluviennes et dégâts innombrables. Récupéré de <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3466760>. Page consultée le 23 novembre 2022.
- Le Soleil (1976, 13 juillet). Les pluies provoquent des désastres dans les régions. Récupéré de <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2721804>. Page consultée le 23 novembre 2022.
- Le Soleil (2011). La capitale n'a pas été épargé par Irène. Récupéré de <https://www.lesoleil.com/2011/08/29/la-capitale-napas-ete-epargnee-par-irene-fffef3e8b69ebee15a046fe375dded21/>. Page consultée le 12 décembre 2022.
- Liébault, F. (2003). *Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies)*, thèse de doctorat. Lyon : Université Lumière, département de géographie.

- Liébault, F., Gomez, B., Page, M., Marden, M., Peacock, D., Richard, D. et Trotter, C. M. (2005). Land-use change, sediment production and channel response in upland regions, *River Research and Applications*, 21, 7, 739-756.
- Liébault, F., Peteuil, C. et Remaître, A. (2010). Approches géomorphologiques de la production sédimentaire des torrents. *Sciences Eaux & Territoires*, (2), 128-135.
- Lyons, J. K. et Beschta, R. L. (1983). Land use, floods, and channel changes: Upper Middle Fork Willamette River, Oregon (1936–1980). *Water Resources Research*, 19(2), 463-471.
- Mailhot, A., Bolduc, S. et Talbot, G. (2018). Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques, Rapport final, [En ligne]. Récupéré de <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1220191.pdf>. Page consultée le 1^{er} mai 2023.
- Mao, L., Cavalli, M., Comiti, F., Marchi, L., Lenzi, M. A. et Arattano, M. (2009). Sediment transfer processes in two Alpine catchments of contrasting morphological settings. *Journal of Hydrology*, 364(1-2), 88-98.
- Mayer-Jouanjan I., Bleau N. (2018). *Historique des sinistres d'inondations et d'étiages et des conditions météorologiques associées*. Rapport présenté à Environnement et Changement climatique Canada, au Gouvernement du Québec et à Ouranos. Montréal: Ouranos. 42p.
- Marchi, L., Cavalli, M., Sangati, M. et Borga, M. (2009). Hydrometeorological controls and erosive response of an extreme alpine debris flow. *Hydrological Processes*, 23(19), 2714-2727.
- Melton, M. A. (1958). Correlation Structure of Morphometric Properties of Drainage Systems and Their Controlling Agents. *The Journal of Geology*, 66(4), 442-460.
- Meunier, M. (1989). Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche*, 75(5), 361-376.
- Miao, Q., Yang, D., Yang, H. et Li, Z. (2016). Establishing a rainfall threshold for flash flood warnings in China's mountainous areas based on a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 541, 371-386.
- MELCCFP. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (2023a). *Conservation des milieux humides et hydriques*, [En ligne]. (<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/milieuxhumides.htm#:~:text=Les%>)

20milieux% 20humides% 20et% 20hydriques% 20jouent% 20aussi% 20un% 20r% C3%B4le% 20de,eau% 20et% 20filtre% 20la% 20pollution). Page consulté le 4 juin 2023.

MELCCFP. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (2023b). Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec. [En ligne]. (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/bassins-hydrographiques-multi-echelles-du-quebec>). Page consultée le 16 septembre 2024.

MELCCFP. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (2024). Atlas hydroclimatique de Québec méridional. [En ligne]. (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/index.htm>). Page consultée le 4 mai 2024.

MSPC. Ministère de la sécurité publique Canada, (2020). Base de données canadienne sur les catastrophes.[En ligne]. (<https://bdc.securitepublique.gc.ca/srchpg-fra.aspx>). Page consultée le 3 septembre 2024.

Montgomery, D. R. et Dietrich, W. E. (1995). Hydrologic Processes in a Low-Gradient Source Area. *Water Resources Research*, 31(1), 1-10.

Montgomery, D. R. et Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 16.

Montgomery, D. R. et Buffington, J. M. (1998). Channel Processes, Classification and Response, Dans Naiman, R.J. et Bilby R.E. (dir.) *River Ecology and Management*, Berlin : Springer, p.13-38.

MSPQ. Ministère de la sécurité publique du Québec (2024). Événements de sécurité civile. [En ligne]. (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/evenements-de-securite-civile>). Page consultée le 14 avril 2023.

Muller, S. D., David, F. et Wicha, S. (2002). Impact de l'exposition des versants et de l'anthropisation sur la dynamique forestière dans les Alpes du Sud (France). *Géographie physique et Quaternaire*, 54(2), 231-243.

Naaim-Bouvet, F. et Richard, D. (2015). *Les risques naturels en montagne*. Éditions Quae.

Neboit-Guilhot, R. (2010) *L'homme et l'érosion*. Clermont-Ferrand : Presses universitaires Blaise Pascal.

Newson, M. D. (1978). Drainage basin characteristics, their selection, derivation and analysis for a flood study of the British isles. *Earth Surface Processes*, 3(3), 277-293.

- Niño, Y., García, M. et Ayala, L. (1994). Gravel saltation: 1. Experiments, *Water Resources Research*, 30, 6, 1907-1914.
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E. et Anquetin, S. (2008). Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 362(3-4), 274-290.
- Obeidat, M., Awawdeh, M. et Al-Hantouli, F. (2021). Morphometric analysis and prioritisation of watersheds for flood risk management in Wadi Easal Basin (WEB), Jordan, using geospatial technologies. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2), 12-26.
- Ouranos (2015a). Base de données AQUARISQ. [En ligne]. (<https://aquarisc.ouranos.ca/>). Page consultée le 3 mars 2023.
- Ouranos (2015b). Vers l'adaptation - Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec - Édition 2015. Montréal : Ouranos.
- Palucis, M. C. et Lamb, M. P. (2017). What controls channel form in steep mountain streams? *Geophysical Research Letters*, 44(14), 7245-7255.
- Pande, C. B. et Moharir, K. (2017). GIS based quantitative morphometric analysis and its consequences: a case study from Shanur River Basin, Maharashtra India. *Applied Water Science*, 7(2), 861-871.
- Patel, P., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Garg, V., Dhote, P. R., Nikam, B. R., Swain, S. et Al-Ansari, N. (2022). Revisiting 2013 Uttarakhand flash floods through hydrological evaluation of precipitation data sources and morphometric prioritization. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 646-666.
- Patrimoine Beauceville (s.d.). La tristement célèbre inondation de 1957. [En ligne]. (<https://www.patrimoine-beauceville.ca/la-tristement-celebre-inondation-de-1957>). Page consultée le 1^{er} décembre 2022.
- Patton, P. C. et Baker, V. R. (1976). Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12(5), 941-952.
- Piton, G., Philippe, F., Richard, D. et Tacnet, J.-M. (2018). *Analyse comparative des méthodes dites « multicritère » dans le contexte torrentiel*. Rapport de phase 1: Caractérisation des phénomènes torrentiels pour le Commissariat général au développement durable (CGDD).

- Planton, S., Déqué, M., Douville, H. et Spagnoli, B. (2005). Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1-2), 193-202.
- Pratte, A. (2008). *Relations entre variables morphométriques et données hydrogéologiques, bassins-versants des rivières Châteauguay et Beaurivage, Québec*, mémoire de maîtrise publié. Québec : Université Laval, Faculté des études supérieures. [En ligne]. (<https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/QQLA/TC-QQLA-25162.pdf>). Page consulté le 10 juin 2023.
- Quefféléan, Y., Carladous, S., Piton, G., Kuss, D., Fouquet, M. et Tourment, R. (2019). *Spécificités des systèmes d'endiguement et de l'analyse de risque en contexte torrentiel*. Communications dans le cadre de Dignes Maritimes et Fluviales et Protection contre les Inondations, 2019, le 8 mars à Grenoble, p. 2-11.
- Quilbé, R., Rousseau, A. N., Moquet, J.-S., Savary, S., Ricard, S. et Garbouj, M. S. (2008). Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(1), 101-110.
- Radio-Canada (2006). Beaucoup de dommages en Beauce. Récupéré de <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/326544/inondation>. Consulté le 2 juin 2023.
- Radio-Canada, (2011). Irène laisse sa place en Chaudière-Appalaches. Récupéré de <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/528765/tempete-degats-quebec>. Consulté le 12 janvier 2023.
- Recking, A., Richard, D., Degoutte, G., (2012) *Torrents et rivières de montagne dynamique et aménagement*. Versailles Cedex : Éditions Quae.
- Rey, F., Ballais, J.-L., Marre, A. et Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geoscience*, 336(11), 991-998.
- Richard, D., (1997). Crues torrentielles ou crues des torrents ? *Risques Infos no8*, [En ligne]. (http://www.irma-grenoble.com/PDF/risques_infos/N08/article02.pdf). Consulté le 1 novembre 2021.
- Rodriguez-Morata, C., Ballesteros-Cánovas, J. A., Trappmann, D., Beniston, M. et Stoffel, M. (2016). Regional reconstruction of flash flood history in the Guadarrama range (Central System, Spain). *Science of The Total Environment*, 550, 406-417.
- Saint-Laurent, D. & Hähni, M. (2008). Crues et inondations majeures des villes de l'Estrie : variations climatiques et modifications anthropiques (Québec, Canada). *Environnement Urbain / Urban Environment*, 2, 50-72.

- Schumm SA. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society American Bulletin*, 67(5), 597–646.
- Schumm, S.A. (1977). *The fluvial system*. New York : Édition John Wiley and Sons.
- Sécurité publique Canada, (2022). *Inondations*, [En ligne]. (<https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/mrgnc-mngmnt/ntrl-hzrds/fld-fr.aspx>). Page consultée le 3 juin 2023.
- Shawky, M. et Hassan, Q. K. (2023). Geospatial Modeling Based-Multi-Criteria Decision-Making for Flash Flood Susceptibility Zonation in an Arid Area. *Remote Sensing*, 15(10), 2561.
- Smith, K. G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*, 248(9), 655-668.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *GSA Bulletin*, 63(11), 1117-1142.
- Surell, A. (1841). *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes*. Paris : Carilian-Goeury et V. Delmont.
- TecSult (1994) Étude de modélisation du bassin-versant de la rivière Chaudière – rapport final. 132 p.
- Theler, D. (2010). *Contribution à la cartographie géomorphologique de la dynamique sédimentaire des petits bassins-versants torrentiels*, thèse de doctorat. Lausanne : Université de Lausanne, département de géographie.
- Thenard, L. (2009). *Torrents et torrentialité dans la vallée de la Guisane - Contribution d'une étude géographique à la gestion durable du risque torrentiel à Serre-Chevalier*, thèse de doctorat. Lille : Université des Sciences et Technologies de Lille, département de géographie.
- Thibault, G., (2008). *État de l'écosystème aquatique du bassin-versant de la rivière Chaudière : faits saillants 2004-2006*. Québec : ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 25 p.
- Trenhaile, Alan S. (2010). *Geomorphology, A Canadian Perspective*. Oxford (Ontario) : Oxford University Press Canada.
- Triquet, C. (1965). *Plan d'ensemble des travaux remédiateurs de la rivière Chaudière - Contrôle des inondations à la débâcle – Annexe*, [En ligne].

- (<https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2989056>) Page consultee le 18 janvier 2025.
- Tucker, C. (2000). *Floods in Canada: An emergency preparedness Canada (EPC) perspective*, 28, 75-87.
- Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A. et Bras, R. L. (2001). Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology*, 36(3-4), 187-202.
- Valadas, B. (2004). *Géomorphologie dynamique*. Paris : Édition Colin.
- Verstappen, H. T. (1989). Geomorphology, natural disasters and global change. *Geomorphology, natural disasters and global change*, (3-4), 159-164.
- Veyret, Y., Beucher, S. et Bonnard, J.-Y. (2005). Risques naturels et territoires (Natural hazards and territories). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 82(1), 63-74.
- Ville de Sainte-Marie (2023). Suivi des grands projets municipaux ; planification et orientation. [En ligne]. (<https://www.sainte-marie.ca/2022/06/suivi-des-grands-projets-municipaux-planification-et-orientation/>). Page consultée le 16 décembre 2024.
- Wicht, M. et Osinska-Skotak, K. (2016). Identifying urban areas prone to flash floods using GIS – preliminary results. *Hydrology and Earth System Sciences*, 518, 3-22.
- Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C. et Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1(1), 61-66.
- Wohl, E. E. (2000). *Mountain Rivers*. Washington : American Geophysical Union.
- Wohl, E. et Merritt, D. (2005). Prediction of mountain stream morphology, *Water Resources Research*, 41, 8.
- Wohl, E. (2006). Human impacts to mountain streams. *Geomorphology*, 79(3), 217-248.
- Younis, J., Anquetin, S. et Thielen, J. (2008). The benefit of high-resolution operational weather forecasts for flash flood warning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(4), 1039-1051.
- Youssef, A. M., Pradhan, B. et Hassan, A. M. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences*, 62(3), 611-623.

Zhang, W., Villarini¹ G., Vecchi, G. et Smith, G. (2018). Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston. *Nature*, 563, p. 384-389.