

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DISCRIMINATION STATISTIQUE QUANT À L'OCCURRENCE DE CÔNES
ALLUVIAUX À L'EMBOUCHURE DES TRIBUTAIRES DE LA RIVIÈRE
CHAUDIÈRE EN BEAUCE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAITRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

PHILIPPE JUNEAU

MARS 2020

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.10-2015). 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

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'aide de plusieurs personnes. Tout d'abord, Daniel Germain, mon directeur, qui a pris le temps de m'accompagner dans toutes les étapes de ce mémoire, de son élaboration à sa rédaction en passant par le terrain et de nombreux échanges. Ta passion pour la géomorphologie a été contagieuse, et ce, dès le premier cycle. Merci également aux nombreux autres enseignant(e)s (Michelle, Mario, Étienne, Robert-André) et chargé(e)s de cours (Geneviève, Imad, JP) du département qui m'ont transmis leur passion pour la géographie.

Merci à mes parents et mes soeurs, qui m'ont toujours poussé à aller plus loin et à terminer ce que je commençais.

Merci à mes camarades du département, Arianne, Ludwig, Jérôme, Gabriel, Catherine et Francis. J'ose croire qu'on a su avoir du plaisir tout en faisant de la science (ou du Hula, c'est selon). Je n'aurais jamais pu avancer, intellectuellement et mathématiquement parlant, sans l'aide du Dr. Martin. Jean-Philippe, tu y es pour beaucoup.

Finalement, merci à mon amoureuse Anne Julie et mes garçons d'avoir été si patients à travers ce long processus. Vous êtes la raison pour laquelle j'ai fini par finir.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
RÉSUMÉ	ix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I Revue de la littérature.....	5
1.1 Concepts de base en géomorphologie fluviale.....	5
1.1.1 Le cycle hydrologique et ses composantes.....	9
1.1.2 Le bassin versant	10
1.2 La dynamique sédimentaire	13
1.2.1 La triade érosion – transport – sédimentation.....	13
1.2.2 La connectivité sédimentaire	17
1.2.3 Les cônes alluviaux	21
CHAPITRE II Région et site d'étude	23
2.1 Contexte biophysique	23
2.2 Occupation du sol.....	27
2.3 La rivière Chaudière	27
2.4 La région d'étude.....	29
CHAPITRE III Méthodologie.....	30
3.1 Découpage des bassins versants et analyses morphométriques.....	30
3.2 Géomorphologie des cônes alluviaux.....	35
3.3 Analyses et traitements statistiques	36
3.4 Rééchantillonnage statistique (Bootstrap)	37

CHAPITRE IV Résultats	39
4.1 Les affluents de la rivière Chaudière et leur bassin versant.....	39
4.2 Géomorphologie des cônes alluviaux	42
4.3 Traitements statistiques.....	49
4.3.1 Comparaison de la distribution des paramètres morphométriques.....	51
4.3.2 Les courbes hypsométriques.....	53
4.3.3 Analyse des variables qualitatives	55
4.4 Discrimination statistique des bassins versants avec ou sans un cône alluvial..	56
4.4.1 Régressions logistiques.....	56
4.4.2 Analyse par composantes principales (PCA).....	57
4.4.3 Les arbres de classification et de régression (CART).....	60
4.4.4 Analyse discriminante linéaire (LDA)	61
CHAPITRE V Discussion.....	63
5.1 Caractéristiques et fonctionnement des cônes alluviaux	63
5.2 Discrimination à l'échelle des bassins versants	69
5.2.1 Rééchantillonnage statistique (Bootstrap)	70
5.3 La connectivité sédimentaire à l'échelle de la rivière Chaudière.....	72
CONCLUSION	75
ANNEXE A Données utilisées pour les analyses statistiques	77
BIBLIOGRAPHIE.....	83

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1: Cadre conceptuel de la sensibilité des rivières dans le temps et l'espace (Fryis, 2016)	8
Figure 1.2: Diagramme de Hjulström (1935). Adapté par Charlton (2007)	15
Figure 1.3: L'accumulation sédimentaire et sa connectivité au sein d'un même système selon Bracken <i>et coll.</i> (2014)	19
Figure 2.1: Localisation du bassin versant de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014)	24
Figure 2.2: Bassin versant de la rivière Chaudière et sa subdivision en trois sections (COBARIC, 2014)	26
Figure 2.3: Profil topographique longitudinal de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014)	29
Figure 4.1: Cartographie et délimitation des 142 bassins versants associés aux tributaires de la rivière Chaudière	41
Figure 4.2: Exemples de cônes alluviaux situés à l'embouchure de tributaires de la rivière Chaudière : Savoie (A), Vallé (B), Chassé (C), Nadeau et Lessard (D), Bélair (E) et Carter (F). Source : Google Earth (2015)	43
Figure 4.3: Chenal actif (à gauche) et inactif (à droite) sur les cônes des rivières Pouliot et Des Fermes. Les photographies ont été prises en période d'étiage	44
Figure 4.4: Caractérisation granulométrique des 10 cônes alluviaux échantillonnés selon la classification de Blott et Pye (2012)	46

Figure 4.5: Orientation des cailloux (axe A) mesurés dans le ruisseau Pouliot (moyenne de 75°) et la rivière des Plantes (moyenne de 97°)	47
Figure 4.6: Longueur des 100 plus gros blocs mesurés sur chacun des 10 cônes alluviaux échantillonnés. Sont représentés la médiane, le premier et troisième quartile ainsi que le minimum et le maximum.....	48
Figure 4.7: Exemple de blocs trouvés sur le cône du ruisseau Cliche.....	49
Figure 4.8: Comparaison de la distribution des bassins versants avec ou sans cône alluvial pour les paramètres morphométriques de l'aire et du produit de l'aire et de la pente	52
Figure 4.9: Comparaison des hypsométries intégrales pour les bassins versants situés sur les rives Est (noir) et Ouest (gris) de la rivière Chaudière	54
Figure 4.10: Comparaison des hypsométries intégrales moyennes pour les bassins versants avec (noir) et sans (gris) un cône alluvial	55
Figure 4.11: Représentation graphique des données selon la PC1 et la PC2.....	59
Figure 4.12: Arbre de régression.	61
Figure 5.1: Observation d'argile en dessiccation dans la partie distale d'un cône alluvial et un chenal récemment actif.....	65
Figure 5.2: Photographies aériennes des exutoires des ruisseaux Cliche (au Nord-Ouest) et Pouliot (au Sud-Est)	66
Figure 5.3: Précipitations annuelles maximales selon les données issues de la station météorologique d'Environnement Canada (2019) à Vallée-Jonction selon différents pas de temps (24h, 48h, 72h, 5 jours et 10 jours)	67
Figure 5.4: Comparaison de la performance des approches statistiques utilisées quant à la discrimination des bassins versants avec ou sans un cône alluvial à leur jonction avec la rivière Chaudière.....	71

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1: Définitions de la géomorphologie fluviale selon différents auteurs. Tiré de Goudie (2003).....	6
Tableau 1.2: Synthèse des caractéristiques géomorphologiques des différents processus d'écoulement sur les cônes alluviaux. Tiré de Jobin (2019).....	12
Tableau 2.1: Débits de la rivière Chaudière.....	27
Tableau 3.1: Variables morphométriques des bassins versants	32
Tableau 4.1: Répartition géographique des bassins versants et des cônes alluviaux au long de la rivière Chaudière	40
Tableau 4.2: Dimension des bassins versants et des cônes alluviaux échantillonnés sur le terrain	42
Tableau 4.3: Granulométrie des cônes alluviaux échantillonnés dans la Moyenne-Chaudière	45
Tableau 4.4: Matrice de corrélation des variables caractérisant les 142 bassins versants	50
Tableau 4.5: Principales variables morphométriques des bassins versants selon les trois secteurs de la rivière Chaudière	51
Tableau 4.6: Valeurs p obtenues par le test de Wilcoxon pour la comparaison des bassins versants avec ou sans un cône alluvial	53
Tableau 4.7: Tableau de contingence de la présence de cônes alluviaux et du taux d'anthropisation des bassins versants	56

Tableau 4.8: Variables significatives des régressions logistiques avec le taux d'anthropisation des bassins versants et la présence de cônes alluviaux.....	57
Tableau 4.9: Résultat de l'analyse par composantes principales et les valeurs obtenues pour les différentes PC	58
Tableau 4.10: Tableau de contingence des résultats de la LDA	62
Tableau 5.1: Périodes de retour calculées pour les épisodes de précipitations de juin 1984 et 2011	66
Tableau 5.2: Performance de chacune des approches statistiques utilisées.....	71

RÉSUMÉ

La rivière Chaudière, important tributaire du fleuve Saint-Laurent, est parsemée de nombreux cônes alluviaux à la jonction avec plusieurs de ses affluents. Ces derniers peuvent poser certains problèmes dont une pression érosive accentuée sur la rive opposée et une diminution du libre écoulement des glaces, augmentant ainsi le risque d'embâcle sur la rivière Chaudière. La mise en place de ces cônes alluviaux est conditionnée par le débit des tributaires, la disponibilité sédimentaire et les aléas météorologiques. L'augmentation prévue de l'intensité des épisodes de précipitations dans le contexte des changements climatiques porte à croire que l'activité géomorphologique de ces cônes pourrait s'accroître. Le présent mémoire s'intéresse aux causes de ce phénomène. Pour y parvenir, 142 bassins versants ont été délimités et caractérisés avec plusieurs variables morphométriques. De nombreux cônes ont aussi été analysés d'un point de vue géomorphologique. À partir des données obtenues, plusieurs analyses statistiques ont été réalisées dans la perspective d'une part, identifier les caractéristiques morphométriques responsables de la mise en place des cônes alluviaux et, d'autre part, afin de discriminer les bassins versants associés aux tributaires de la rivière Chaudière avec ou sans un cône alluvial. Les résultats montrent que le relief, l'aire et l'anthropisation sont des facteurs importants dans la dynamique sédimentaire à l'embouchure des cours d'eau. Cette étude se veut aussi une première ouverture à l'analyse de la connectivité sédimentaire au sein d'un important bassin versant au Québec, soit celui de la rivière Chaudière.

Mots clés : Cônes alluviaux – Connectivité sédimentaire – Géomorphologie fluviale – Rivière Chaudière

INTRODUCTION

L'eau, agent d'érosion, de transport et de déposition est au cœur de nombreux processus géomorphologiques. D'ailleurs, une part importante de l'évolution du paysage à différentes échelles de temps et d'espace est souvent expliquée par le transport fluvial des sédiments. Les impacts de l'eau comme agent géomorphologique sont généralement appréhendés à l'échelle du bassin versant, notion essentielle à une compréhension exhaustive des dynamiques fluviales. En effet, le style fluvial, le débit d'un cours d'eau et le transport de sédiments sont tous tributaires des caractéristiques du bassin versant (Lord *et coll.*, 2009). Schumm (1977) présente d'ailleurs le bassin versant comme une zone de production, où les précipitations génèrent de l'érosion et du transport de sédiments, pour ultimement les acheminer vers l'exutoire.

Plus de 20% du territoire québécois est recouvert d'eau, dont 36% se drainent vers le fleuve Saint-Laurent (Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques-MDDELCC, 2018). Cela correspond à des dizaines de milliers de cours d'eau parcourant quelques millions de kilomètres (MDDELCC, 2018). Couplé au fait qu'une grande partie de la population québécoise réside à proximité d'un cours d'eau, il ne fait aucun doute que la géomorphologie fluviale est primordiale au vu des nombreux citoyens exposés aux risques d'inondations et d'embâcles (Ministère de la Sécurité Publique-MSP, 2018). D'ailleurs, l'augmentation anticipée de la fréquence et l'intensité des épisodes de fortes précipitations associées aux changements climatiques (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat-GIEC, 2014), auront certainement un impact sur les dynamiques hydrologiques à plusieurs échelles (Naylor *et coll.*, 2016). On peut donc s'attendre à une modification dans la fréquence et l'intensité des

processus géomorphologiques et les risques fluviaux associés (MSP, 2018; Ouranos, 2018), grandement régis par le cycle hydrologique, ce qui risque d'entraîner des impacts notables aux niveaux environnemental, social et économique (Fryirs, 2016). Dans cette perspective, l'approche géomorphologique a le potentiel d'analyser les nombreuses dynamiques interscalaires propres aux processus hydrologiques et de prédire les modifications subséquentes sur le paysage (Naylor *et coll.*, 2016).

Le présent mémoire porte sur la connectivité sédimentaire de la rivière Chaudière avec ses affluents, dont plusieurs se caractérisent par la mise en place d'accumulations granulaires, sous la forme de cônes et de bancs alluviaux situés à leur embouchure. D'un point de vue scientifique, l'intérêt de cette recherche réside notamment dans l'absence d'investigation sur la mise en place de ces dépôts alluviaux dans la région de la Beauce. Pourtant, la confluence de cours d'eau est généralement considérée comme un « hotspot » en géomorphologie fluviale avec de nombreuses interactions entre le chenal principal et ses tributaires (Czuba et Fofoula-Georgiou, 2015; Mazgareanu, 2019). Une compréhension de la mise en place de ces dépôts permettra alors de mieux anticiper leurs impacts sur la dynamique fluviale, sachant d'ores et déjà que ceux-ci sont susceptibles de modifier, localement du moins, la morphologie du cours d'eau principal, lui-même bordé d'infrastructures, de résidences et de terres agricoles.

À cet égard, si la présence de bancs alluviaux représente une forme commune, voire généralisée à la confluence des cours d'eau compte tenu d'un apport sédimentaire, les cônes alluviaux relèvent, eux, d'une dynamique géomorphologique plus complexe. En effet, les cônes ont une propension à agir soit en tant que forme d'accumulation, soit en tant que forme d'érosion (Wells et Harvey, 1987; Blair et McPherson, 1994; Ouellet, 2010). En mode d'aggradation, le cône joue alors un rôle de réservoir sédimentaire dissociant le drainage en aval (chenal principal) des sources de sédiments situées en amont (tributaire). À l'inverse, si le cône est incisé sous l'effet

de l'érosion, la continuité est rétablie reliant les sources sédimentaires du tributaire et le réseau de drainage principal (Harvey, 1996). De cette façon, les cônes contrôlent le transport de sédiments dans le système bassin versant – cône – cours d'eau principal, alors qu'ils sont eux-mêmes contrôlés par la dynamique du système en question (Ouellet, 2010).

Si plusieurs des affluents présentent des accumulations granulaires à leur confluence avec la rivière Chaudière, plusieurs autres en sont toutefois dépourvus. Dans ce contexte, il convient de s'interroger à savoir quels sont les facteurs et les caractéristiques morphométriques des bassins versants associés à ces affluents qui sont susceptibles d'expliquer l'apparition ou l'absence des cônes alluviaux. Ceux-ci sont composés pour l'essentiel de graviers et sont facilement observables à de nombreux endroits. Leur présence pourrait s'avérer problématique dans la mesure où l'on connaît mal les interactions qu'ils peuvent avoir avec les embâcles et les secteurs en érosion. En effet, les embâcles de glace font partie intégrante du paysage beauceron, et ces derniers engendrent de nombreux dommages matériels et économiques. Il est donc pertinent de s'intéresser à ce sujet d'autant plus que les cônes alluviaux peuvent occuper, en largeur, près de 80% du lit de la rivière Chaudière, exerçant ainsi une pression considérable sur la rive opposée comme rapportée ailleurs (Harvey, 1997, 2001; Brierley et Fryirs, 1999; Florsheim *et coll.*, 2001, 2004). De plus, ceux-ci pourraient constituer un obstacle physique à la libre circulation des glaces au printemps et lors de redoux (Directeur des Évaluations environnementales, 2004).

Au Québec, après le fleuve Saint-Laurent et la rivière Saint-François, le bassin versant de la rivière Chaudière est le plus sujet aux inondations (Ouranos, 2018). Ce sont près de 240 inondations qui ont été recensées sur le territoire pour la période de 1642 à 2016. À titre d'exemple, de février 2017 à janvier 2018, le Ministère de la Sécurité Publique a dénombré quatre inondations considérables liées à de fortes

précipitations, des périodes de redoux et la formation d'embâcles de glace, le tout ayant mené à l'évacuation de 4000 personnes et à l'inondation de 5300 résidences (MSP, 2018). Ces événements montrent à eux seuls la nécessité d'une meilleure connaissance et compréhension des systèmes fluviaux et ce, particulièrement en contexte de milieu habité.

Bien qu'encore très peu documenté, l'intérêt pour les processus responsables de la mise en place des cônes alluviaux au long de la rivière Chaudière apparaît évident, surtout qu'une majorité de la population beauceronne réside à proximité de cette rivière. Lorsqu'une ville ou une Municipalité régionale de comté (MRC) juge nécessaire d'enlever ces dépôts accumulés dans la rivière Chaudière à l'embouchure de plusieurs de ses tributaires, les opérations peuvent avoir des coûts éloquentes, puisque dans certains cas on parle d'environ 3000 à 3500 voyages de camion (Directeur des Évaluations environnementales, 2004). Dans ce contexte, une meilleure compréhension de la connectivité sédimentaire entre la rivière Chaudière et ses affluents devrait permettre une gestion adaptée et efficace des risques associés, tout en réduisant par le fait même les coûts liés à ces risques.

La présente recherche est donc composée de trois objectifs distincts, mais intimement liés entre eux. Le premier objectif (1) cherche à identifier, délimiter et cartographier les nombreux bassins versants des affluents de la rivière Chaudière et la présence de bancs et de cônes alluviaux, le cas échéant. Le deuxième objectif (2) vise l'acquisition d'un maximum d'information permettant la caractérisation de ces bassins versants et des cônes alluviaux. Finalement, le troisième objectif (3) consiste à identifier si certaines des variables acquises dans le second objectif permettent de discriminer statistiquement les bassins versants avec et sans cônes alluviaux à leur embouchure.

CHAPITRE I REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Concepts de base en géomorphologie fluviale

Les rivières ont longtemps été considérées en tant qu'agent principal d'érosion dans le modèle davisien (Davis, 1923). En effet, suite à la formation de reliefs (orogénèse), ces derniers évoluent graduellement vers une pénéplaine grâce au pouvoir érosif de l'eau abaissant ainsi le relief jusqu'au niveau de base. Au cours des années 1960-70, le domaine de la géomorphologie fluviale s'est transformé avec la conceptualisation et l'étude du bassin versant comme unité géomorphologique de base, tel que proposé par Chorley (1969). Par la suite, une attention particulière a été portée à certains éléments du paysage fluvial tels que le réseau de drainage, les spécificités du bassin versant, les apports sédimentaires, etc. (Grégory, 1976), permettant ainsi une meilleure compréhension des liens entre les formes, les processus géomorphologiques et les styles fluviaux. Le tableau 1.1 présente les principales définitions de la géomorphologie fluviale, s'attardant surtout aux cours d'eau, leur bassin versant et les dynamiques spatiotemporelles en opération.

Tableau 4.1 : Définitions de la géomorphologie fluviale selon différents auteurs. Tiré de Goudie (2003).

Définition	Source
Fluvial geomorphology has as its object of study not only individual channels but also the entire drainage system.	Kruska et Lamarra (1973)
A primary objective of fluvial geomorphology must be to contribute to <i>explanation</i> of relationships among the physical properties of flow in mobile-bed channels, the mechanics of sediment transport driven by the flow, and the alluvial channel forms created by spatially differentiated sediment transport.	Richards (1987)
Geomorphology is the study of Earth surface forms and processes; fluvial phenomena – those related to running water.	Graf (1988)
The study of changing river channels is the domain of fluvial geomorphology. ... Fluvial geomorphology is a field science; classification and description are at the heart of this science.	Petts (1995)
The science that seeks to investigate the complexity of behaviour of river channels at a range of scales from cross sections to catchments; it also seeks to investigate the range of processes and responses over a very long timescale but usually within the most recent climatic cycle.	Newson et Sear (1998)

La géomorphologie fluviale fait référence à la dynamique des rivières, lesquelles ont un rôle essentiel dans la formation et la modification des paysages (Gregory, 2003). La définition retenue dans le présent mémoire est donc la suivante : « *l'étude des*

interactions entre les formes des cours d'eau et leurs processus à des échelles temporelles et spatiales données » (Charlton, 2007, p.26). L'étude des rivières ne se limite donc pas qu'à la géomorphologie et aux sciences de la Terre, mais implique également d'autres domaines d'études dont l'écologie, la biologie, l'ingénierie, l'aménagement du territoire et la gestion des risques. Les changements climatiques en cours et à venir, lesquels modifient déjà le régime des précipitations, sont sources de perturbations pour le milieu fluvial d'où l'intérêt de s'attarder à la capacité des systèmes fluviaux à réagir en conséquence (Schumm, 1991). Il s'agit ici du concept de sensibilité d'une rivière, lequel implique les trois notions suivantes :

- 1) La modification d'un cours d'eau dépend de la force de la perturbation et de la nature du milieu affecté; les dépôts meubles étant plus malléables que le substrat rocheux (Charlton, 2007). Il s'agit d'un rapport de force dynamique entre les contraintes issues d'une perturbation et la capacité du milieu à résister (Downs et Gregory, 1995).
- 2) La probabilité d'occurrence et l'étendue spatiale des changements qui dépendent des seuils propres à chaque élément potentiellement modifiables. L'atteinte de ces seuils varie en fonction des milieux et des agents géomorphologiques en cause (Downs et Gregory, 1995; Fryirs, 2016).
- 3) L'état d'équilibre, soit la capacité d'un système à se rétablir et potentiellement revenir à son état précédent la perturbation (Downs et Gregory 1993, 2004). La modification peut toutefois être d'une ampleur telle que la rivière ne retrouve jamais une forme similaire à celle avant la perturbation.

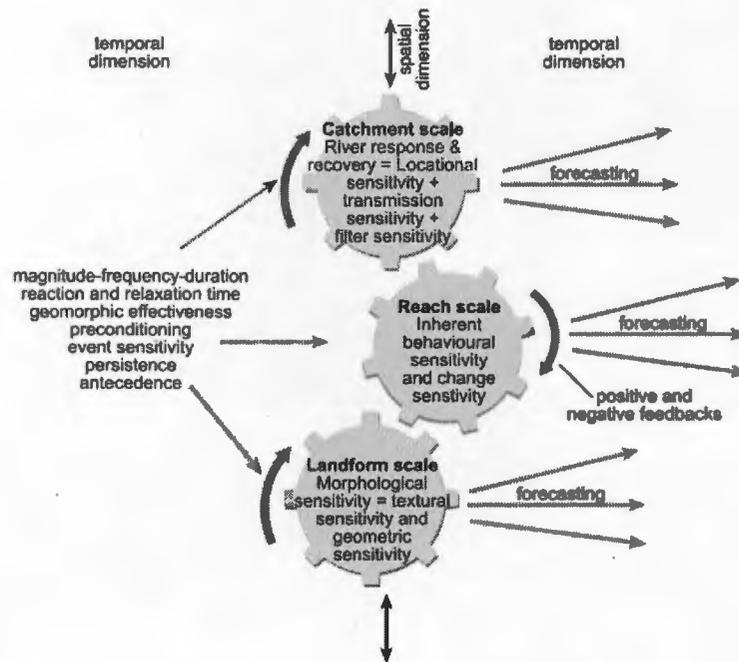


Figure 1.1 : Cadre conceptuel de la sensibilité des rivières dans le temps et l'espace selon Fryis (2016).

La sensibilité morphodynamique d'un paysage dépend de sa composition. Fryis (2016) mentionne qu'un système ayant une grande disponibilité en sable, par exemple, présente un plus grand potentiel de remaniement qu'une même disponibilité en argile et en blocs, tous deux nécessitant une compétence accrue du cours d'eau pour une mise en mouvement des sédiments (Hjulström, 1935). L'identification du potentiel de remaniement sédimentaire à partir des connexions et déconnexions sédimentaires permet d'anticiper, en partie du moins, les modifications à venir à différentes échelles spatiales (paysage, bassin versant, chenal) et temporelles (pluies intenses versus changements climatiques) (figure 1.1). De plus, les seuils à l'origine de ces

modifications géomorphologiques ne représentent pas toujours des valeurs précises (Schumm, 1991), d'où l'importance de déterminer s'il s'agit d'évènements d'une faible fréquence et d'une forte intensité (*pulse disturbance event*) ou d'une modification du paysage s'étalant sur une période relativement longue et d'une intensité moindre (*press disturbance event*) (Fryirs, 2016). En milieu fluvial, ces évènements sont généralement en fonction du cycle hydrologique et des variables qui le composent. L'étude des dynamiques propres à la géomorphologie fluviale ne peut donc être réalisée sans tenir compte du cycle hydrologique et de ses composantes.

1.1.1 Le cycle hydrologique et ses composantes

Le cycle hydrologique est un concept englobant le mouvement de l'eau, sous toutes ses phases, au sein d'un bassin versant. Il s'agit donc de comprendre comment, pourquoi, à quelle vitesse et sous quelle forme l'eau précipite depuis l'atmosphère pour être ensuite partiellement soit interceptée par la végétation, s'évaporer, ruisseler, s'infiltrer, et ainsi parvenir au réseau hydrographique. La pleine compréhension du cycle hydrologique pose toutefois de nombreux défis, à commencer par les difficultés de prévision dans le temps et l'espace des épisodes de fortes précipitations et leurs caractéristiques (durée, intensité) (Borga *et coll.*, 2014). Malgré une connaissance fine du cycle hydrologique pour un bassin versant donné, l'extrapolation de ces connaissances à des échelles spatiales supérieures s'avère encore plus difficile (Cammeraat, 2002).

À titre d'exemple, le couvert végétal et sa nature ont un impact direct sur l'écoulement (Hundecha et Bårdossy, 2004; Liu *et coll.*, 2014). L'interception de la pluie par la végétation diminue la quantité d'eau qui atteint le sol (Bracken *et coll.*, 2007), mais les plantes favorisent aussi l'infiltration de l'eau dans le sol. Le ruissellement de surface s'en trouve donc diminué et le débit à l'exutoire (Kondolf *et*

coll., 2005; Bracken *et coll.*, 2007). La végétation permet aussi la stabilisation des berges et du sol, rétrécissant ainsi parfois la largeur des ruisseaux, alors que les débris forestiers peuvent au contraire obstruer l'écoulement (Zimmerman *et coll.*, 1967, Boivin *et coll.*, 2015). Les zones urbaines et les activités agricoles, notamment l'élevage porcin et bovin, représentent souvent des perturbations géomorphologiques significatives (Trimble et Mendel, 1995) à cause de la diminution du couvert végétal et d'une dénudation accentuée des sols augmentant ainsi l'écoulement de surface et l'érosion (Hundecha et Bårdossy, 2004). Lorsque suffisamment importante, l'érosion peut mener à l'élargissement des cours d'eau à la suite de l'augmentation du débit, mais aussi au comblement sédimentaire de zones plus profondes correspondant souvent à des habitats préférentiels pour les poissons (Magilligan et McDowell, 1997). Enfin, le substrat meuble et la géologie influencent aussi la vitesse d'écoulement, l'infiltration de l'eau, de même que le potentiel d'érosion. L'impact sur l'écoulement dépend de la perméabilité du sol et du sous-sol. Un milieu imperméable favorise une réponse rapide à des précipitations, alors qu'un substrat perméable est caractérisé par une certaine capacité d'infiltration et une réponse plus lente et généralement plus faible sur l'hydrogramme (Charlton, 2007).

1.1.2 Le bassin versant

Un bassin versant est un espace spatialement délimité dans lequel l'eau ruisselle jusqu'à un exutoire unique (Oregon Watershed Assessment Manual, 2004). Il s'agit à la fois d'un outil et d'un objet d'analyse en géomorphologie fluviale. On note toutefois une distinction entre un bassin versant topographique, dont les limites sont déterminées par le relief, et un bassin versant réel dont les limites sont plutôt définies par le substrat et sa perméabilité.

« *Form implies process* » (Kondolf *et coll.*, 2005, p.730). Ces propos s'appliquent à de nombreux aspects de la géomorphologie dont les bassins versants. En montagne, la forme du bassin versant, sa taille et la densité du réseau hydrographique sont des caractéristiques qui déterminent la nature des processus des écoulements dominants (Benda, 2004; Wilford *et coll.*, 2004; Kondolf *et coll.*, 2005). En effet, ces variables déterminent où influent de façon importante sur les processus hydrogéomorphologiques (c.-à-d. écoulement fluvial, écoulement hyperconcentré, coulée de débris) susceptibles de survenir (Wells et Harvey, 1987; Kochel, 1990; Blair, 1999; Wilford *et coll.*, 2004). Ces processus hydrogéomorphologiques se distinguent par leur teneur en sédiments et leurs mécanismes de transport (Beverage et Culbertson, 1964; Pierson et Costa, 1987; Costa, 1988; Wan et Wang, 1994). Le tableau 1.2 présente les caractéristiques propres à chacun des trois processus hydrogéomorphologiques identifiés. Bien que généralement appréhendés comme des processus distincts, ceux-ci se présentent plutôt comme un continuum de caractéristiques de mobilité sédimentaire (Johnson et Rodine, 1984; Costa, 1988; Beaty, 1990; Batalla *et coll.*, 1999; Matthews *et coll.*, 1999). En effet, dans un chenal de drainage, les processus décrits précédemment peuvent survenir de manière subséquente lors d'un seul évènement (Germain et Ouellet, 2013).

Dans cette perspective, plusieurs chercheurs se sont attardés à établir des relations entre les caractéristiques morphométriques des bassins versants et la dynamique géomorphologique associée (Kostaschuk *et coll.*, 1986; Wells et Harvey, 1987, 1999; Wilford *et coll.*, 2004, 2005). Ces travaux ont ainsi permis de montrer qu'il est possible d'identifier le processus hydrogéomorphologique dominant à partir du coefficient de Melton (tableau 1.2), lequel correspond au relief divisé par la racine carrée de l'aire du bassin versant (Melton, 1957 dans Wilford *et coll.*, 2004). Le résultat obtenu, qui varie entre 0 et 1, permet la classification suivante : il s'agit d'écoulements fluviaux (*floods*) lorsque le résultat est plus petit que 0.23, d'écoulements hyperconcentrés (*debris floods*) pour des valeurs comprises entre 0.23

et 0.57 et, des coulées de débris (*debris flows*) lorsque le résultat est plus grand que 0.57. Le coefficient de Melton reflète en quelque sorte la compétence, soit la capacité de transport sédimentaire à partir des caractéristiques morphologiques d'un bassin versant.

Tableau 1.2 : Synthèse des caractéristiques géomorphologiques des différents processus d'écoulement sur les cônes alluviaux. Tiré de Jobin (2019) et adapté de Costa (1988), Lafortune (2003), Ritter *et coll.* (2011) et Germain et Ouellet (2013).

Processus	Sédiment ¹	Morphologie	Sédimentologie
Écoulement fluviatile	0.4 – 20%	Seuils et lobes	Granoclasement inverse
		Chenaux d'érosion	Axe A perpendiculaire au sens de l'écoulement
		Melton < 0.23	Imbrication faible à absente
Écoulement hyperconcentré	20 - 47%	Lobes et cônes	Stratification grossière
		Chenal rectangulaire	Granoclasement inverse ou normal
		Melton 0.23 à 0.57	Faible imbrication
Coulée de débris	47 – 77%	Levés parallèles et lobes	Absence de stratification
		Cônes	Axe A parallèle au sens de l'écoulement
		Melton > 0.57	Granoclasement inverse, normal ou absent
			Imbrication faible à forte

¹ Fait référence à la concentration volumique des sédiments.

À l'intérieur du bassin versant, les caractéristiques physiques du chenal influent aussi sur le transport sédimentaires (Church, 2006), et ce, à travers les variations de styles dans le temps et au long d'un même cours d'eau (Mollard, 1973; Schumm, 1985). La composition du lit et des berges, couplée à la compétence du cours d'eau, déterminent la quantité de matériel susceptible d'être pris en charge. Un chenal confiné aura une plus grande vitesse qu'un lit plus large, de même que la capacité du cours d'eau à déborder sur sa plaine inondable joue un rôle important en période de crue et de fortes pluies (Charlton, 2007). En effet, si le cours d'eau possède un espace suffisant de débordement, son débit sera régulé par ce débordement par comparaison à un cours d'eau dont les terrasses sont très rapprochées, ne permettant pas d'évacuer le surplus d'eau.

1.2 La dynamique sédimentaire

La disponibilité sédimentaire d'un environnement conditionne le travail géomorphologique potentiel d'un ou plusieurs processus à travers l'érosion, le transport et la sédimentation. Cette disponibilité sédimentaire peut être liée à des héritages glaciaires ou à des processus d'altération mécanique et chimique du socle rocheux. L'exposition du substrat ainsi que le couvert végétal jouent donc un rôle important dans la disponibilité et l'abondance des sédiments susceptibles d'être érodés, transportés et ultimement déposés.

1.2.1 La triade érosion – transport – sédimentation

L'érosion du lit d'un cours d'eau se fait de trois façons différentes selon la compétence et la géologie de la rivière. Il s'agit du transport de blocs, de l'abrasion et

de la corrosion (Charlton, 2007). Le transport de blocs nécessite certaines conditions telles que des fractures dans le substrat, lesquelles s'accroissent avec l'abrasion et la corrosion, et un débit suffisant pour soulever le bloc ou la plaque de roche une fois détachée (Hancock *et coll.*, 1998). L'abrasion est l'altération mécanique du lit d'un cours d'eau par les particules transportées qui, à force d'exercer une friction sur un socle ou un bloc, l'érodent. Les chocs entre les grains, les particules grossières et le fond de la rivière causent des irrégularités dans le lit, là où le substrat est déjà affaibli. Ces affaiblissements s'accroissent au fil du temps, menant à la formation de marmites, grandes cavités provenant de la coalescence de petits trous et de leur agrandissement (Charlton, 2007). Finalement, la corrosion est la dissolution du lit de la rivière. Ce dernier type d'érosion dépend grandement de la nature de l'eau, sa concentration en minéraux dissouts, ainsi que la présence d'anfractuosités et de plans d'affaiblissement (Charlton, 2007). Lorsque la rivière s'écoule sur les dépôts meubles, l'érosion est alors conditionnée principalement par la compétence du cours d'eau et la granulométrie des sédiments. À cet égard, la figure 1.2 présente le diagramme de Hjulström (1935) qui permet de visualiser la compétence minimale d'un cours d'eau pour la mise en mouvement des sédiments en fonction de leur taille.

Une fois en mouvement, les particules sont transportées de quatre façons différentes selon la compétence du cours d'eau et la taille des sédiments (Morrow et McConchie, 2010). Certaines particules sont dissoutes (*solution*) dans l'eau lorsqu'elles sont suffisamment fines; la température de l'eau et son taux de saturation jouent un rôle à cet égard. Avec une taille plus grande, les sédiments sont transportés en *suspension*. Ce transport peut se faire sur toute la colonne d'eau. Lorsque les sédiments sont trop gros ou que la compétence du cours d'eau est insuffisante pour les prendre en charge, ceux-ci sont transportés par *saltation* et *traction*, correspondant à des soubresauts ponctuels et du roulement au fond du lit.

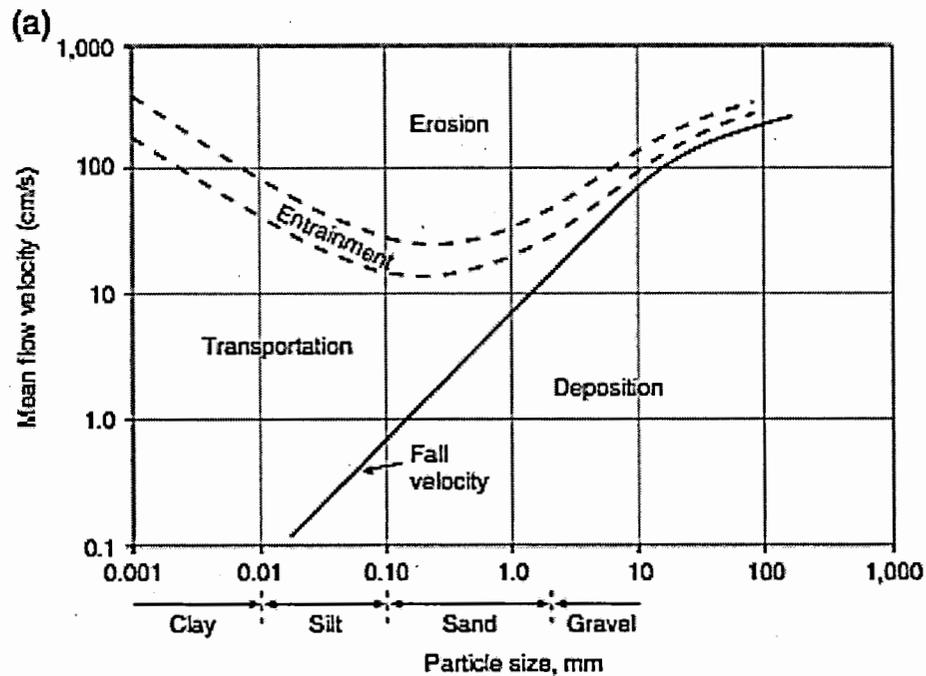


Figure 1.2 : Diagramme de Hjulström (1935). Adapté par Charlton (2007).

La compétence d'un cours d'eau, et donc sa capacité de transport, varie en fonction de la vitesse d'écoulement exprimée comme le débit en fonction de la taille du cours d'eau. Le débit fluctue dans le temps et l'espace car l'eau précipitée sur un bassin versant est en partie interceptée par la végétation et infiltrée dans le sol. Le surplus d'eau peut néanmoins atteindre le cours d'eau de trois façons différentes (Charlton, 2007) : 1) par ruissellement en s'écoulant à la surface même du sol. La vitesse à laquelle cette eau atteint la rivière dépend de la topographie, la rugosité du sol et le couvert végétal; 2) par écoulement hypodermique lorsque l'eau pénètre le sol sans atteindre la zone de saturation et; 3) par écoulement souterrain lorsque l'eau se rend jusqu'à la zone de saturation dans le sol. Ces écoulements, de même que le débit d'une rivière sont aussi influencés par un bon nombre de facteurs biotiques et

abiotiques que sont les caractéristiques du bassin versant, la végétation, l'usage du sol, les types de sols, la géologie et les caractéristiques physiques du chenal (Charlton, 2007; Winkler *et coll.*, 2010).

Lorsque la compétence du cours d'eau diminue, l'érosion et le transport laissent place graduellement à la sédimentation. Celle-ci survient en raison d'un affaiblissement de la pente ou d'un changement de régime hydrologique comme la rencontre d'un tributaire avec le cours d'eau principal (Charlton, 2007). Les dépôts peuvent alors varier d'un petit amoncèlement à des deltas d'une taille kilométrique selon les endroits. On parle alors d'un rapport de débit $Q1/Q2$ où $Q1$ correspond au débit de l'affluent et $Q2$ à celui du cours d'eau principal. En plus des différences de débits, les changements de profondeur et l'angle d'arrivée des tributaires influencent aussi la vitesse et la forme des dépôts à l'exutoire (Best, 1988; Biron *et coll.*, 1993; Benda, 2004; Smith, 2014). Généralement, on note dans les dépôts un granoclassement décroissant de l'amont vers l'aval, c'est-à-dire que les sédiments les plus grossiers sont situés en amont et la taille diminue au fur et à mesure que l'on progresse vers l'aval (Smith, 1974).

Lorsque l'angle d'arrivée du tributaire est relativement grand (autour de 90°) par rapport au cours d'eau principal, une plus grande sédimentation est généralement observable par comparaison à des affluents plus parallèles (Best, 1988; Benda, 2004). L'introduction de nouveaux sédiments, d'une taille variable, dans le cours d'eau principal cause habituellement une augmentation de la taille moyenne des sédiments en aval de la jonction (Curtis *et coll.*, 2010). Ces apports sédimentaires peuvent aussi mener à un profil latéral rétréci du cours d'eau principal (Curtis *et coll.*, 2010). Ces caractéristiques sont toutefois observables lorsque le débit du cours d'eau principal est moindre que celui de l'affluent. Toutefois, comme les hydrosystèmes sont des entités dynamiques dans le temps et l'espace, la pleine compréhension du régime sédimentaire d'un bassin versant ou d'une région demeure complexe. C'est pourquoi

le concept de *connectivité sédimentaire* a été développé, afin de mieux appréhender les dynamiques sédimentaires à plusieurs échelles à la fois.

1.2.2 La connectivité sédimentaire

Hooke (2003) définit le concept de *connectivité sédimentaire* comme le transfert de sédiments d'une zone à une autre et le potentiel d'une particule à se déplacer à travers le système. Selon Bracken *et coll.* (2014), il s'agit du transfert de sédiments provenant de toutes les sources possibles vers les zones de stockages potentielles d'un même système à travers un continuum de processus regroupant l'érosion, le transport et la déposition. Trois sous-concepts définissent la connectivité sédimentaire d'un système :

- 1) La fréquence et l'intensité des épisodes d'érosion et de transport. Ces variables sont dépendantes de la disponibilité sédimentaire, des causes ainsi que de l'intervalle de retour des événements capables d'érosion et de transport.
- 2) La rétroaction spatiale et temporelle entre les épisodes d'érosion et de transport. Ce sous-concept concerne le continuum et la rétroaction entre les processus, comme quoi une attention doit être portée aux modifications des formes ainsi qu'aux entrées (*inputs*) et sorties (*outputs*) de sédiments permettant l'érosion ou le transport.
- 3) Les mécanismes d'érosion et de transport des sédiments et leurs implications dans le flux sédimentaire global. De là, quatre types de flux sont proposés en fonction de la dominance des processus hydrologiques qui, selon les auteurs, augmentent le potentiel d'érosion et la distance sur laquelle une particule peut être transportée : 1) l'érosion et le transport sont dominés par

des processus hydrologiques; 2) l'érosion est dominée par des processus hydrologiques, mais le transport ne l'est pas; 3) l'érosion n'est pas dominée par des processus hydrologiques, mais le transport l'est; 4) l'érosion et le transport ne sont pas dominés par des processus hydrologiques.

La connectivité sédimentaire permet donc d'appréhender un phénomène non pas uniquement selon les résultantes de celui-ci (formes et processus), mais comme un ensemble dont les points de départ sont les finalités d'un autre phénomène et vice-versa (figure 1.3). Selon les paysages à l'étude et l'échelle à laquelle ils sont observés, l'érosion, le transport ou la sédimentation domine en tant que processus. La continuité entre ceux-ci doit alors être établie en fonction des seuils de déclenchement, la relation fréquence-intensité et leur étendue spatiale (Bracken *et coll.*, 2014). Selon Reid *et coll.* (2006), le phénomène à l'étude pourrait être découpé en quatre étapes : 1) l'arrivée de sédiments aux cours d'eau; 2) l'augmentation du débit des cours d'eau; 3) le transport des sédiments et; 4) la déposition de ceux-ci à l'embouchure des affluents d'une rivière.

La présence de zones de stockage sédimentaire complexifie toutefois les choses (Reid *et coll.*, 2006; Fryis 2013; Bracken *et coll.*, 2014). En effet, les sédiments dans ces zones peuvent être repris, mais la période de retour des événements capables de les (re)mettre en mouvement varie selon le cours d'eau, la taille des sédiments et les caractéristiques des zones de stockage. Ainsi, les seuils de précipitations qui permettent une première prise en charge des sédiments vers ces zones de stockage ne sont peut-être pas les mêmes que ceux permettant la reprise des sédiments par le cours d'eau et leur cheminement vers l'exutoire. À cela s'ajoute le fait que ces seuils sont sans doute variables d'un bassin versant à l'autre en fonction de la taille, la pente, le couvert végétal, la saturation du sol, l'intensité et la durée des précipitations reçues, voire parfois même la nature de l'obstacle retenant les sédiments s'il y a lieu (Reid *et coll.*, 2006; Bracken *et coll.*, 2007, 2014).

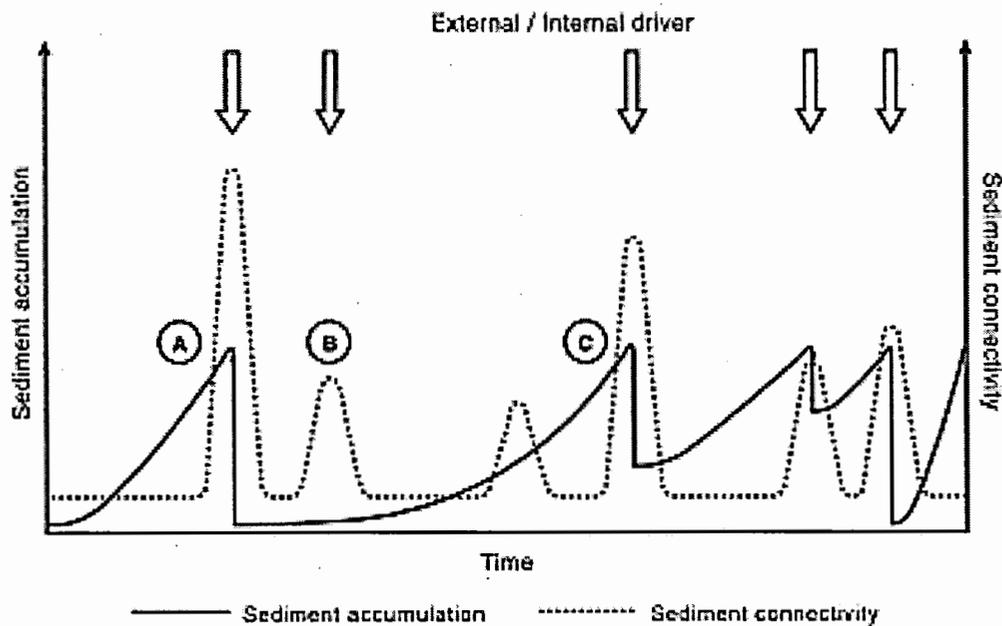


Figure 1.3 : L'accumulation sédimentaire et sa connectivité au sein d'un même système selon Bracken *et coll.* (2014). A, B et C correspondent à des événements pluviométriques ou une rupture d'une zone de stockage. Lors de l'évènement A, l'accumulation de sédiments permet une forte connectivité sédimentaire. L'évènement B survient trop rapidement pour une reprise des sédiments par le cours d'eau à cause d'une recharge sédimentaire insuffisante. À l'inverse, l'évènement C plus décalé dans le temps permet cette reprise des sédiments compte tenu d'une recharge sédimentaire suffisante.

Les cours d'eau agissent comme des courroies de transmission des sédiments entre les lieux d'érosion et les zones de stockage et de sédimentation. La durée variable des sédiments dans ces zones de stockage correspond, selon Fryis (2013), à une rupture dans la connectivité sédimentaire. La vision du transfert de sédiments comme un

continuum intégrant la triade érosion-transport-sédimentation oblige à tenir compte des zones de déconnectivité qui, au fil du temps, peuvent évoluer et permettre la reprise des sédiments (figure 1.3). De plus, le transport et l'érosion des sédiments peuvent être le résultat d'évènements ponctuels liés à un fort débit (précipitations intenses, fonte rapide du couvert nival) ou d'un acheminement continu et graduel par le cours d'eau. Au final, le transport reste toujours dépendant de la disponibilité sédimentaire, d'où la nécessité d'appréhender le phénomène à l'échelle du bassin versant.

Dans cette perspective, la quantification de la production, du transport et du dépôt des sédiments d'une unité géomorphologique à une échelle choisie (Marston et Pearson, 2003), généralement le bassin versant, se définit comme le bilan sédimentaire. Selon Lehre (1982), quatre étapes sont nécessaires à la réalisation d'un bilan sédimentaire : 1) délimiter les frontières de l'unité géomorphologique à quantifier; 2) identifier les sites d'érosion, de transport et de sédimentation ainsi que les liens entre eux; 3) quantifier la contribution de chacun de ces trois processus à travers le temps et l'espace et; 4) comptabiliser la production, l'apport et le stockage des sédiments dans l'unité géomorphologique étudiée. Les dynamiques sédimentaires d'un bassin versant et de ses sous-bassins demeurent toutefois complexes dans le temps et l'espace, et ce niveau de complexité augmente généralement avec la taille et la diversité du paysage. Paysage qui, rappelons-le, sur le plan géomorphologique se modifie en fonction de l'atteinte de conditions critiques définies par des seuils (Schumm, 2003). L'exemple classique d'un seuil, en géomorphologie fluviale, consiste à la compétence nécessaire pour transporter des sédiments d'une taille donnée. Par contre, certaines conditions sont requises pour que le seuil en question modifie le paysage, aussi banal que d'avoir une disponibilité sédimentaire pour la matérialisation de la triade érosion-transport-sédimentation (Schumm, 2003).

1.2.3 Les cônes alluviaux

Les cônes alluviaux sont des formes géomorphologiques ubiquistes de par leur répartition à l'échelle de la planète. On les retrouve généralement à l'interface entre les fronts montagneux et les vallées ou piémonts adjacents, ou à la confluence entre deux cours d'eau, ce qui leur confère une sensibilité particulière aux changements environnementaux (Blair et McPherson, 1994a; Caron Fournier, 2009; Ouellet, 2010). D'une forme semi-circulaire et localisée à la sortie des bassins versants, leur mise en place est liée à la présence d'une source d'eau, une disponibilité sédimentaire, un chenal d'écoulement et un point de rupture de pente qui engendre une perte de compétence (Bull, 1977; Ouellet, 2010). C'est d'ailleurs cette diminution de la capacité de transport qui provoque le dépôts des sédiments sous la forme d'un éventail, radialement dans toutes les directions à partir de l'apex pour atteindre latéralement jusqu'à 180°, puisque l'écoulement n'est plus confiné (Bull, 1977; Rachocki et Church, 1990; Blair et McPherson, 1994, 2009).

Lorsque les cônes sont construits à la confluence de deux cours d'eau, la sédimentation est contrôlée par le débit de l'affluent et son flux sédimentaire (taille et densité), mais surtout par les variations du niveau d'eau du chenal principal (Rachocki and Church, 1990; Blair et McPherson, 2009). Les cônes alluviaux ont généralement un profil transverse convexe (Blair et McPherson, 1994). En revanche, des modifications brutales dans la taille des sédiments de l'amont vers l'aval peuvent engendrer des profils concaves ou segmentés (Bull, 1964; Stock *et coll.*, 2008; Miller *et coll.*, 2014).

Les cônes alluviaux sont particulièrement dynamiques dans le temps et l'espace, et peuvent donc représenter successivement des formes d'accumulation et d'érosion. Dans le premier cas, les apports sédimentaires remplissent le chenal depuis la partie aval du cône vers l'amont. Cette sédimentation provoque une élévation du lit et, ultimement un phénomène d'avulsion, créant ainsi un nouveau chenal (Field, 2001;

Slingerland and Smith, 2004; Sinha, 2009). Cette dynamique cyclique est intrinsèque, c'est-à-dire qu'elle ne nécessite pas de perturbations externes pour survenir (Fraser et DeCelles, 1992). Lorsque le cône est d'une taille suffisante, il est alors possible d'identifier des zones actives et inactives, lesquelles demeurent toutefois transitoires dans le temps (Gómez-Villar et Garcia-Ruiz, 2000). En effet, l'écoulement intermittent du chenal sur le cône et les épisodes diachroniques de transits sédimentaires rendent difficile la pleine compréhension de la dynamique géomorphologique à l'origine de leur genèse. S'ajoutent à cela les changements climatiques en cours, lesquels risquent d'influencer de manière importante le régime hydrologique et sédimentaire des cônes alluviaux avec l'accentuation de la fréquence et l'intensité des précipitations.

CHAPITRE II RÉGION ET SITE D'ÉTUDE

Ce second chapitre s'attarde aux différentes caractéristiques de la région à l'étude, à savoir le territoire du bassin versant de la rivière Chaudière, son portait biophysique de même que les principales occupations du sol.

2.1 Contexte biophysique

La rivière Chaudière est située dans la région hydrographique du sud-est du Saint-Laurent. Elle prend sa source dans la région du lac Mégantic, dans les Appalaches, et se déverse dans le fleuve Saint-Laurent à la hauteur de Lévis. La rivière Chaudière draine un bassin versant qui couvre environ 6700 km² (figure 2.1). Le bassin versant se découpe en trois entités, depuis l'amont vers l'aval (figure 2.2), soit la Haute, la Moyenne et la Basse Chaudière couvrant respectivement 45, 40 et 15% du territoire total du bassin versant (COBARIC, 2014).



Figure 2.1 : Localisation du bassin versant de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014).

Les Appalaches occupent 90% du territoire à l'exception de la portion nord-est située dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (COBARIC, 2014). La géologie de la région est majoritairement composée de roches sédimentaires (94%), principalement des grès et des shales (COBARIC, 2014).

Le bassin versant couvre donc un territoire avec un relief relativement prononcé, allant de 150 m au niveau de la rivière à plus de 500 m pour les reliefs les plus élevés. La région a été fortement remodelée par la dernière glaciation, écimant les sommets et déposant de grandes quantités de sédiments. Les dépôts de surface dans le paysage avoisinant la rivière Chaudière sont variés, bien que la dernière glaciation ait laissé majoritairement du till (Normandeau, 2010; Caron, 2013). Dans le secteur de la Moyenne-Chaudière, la plaine s'étend sur près d'un kilomètre de largeur et l'on retrouve de nombreux épandages fluvioglaciaires et deltaïques sur la rive ouest que traversent de nombreux tributaires (Normandeau 2010).



Figure 2.2 : Bassin versant de la rivière Chaudière et sa subdivision en trois sections; la Haute, la Moyenne et la Basse-Chaudière (COBARIC, 2014).

2.2 Occupation du sol

Les forêts occupent 63,2% du territoire du bassin versant de la rivière Chaudière. Les zones agricoles occupent 32,5% et elles sont principalement réparties de part et d'autre de la rivière. L'élevage est une activité importante dans la région avec 168 000 unités animales sur 82 000 hectares, composé à parts égales de vaches (47%) et de porcs (46%), le reste étant surtout de la volaille (6%). La pollution agricole est d'ailleurs une problématique importante, principalement en ce qui concerne l'industrie porcine, laquelle rejette des tonnes de fumier et leur équivalent en phosphore, minant ainsi la qualité de l'eau et l'intégrité des écosystèmes. Enfin, les quelques zones urbaines ne couvrent que 3,1% du bassin versant. Sur le plan administratif, le territoire est composé de huit MRC et de 93 municipalités, regroupant une population de près de 180 000 habitants (COBARIC, 2014).

2.3 La rivière Chaudière

D'une longueur de 185 km, la rivière Chaudière se caractérise par des débits excessivement variables en fonction des saisons et des crues (tableau 2.1).

Tableau 5.1 : Débits de la rivière Chaudière

Données	¹ Débits (m ³ /s)
Minimum	3
Moyenne annuelle	117
Crue décennale	1677
Crue récurrence 20 ans	1887
Maximum	2354

¹ Débits calculés à partir des données de la station 023402 située à Saint-Lambert-de-Lauzon.

La pente moyenne de la rivière varie selon les sections : 2,5 m/km pour la Haute-Chaudière, 0,5 m/km pour la Moyenne-Chaudière et 3 m/km pour la Basse-Chaudière (COBARIC, 2014). Cette variabilité topographique, couplée aux ouvrages anthropiques (ponts, barrages) et aux intempéries météorologiques qui surviennent dans la région font de la rivière Chaudière un cours d'eau très dynamique. Comme l'indique la figure 2.3, le passage d'une pente forte en Haute-Chaudière à une pente faible en Moyenne-Chaudière augmente considérablement le risque d'inondation et la formation d'embâcles de glace dans ce secteur (COBARIC, 2014).

De nombreuses inondations affectent les municipalités situées au long de la rivière Chaudière. Bien que ces inondations soient majoritairement redevables à de fortes précipitations et la fonte du couvert de neige, l'anthropisation de la région est aussi notable avec l'implantation d'un réseau routier, l'exploitation de gravières, le drainage agricole et l'exploitation forestière (COBARIC, 1996). La seconde cause des inondations concerne les embâcles de glace qui obstruent l'écoulement naturel de l'eau et des glaces. Ces embâcles surviennent surtout au printemps, mais peuvent aussi avoir lieu lors de périodes de redoux hivernaux. Les effets sont multiples et peuvent, en plus des inondations, accentuer l'érosion des berges et constituer une véritable menace pour les infrastructures (Lagadec, 2015).

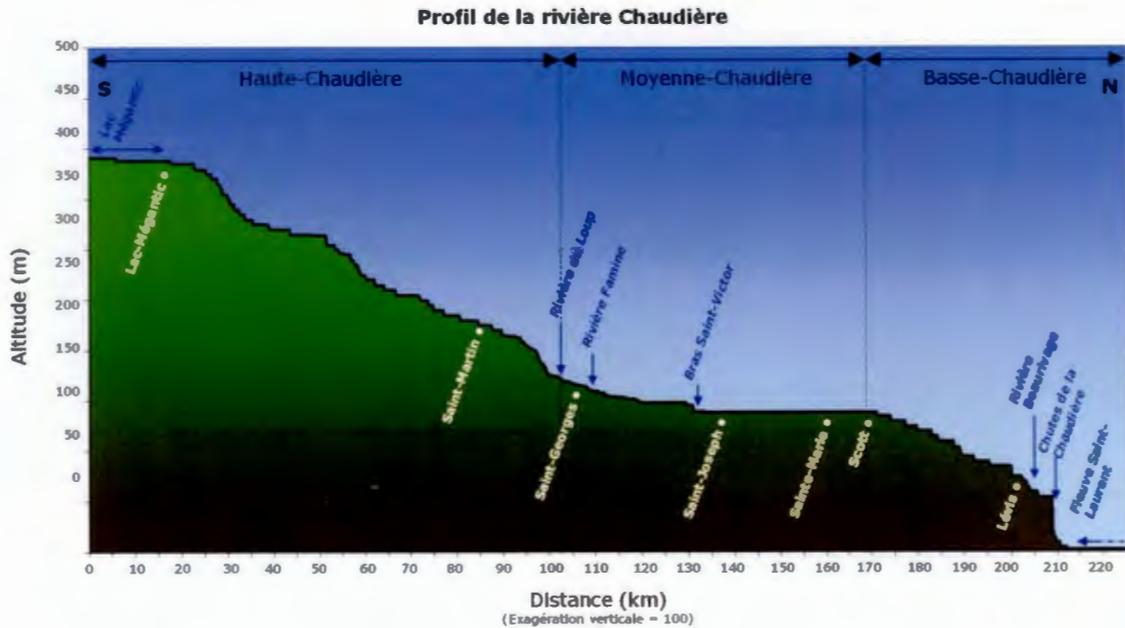


Figure 2.3 : Profil topographique longitudinal de la rivière Chaudière (COBARIC, 2014).

2.4 La région d'étude

La zone à l'étude correspond au bassin versant de la rivière Chaudière, soit près de 6000 km² répartis sur plus de 200 km de long, incluant plus d'une centaine d'affluents et leur bassin versant respectif. Cette zone s'étend des Appalaches et du lac Mégantic jusqu'à Breakeyville (à Lévis) à moins de 10 km de l'embouchure de la rivière Chaudière, elle-même un affluent du fleuve Saint-Laurent.

CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE

Un travail de cartographie et de caractérisation géomorphologique des bassins versants des tributaires de la rivière Chaudière et de leur cône alluvial, le cas échéant, a été réalisé. À partir des données obtenues, diverses analyses statistiques ont été réalisées afin de mieux comprendre la présence et la formation des cônes alluviaux. Le travail de cartographie et de photo-interprétation a permis de réaliser l'ampleur du phénomène et de délimiter un grand nombre de bassins versants et d'en extraire des variables morphométriques. L'étude géomorphologique des cônes alluviaux a permis de mieux comprendre la dynamique hydrosédimentologique des affluents de la rivière Chaudière. Finalement, les analyses et traitements statistiques des données recueillies ont permis de mettre en relation les variables propres aux différents bassins versants et la présence d'un cône alluvial à leur embouchure.

Pour usage usuel, nous utiliserons le terme bassin versant plutôt que sous bassin versant pour parler des affluents de la rivière Chaudière.

3.1 Découpage des bassins versants et analyses morphométriques

Le travail de photo-interprétation a permis de prendre connaissance d'une part, de l'ampleur des apports sédimentaires issus des affluents, tant au niveau de leur abondance que de leur extension spatiale et, d'autre part, de leur occurrence dans le temps à travers les photographies aériennes diachroniques utilisées. En effet,

L'analyse de photographies aériennes a permis de constater que le phénomène était non seulement présent tout au long de la rivière Chaudière, mais également que celui-ci pouvait avoir lieu de façon ponctuelle.

Vu les nombreux cônes alluviaux recensés à l'embouchure de plusieurs affluents, le découpage des bassins versants associés à tous les tributaires de la rivière Chaudière a été réalisé. Cette étape a permis d'acquérir des informations sur les bassins versants à l'aide d'un système d'information géographique (ArcGIS) et d'un modèle numérique d'altitude (Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2007). Les informations hydrologiques proviennent de la Banque de Données Topographique du Québec (BDTQ, 2018). Les outils utilisés avec ArcGIS permettent de s'assurer que le modèle d'élévation ne présente pas d'erreur et détermine, selon le niveau de précision recherché, les patrons d'écoulement de surface vers l'exutoire du cours d'eau, c'est-à-dire la jonction avec la rivière Chaudière dans le cas présent et d'en délimiter ainsi le bassin versant.

Les bassins versants qui ont été omis l'ont été principalement pour des raisons techniques, comme c'est le cas pour le bassin versant de la rivière Famine, exclu à cause de la difficulté concernant l'extraction des variables morphométriques à l'aide d'un SIG. En effet, le modèle numérique d'élévation généré comportait de nombreux problèmes. Finalement, les bassins versants du lac Mégantic, ayant un exutoire dans le lac plutôt que dans la rivière Chaudière, ont également été exclus.

Suite au découpage des bassins versants, l'extraction des paramètres morphométriques a été réalisée. Les variables retenues sont le relief, l'aire, le périmètre, la longueur totale des cours d'eau dans le bassin versant et la pente moyenne des cours d'eau principaux. À partir de ces paramètres simples, différents indices ont été calculés à savoir la densité de drainage, l'indice de compacité de

Gravelius, l'intégrale hypsométrique, le coefficient de Melton et le produit de l'aire et de la pente des cours d'eau. Ces variables sont décrites dans le tableau 3.1.

Tableau 6.1 : Variables morphométriques des bassins versants.

Variable	Acronyme
Relief (m)	Relief
Aire (en km ²)	Aire.Log
Densité de drainage	D.D.
Coefficient de Gravelius	Gravelius
Hypsométrie	Hyps
Coefficient de Melton	Melton
Produit de l'aire et de la pente	Pente.aire
Cônes – Qualitatif	Cones
Anthropisation – Qualitatif	Ant
Cônes – Présence/Absence	Cones.nu
Anthropisation – Présence/Absence	Ant.num

i) Le relief correspond à la différence entre le point le plus élevé (z max) et le point le plus bas (z min) au sein du bassin versant.

ii) L'aire a été calculée en km² à partir d'un SIG. Pour certains traitements statistiques, une transformation logarithmique (base 10) a été effectuée sur les données de l'aire lui conférant ainsi une distribution normale.

iii) La densité de drainage correspond à la longueur totale des cours d'eau compris dans le bassin versant, divisée par l'aire de celui-ci. Cette donnée, exprimée en km/km², indique le taux de ramification d'un réseau hydrographique sur une unité de surface (Musy 2005). La précision de la couche utilisée est de ± 4 m. (BDTQ, 2018). Plus l'indice obtenu est faible, plus le réseau hydrographique se limite à quelques cours d'eau. À l'inverse, plus l'indice est élevé, plus le réseau est ramifié.

iv) L'indice de compacité de 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 calcul nécessite de connaître l'aire (A) et le périmètre (P) du bassin :

$$Kg = \frac{P}{2 \times \sqrt{(\pi \times A)}}$$

v) La courbe hypsométrique est un rendu graphique qui permet de comparer différents bassins versants en donnant une idée générale du relief, de la pente et par le fait même de la vitesse d'écoulement. Il s'agit de mettre en relation la superficie du bassin versant, en pourcentage cumulé, avec l'altitude. À partir de cette courbe on peut obtenir l'intégrale hypsométrique (IH). Une IH élevée indique une superficie territoriale significative au-delà de l'altitude moyenne du bassin versant, donnant à la courbe hypsométrique une forme concave. Une faible IH indique au contraire un profil moins prononcé avec un relief plus plat. Strahler (1952) réfère à l'âge du bassin ou son niveau de maturité. Le calcul de l'intégrale hypsométrique (IH) se réalise de plusieurs façons, mais la méthode choisie est celle du *Elevation-Relief Ratio Relationship* de Pike et Wilson (1971) où Z correspond à l'altitude dans l'équation suivante :

$$IH = \frac{Z(\text{moy}) - Z(\text{min})}{Z(\text{max}) - Z(\text{min})}$$

vi) La forme du bassin versant est représentative du processus hydrogéomorphologique dominant dans l'édification des cônes alluviaux (écoulements fluviaux, hyperconcentrés ou coulées de débris). Le coefficient de Melton semble être un indice discriminant bien ces processus (Wilford *et coll.*, 2004). Le tableau 1.1, présenté antérieurement, en résume d'ailleurs les valeurs associées à chacun des trois processus ci-haut mentionnés.

vii) Rice (1998) a souligné que le produit de l'aire d'un bassin versant et de la pente de ses cours d'eau était une variable potentielle pour identifier les tributaires significatifs en termes de production de sédiments. Les cours d'eau des bassins versants ont été découpés en tronçons de 500 m pour lesquels une pente a été calculée. La pente moyenne a ensuite été multipliée par la superficie du bassin versant.

En plus des différentes variables morphométriques associées à chacun des bassins versants étudiés, deux variables qualitatives supplémentaires ont été ajoutées, soit la présence d'un cône alluvial à l'exutoire et le niveau d'anthropisation du bassin versant. Dans les deux cas, l'acquisition de ces variables a été documentée à l'aide des images issues de Google Earth Pro.

Dans le premier cas, une valeur qualitative a été attribuée à chacun des exutoires avec les lettres A, B ou C. La lettre A étant lorsqu'il y a présence d'un cône alluvial et C lorsqu'il n'y en a pas. La lettre B a été utilisée pour les bassins versants où l'imagerie satellitaire la plus récente ne montre pas de cône, mais qu'il y en avait un sur l'une des images plus anciennes. La seconde classification, de type binaire (1 ou 0), a été attribuée aux bassins versants en fonction de la présence (1) ou l'absence (0) d'un cône alluvial à partir des images les plus récentes.

L'anthropisation a aussi été évaluée de manière semi-quantitative à partir des images aériennes. La lettre A signifie un bassin versant anthropisé à plus de 50%. Les lettres B et C ont été attribuées pour une anthropisation entre 10 et 50% et inférieure à 10%. Les éléments d'anthropisation utilisés sont le développement d'un réseau routier, la présence de commerces, de stationnements, d'habitations, d'activités agricoles et de gravières et sablières, etc.

Ces variables semi-quantitatives, cotées A, B ou C ont été transformées en variables numériques équivalant à 0 ou 1, soit l'absence ou la présence d'anthropisation lorsqu'utilisées dans les opérations statistiques avec d'autres valeurs quantitatives. La même transformation a été effectuée pour les cônes alluviaux.

3.2 Géomorphologie des cônes alluviaux

La région à l'étude a été visitée à trois reprises depuis l'été 2016. La première visite a permis d'observer et d'inspecter des cônes alluviaux préalablement identifiés par photo-interprétation afin de faire l'état des lieux. La seconde visite a été réalisée à l'automne 2016. Cette visite a permis l'observation détaillée de plusieurs cônes issus d'affluents de la rivière Chaudière. Cette seconde campagne a aussi permis de remonter un des affluents afin de comprendre la morphologie et la dynamique du cours d'eau en question. Finalement, lors de la troisième visite une campagne d'échantillonnage sur dix cônes alluviaux a été réalisée.

Sur ces dix cônes alluviaux, entre deux et neuf échantillons ont été prélevés en fonction de la taille de ceux-ci pour des analyses granulométriques. L'échantillonnage a été fait en surface uniquement, et les débris ligneux n'ont pas été conservés. Chacun des échantillons a été tamisé ce qui a permis d'obtenir des mesures de poids pour des

classes granulométriques allant de $< 0,063 \text{ mm}$ à $> 32 \text{ mm}$. Le poids pour chacun des tamis a été reporté sur le poids total de l'échantillon afin d'obtenir des valeurs relatives en pourcentage. 100 mesures des plus grands cailloux et blocs (longueur; axe A) ont été prises sur dix cônes. Sur deux de ces cônes, 200 et 250 mesures d'orientation (axe A) ont été réalisées.

Lors des campagnes de terrain, la région à l'étude se limitait alors à la section de la Moyenne-Chaudière, incluant une vingtaine de bassins versants. Les diverses données et analyses réalisées à la suite de ces campagnes nous ont amenés à considérer un nombre plus grand de bassins versants à analyser. C'est pourquoi les cônes alluviaux échantillonnés d'un point de vue géomorphologique sont restreints à cette section de la rivière Chaudière.

3.3 Analyses et traitements statistiques

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé avec les logiciels R et Excel. Pour identifier les variables dominantes dans la mise en place des cônes alluviaux, une variété de tests et d'analyses statistiques a été effectuée. D'abord, un tableau de corrélation a été réalisé pour présenter les liens potentiels entre chacune des variables. Un tableau de contingence et des tests de chi-carré ont également été effectués afin de valider l'interdépendance potentielle de certaines variables qualitatives, soit la présence ou l'absence d'un cône alluvial et le niveau d'anthropisation des bassins versants. Dans le même ordre d'idée, des régressions logistiques de type binomial ont été réalisées, permettant ainsi de déterminer quelles variables sont les plus fortement liées aux différents niveaux d'anthropisation.

Des analyses en composantes principales (PCA), des arbres de classification et de régression (CART) et de l'analyse discriminante linéaire (LDA) ont été utilisés pour comprendre les dynamiques entourant la mise en place des cônes. La PCA permet de réduire les variables sources en quelques variables (PC) résumant la variabilité des données. Dans le présent mémoire, les CART n'ont pas été utilisés pour prédire la présence ou l'absence d'un phénomène, mais plutôt afin d'identifier les variables pouvant potentiellement être des prédicteurs quant à l'occurrence ou l'absence d'un cône alluvial à l'exutoire d'un tributaire. Ils permettent surtout un rendu visuel très explicite où l'arbre ne se divise qu'en deux branches à chaque découpage. Breiman *et coll.* (1984) décrivent plus largement les CART et leur potentiel. La régression logistique (LDA) de type binomial permet quant à elle de prédire la probabilité d'occurrence d'un évènement à partir de nombreuses variables indépendantes. La probabilité obtenue entre 0 et 1, a été arrondie (< 0.5 = absence d'évènement; > 0.5 = présence d'évènement) pour fins d'analyses. L'utilisation des CART et de la LDA est grandement inspirée des travaux de Martin et Germain (2016).

3.4 Rééchantillonnage statistique

L'utilisation d'une technique de rééchantillonnage statistique de type bootstrap permet d'augmenter virtuellement la taille d'un échantillon et permet de valider ou infirmer les tests statistiques préalablement obtenus. Dans le cas présent, nous avons procédé à 1000 ré-échantillonnages sans remise. Dans le cas des arbres de régressions, la technique consiste à créer des arbres à partir d'un échantillon de 100 bassins versants puis de classer les 42 bassins résiduels, permettant ainsi d'obtenir un taux de réussite. Finalement, en ce qui concerne la LDA, nous avons échantillonné 100 bassins (1000 fois) à partir desquels nous avons prédit s'ils appartenaient à la catégorie « avec » ou « sans » cône. Nous avons finalement comparé les résultats avec différents indicateurs, soit la sensibilité, la spécificité et la performance globale. Ces indicateurs correspondent au ratio d'évènements prédits avec succès, au ratio

d'absence d'évènements prédits avec succès et au ratio total d'évènements et non-évènements correctement prédits. Il s'agit donc d'un moyen simple et efficace de vérifier laquelle des approches statistiques utilisées permet de mieux discriminer la présence ou l'absence d'un cône alluvial à l'embouchure des affluents de la rivière Chaudière en fonction de différentes variables morphométriques.

CHAPITRE IV RÉSULTATS

4.1 Les affluents de la rivière Chaudière et leur bassin versant

Le présent travail s'intéresse aux tributaires de la rivière Chaudière, correspondant à 142 bassins versants lesquels ont été cartographiés et caractérisés. Cette cartographie issue d'une photo-interprétation a permis d'identifier de nombreux cônes alluviaux situés à l'exutoire des affluents. Au total, 41 cônes ont été répertoriés et observés. Tels que présentés à la figure 4.1 et au tableau 4.1, les résultats obtenus permettent d'affirmer que les cônes alluviaux sont présents sur une grande partie du territoire de la rivière Chaudière. En effet, les cônes alluviaux s'observent dans les secteurs de la Moyenne et la Haute-Chaudière et ce autant sur une rive que l'autre. Les caractéristiques géomorphologiques des cônes alluviaux sont présentées à la section 4.2.

Tableau 4.1 : Répartition géographique des bassins versants et des cônes alluviaux au long de la rivière Chaudière.

	Basse-Chaudière			Moyenne-Chaudière			Haute-Chaudière		
	Total	² Est	Ouest	Total	Est	Ouest	Total	Est	Ouest
Bassins versants	12	6	6	77	39	38	53	23	30
¹ Cône alluvial	0	0	0	28	13	15	12	5	7
Bancs	6	3	3	7	5	2	16	9	7

¹ Fait référence au nombre de bassins versants caractérisés par la présence d'un cône alluvial ou d'un banc d'accumulation.

² Réfère à la rive de la rivière Chaudière où sont localisés les bassins versants.

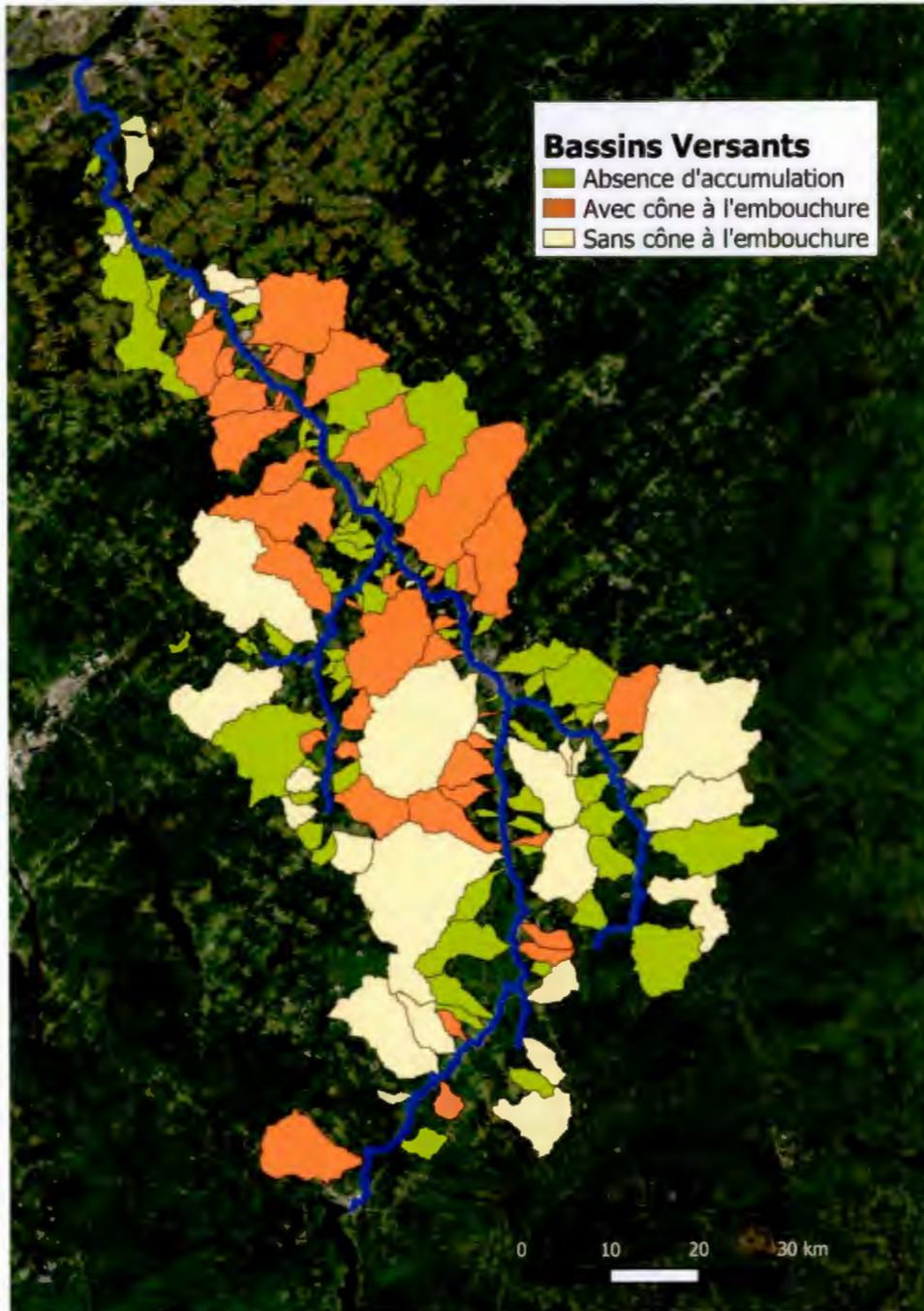


Figure 4.1 : Cartographie et délimitation des 142 bassins versants associés aux tributaires de la rivière Chaudière. Deux types d'apports sédimentaires ont été notés, à savoir les cônes alluviaux et les bancs alluviaux.

4.2 Géomorphologie des cônes alluviaux

Les 41 cônes alluviaux cartographiés et ceux directement observés et échantillonnés sur le terrain présentent une certaine variabilité quant à leur taille et leur morphologie. Le tableau 4.2 présente les données morphométriques pour les bassins versants et les 10 cônes échantillonnés. De manière générale, les cônes présentent une forme en éventail, plus ou moins symétrique (figure 4.2), et ce, peu importe leur position au long de la rivière Chaudière et la rive sur laquelle ils sont situés.

Tableau 4.2 : Dimension des bassins versants et des cônes alluviaux échantillonnés sur le terrain.

Affluents	Bassin versant		Cône alluvial	
	Aire (km ²)	Relief (m)	Longueur (m)	Largeur (m)
Des Plantes	119,14	379	235	104
Pouliot	49,22	441	116	99
Bélaïr	43,86	290	61	35
Chassé	77,74	271	64	52
Des Fermes	59,33	517	240	116
Cliche	22,33	402	145	68
Nom inconnu	< 1	155	44	23
Savoie	24,24	343	94	65
St-Elzéar	6,1	162	71	36
Vallé	28,71	237	98	55

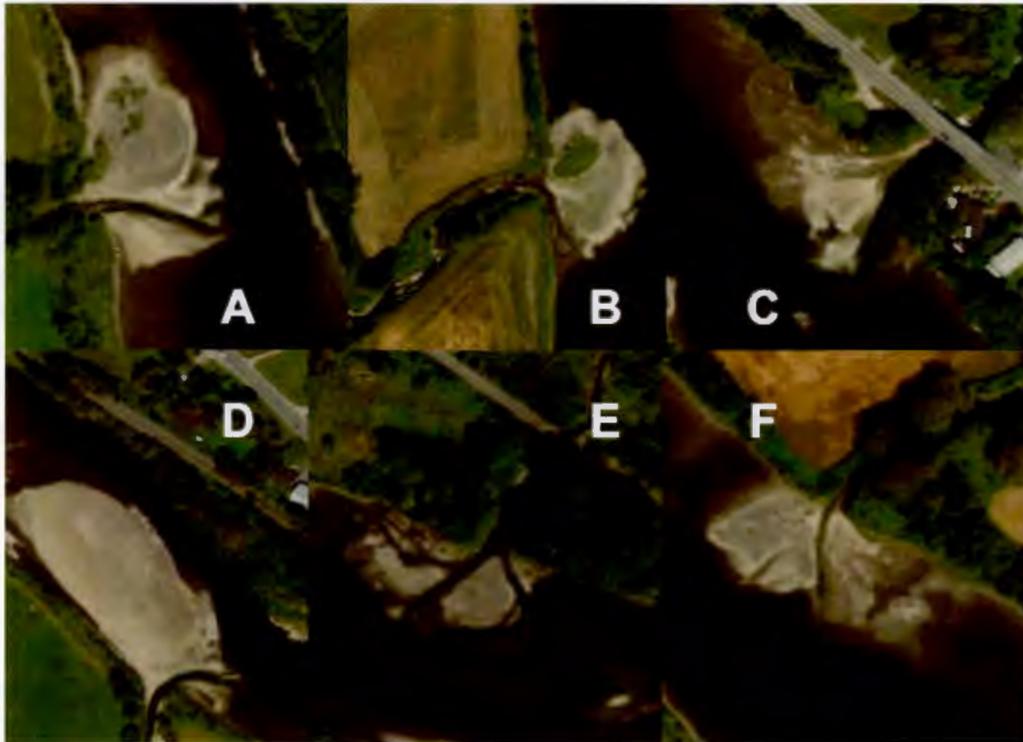


Figure 4.2 : Exemples de cônes alluviaux situés à l'embouchure des tributaires de la rivière Chaudière : Savoie (A), Vallé (B), Chassé (C), Nadeau et Lessard (D), Bélair (E) et Carter (F). Source : Google Earth (2015). Sur toutes les photos, le sens de l'écoulement est vers la gauche et le haut (Nord-Ouest).

La forme conique de ces dépôts granulaires est habituellement scindée par un ou plusieurs chenaux d'écoulement intermittent. Les dépôts sont parfois allongés vers le nord-ouest, soit dans le sens de l'écoulement de la rivière Chaudière, signe que celle-ci procède au remaniement sédimentaire a posteriori ou en influence, partiellement du moins, la déposition. Des chenaux inactifs et intermittents sont également observables de même que la présence de végétation herbacée, surtout à l'apex des cônes, lesquels témoignent de l'activité géomorphologique sporadique sur ces cônes (figure 4.3).



Figure 4.3 : Chenal actif (à gauche) et inactif (à droite) sur les cônes des rivières Pouliot et Des Fermes. Les photographies ont été prises en période d'étiage.

Les sédiments qui composent les cônes investigués sur le terrain sont majoritairement constitués de gravier ($> 60\%$), d'un peu de sable (8 à 38%) et d'une petite fraction d'argile à l'occasion (tableau 4.3). En revanche, des sédiments fins ($< 0,063$ mm) et des sédiments grossiers (> 32 mm) ont néanmoins été observés sur presque tous les cônes visités. Dans l'ensemble, la composition granulométrique des cônes est très similaire selon la classification de Blott et Pye (2012) (figure 4.4). Par ailleurs, on note aucune différence significative entre les cônes situés sur la rive Est et les cônes situés sur la rive Ouest.

Tableau 4.3 : Granulométrie des cônes alluviaux échantillonnés dans la Moyenne-Chaudière. Le nom des cônes fait référence à leur tributaire. Sont présentés aussi les moyennes pour les cônes sur la rive Est et Ouest.

Affluents	Gravier	Sable	Fines	Classification Blott and Pye (2012)
	(> 2 mm)	(0.05-2 mm)	(< 0.05 mm)	
	%	%	%	
Des Plantes	80	20	0	Gravier sableux très peu limoneux
Pouliot	82	17	1	Gravier sableux très peu limoneux
Bélaïr	92	8	1	Gravier sableux très peu limoneux
Chassé	68	33	0	Gravier sableux très peu limoneux
Des Fermes	61	38	1	Gravier sableux très peu limoneux
Cliche	67	27	5	Gravier sableux un peu limoneux
Nom inconnu	74	25	1	Gravier sableux très peu limoneux
Savoie	73	25	1	Gravier sableux très peu limoneux
St-Elzéar	66	32	1	Gravier sableux très peu limoneux
Vallé	80	19	1	Gravier sableux très peu limoneux
Rive Est	81	19	0	Gravier sableux très peu limoneux
Rive Ouest	70	28	2	Gravier sableux très peu limoneux

Blott & Pye (2012) Classification

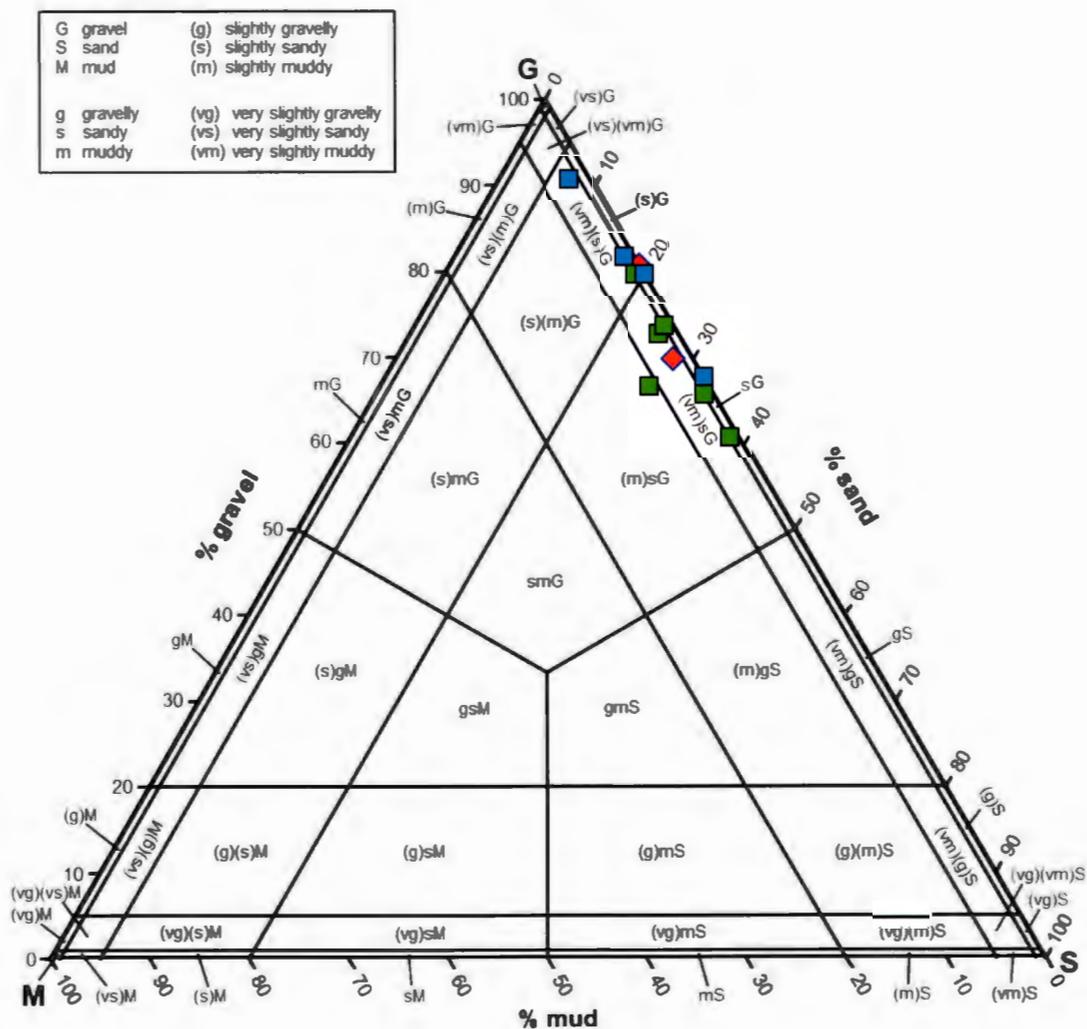


Figure 4.4 : Caractérisation granulométrique des cônes alluviaux échantillonnés selon la classification de Blott et Pye (2012). La couleur verte représente les cônes échantillonnés sur la rive Ouest, en bleu sur la rive Est et en rouge la moyenne des rives Est et Ouest.

Les mesures d'orientation de l'axe A de cailloux sur les cônes à l'exutoire des cours d'eau Pouliot et Plantes sont présentées à la figure 4.5. L'angle d'arrivée du ruisseau Pouliot à la jonction de la rivière Chaudière est de 75° . C'est également la moyenne obtenue pour l'orientation des 200 cailloux mesurés sur le cône. La rivière Chaudière à cet endroit a une orientation de 166° . Dans le cas de la rivière des Plantes, son orientation à l'exutoire est d'environ 140° . La rivière Chaudière a une orientation de 2° à la jonction. Les cailloux présentent une orientation moyenne de 97° , soit une orientation perpendiculaire à l'écoulement de la rivière Chaudière.

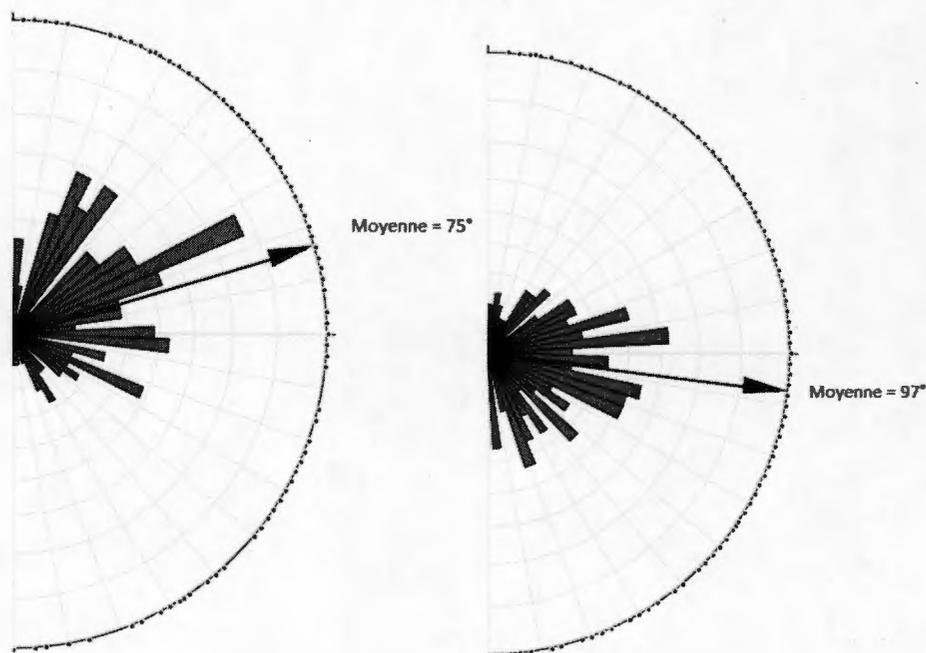


Figure 4.5 : Orientation des cailloux (axe A) mesurés pour le ruisseau Pouliot (moyenne de 75°) et la rivière des Plantes (moyenne de 97°). Les demi-cercles vont de 0° à 180° (de haut en bas).

La longueur des 100 plus gros blocs recensés sur chacun des 10 cônes alluviaux échantillonnés est illustrée à la figure 4.6. Les plus gros blocs sont d'une taille métrique avec une valeur maximale de 1,97 m. La taille impressionnante de ces blocs soulève d'ailleurs plusieurs questions quant au processus géomorphologique responsable de leur transport jusqu'à la rivière Chaudière (figure 4.7).

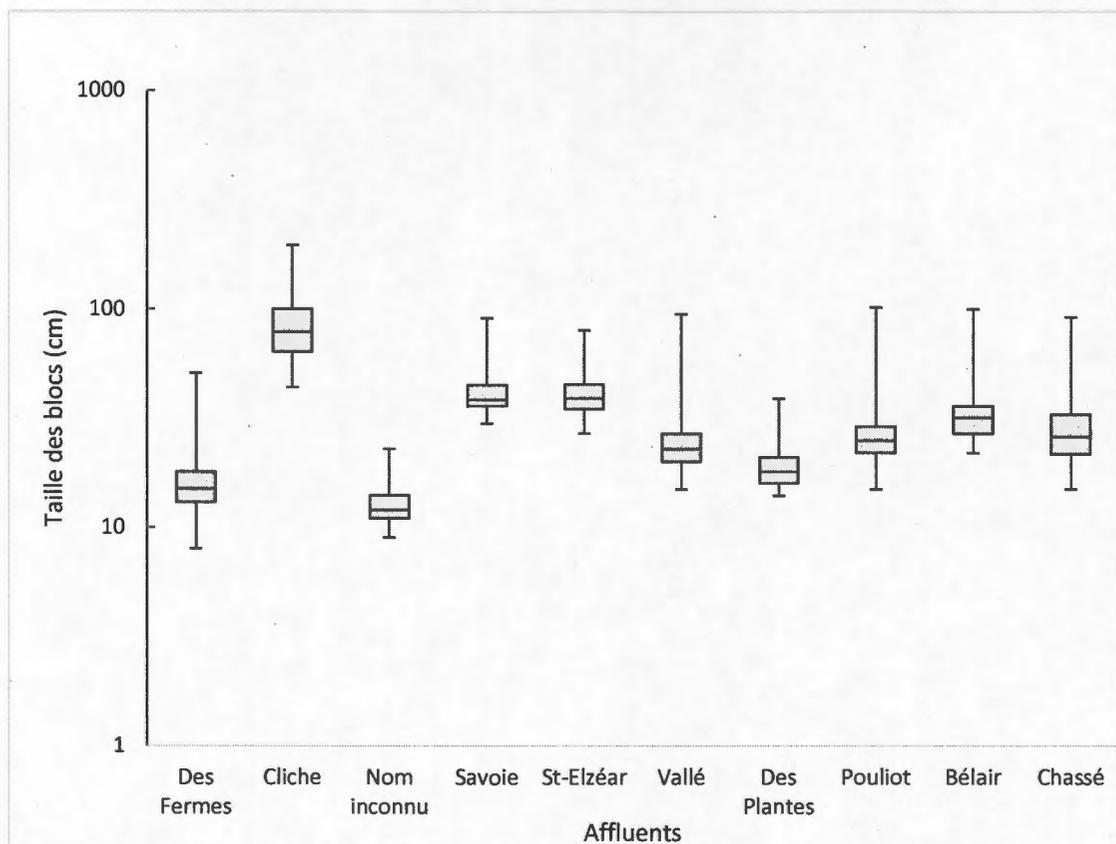


Figure 4.6 : Longueur des 100 plus gros blocs mesurés sur chacun des 10 cônes alluviaux échantillonnés. Sont représentés la médiane, le premier et troisième quartile ainsi que le minimum et le maximum. À noter l'échelle logarithmique de la taille des blocs.



Figure 4.7 : Exemple de blocs trouvés sur le cône du ruisseau Cliche. Le cahier de notes en blanc fait environ 10 cm x 14 cm.

4.3 Traitements statistiques

La matrice de corrélation des variables morphométriques issues des 142 bassins versants analysés montre que les variables les mieux corrélées avec la présence de cônes alluviaux sont le relief (0,258), l'aire (0,207) et le produit de l'aire et de la pente des cours d'eau (0,170) (tableau 4.4). Le taux d'anthropisation est aussi corrélé avec la présence de cônes alluviaux, mais il s'agit dans ce cas d'une variable qualitative. Ces prédictors sont aussi fortement corrélés entre eux, à l'exception de l'anthropisation.

Tableau 4.4 : Matrice de corrélation des variables caractérisant les 142 bassins versants. Les variables surlignées de couleur grise sont celles les plus fortement corrélées.

Relief							
D.D.	-0,238	D.D.					
Gravelius	0,180	0,153	Gravelius				
Aire.Log	0,706	-0,292	0,051	Aire.Log			
Cone.num	0,258	0,108	0,034	0,207	Cone.num		
Ant.num	-0,059	0,167	0,002	0,087	0,222	Ant.num	
Hyps	-0,430	-0,062	-0,152	-0,423	-0,010	-0,045	Hyps
Melton	-0,042	0,075	0,080	-0,668	-0,022	-0,185	0,194 Melton
Pente.Aire	0,785	-0,075	0,118	0,798	0,170	0,049	-0,379 Pente.Aire
Banc	0,096	-0,018	0,059	0,232	-0,323	0,063	-0,133 Banc
							-0,229 0,262

Le tableau 4.5 présente ces variables (relief, aire, pente.aire et anthropisation) en fonction des trois sections de la rivière Chaudière étant donné la répartition spatiale des cônes alluviaux. Les bassins versants de la Basse-Chaudière sont d'une taille plus petite, possèdent un relief moins prononcé et sont plus anthropisés. Cette section de la Chaudière est la seule où l'on ne retrouve aucun cône alluvial à l'exutoire des tributaires.

Tableau 4.5 : Principales variables morphométriques des bassins versants selon les trois secteurs de la rivière Chaudière.

		Basse Chaudière	Moyenne Chaudière	Haute Chaudière
Bassin versant avec cône alluvial (%)		0	36	23
Anthropisation (%)	A Élevé	58	40	11
	B Moyen	42	47	68
	C Faible	0	13	21
Relief (m)	Min.	14	63	90
	Max.	241	506	440
	Moy.	60	207	209
Aire (km²)	Min.	0,7	0,5	1,0
	Max.	68,9	146,5	168,8
	Moy.	10,8	19,5	23,1
Pente x aire	Min.	0,58	1,04	0,15
	Max.	53,04	418,11	402,49
	Moy.	9,40	58,24	60,68

4.3.1 Comparaison de la distribution des paramètres morphométriques

La distribution statistique des trois variables quantitatives mentionnées ci-devant est présentée à la figure 4.8 afin de permettre une comparaison entre les bassins versants avec ou sans un cône alluvial à leur embouchure. Dans le cas de l'aire, du relief et du produit pente.aire, les différences sont telles que la médiane des bassins avec un cône

dépasse le troisième quartile des bassins qui en sont dépourvus. Le tableau 4.6 présente les résultats du test Wilcoxon de comparaison des moyennes pour ces trois variables.

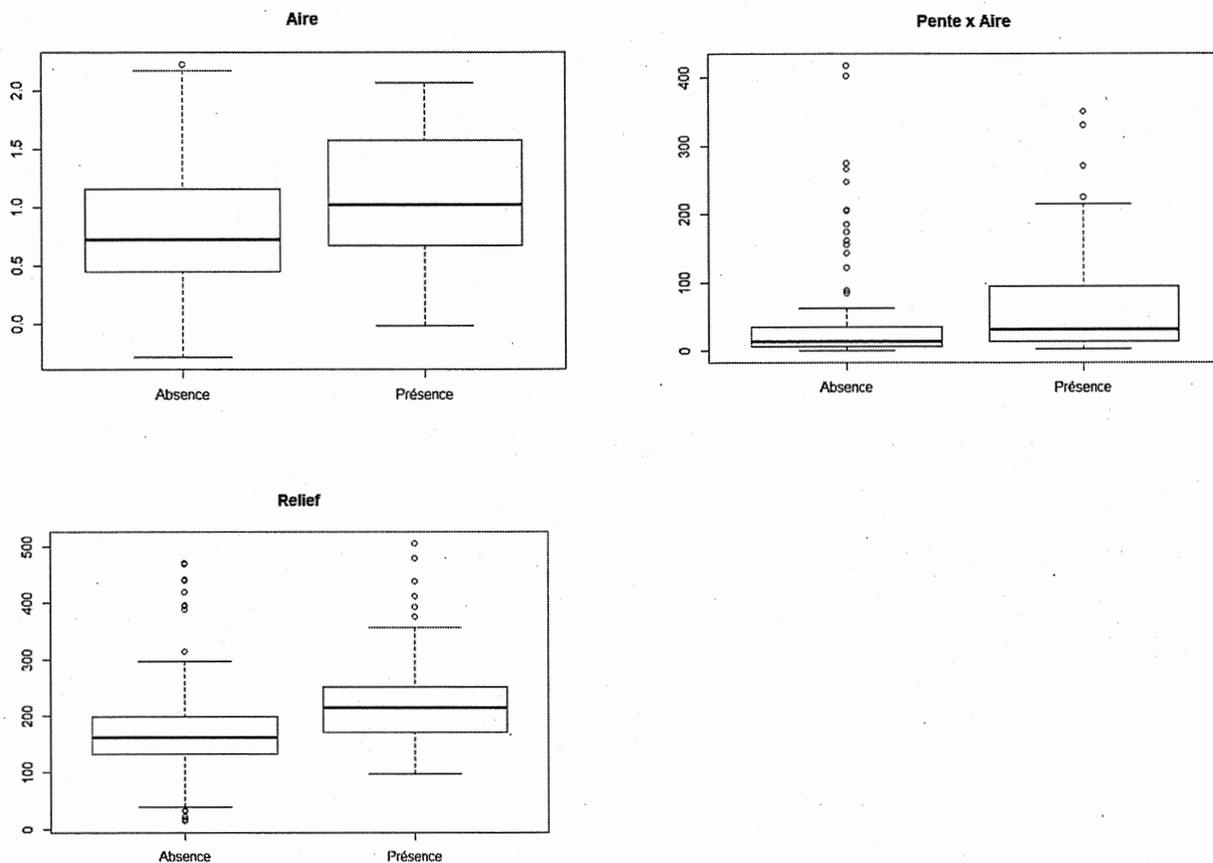


Figure 4.8: Comparaison de la distribution des bassins versants avec ou sans un cône alluvial pour les paramètres morphométriques de l'aire, du relief et du produit de l'aire et de la pente.

Tableau 4.6 Valeurs p obtenues par le test de Wilcoxon pour la comparaison des bassins versants avec ou sans un cône alluvial.

Variabes	Valeur-p (Wilcoxon)	Significative (p < 0.05)
Relief	0,0005018	Oui
Aire	0,01084	Oui
Pente.aire	0,0008788	Oui

4.3.2 Les courbes hypsométriques

Dans la phase préliminaire du projet, alors que celui-ci se concentrait exclusivement sur 27 bassins versants, dont 13 avec un cône à leur embouchure, les courbes hypsométriques de ceux-ci ont été établies. Les altitudes respectives varient de 140 à 645 m pour un dénivelé (relief) maximum de 505 m. Quoique l'hypsométrie intégrale comme variable ne présente pas de corrélation significative avec la présence des cônes alluviaux, il apparaît néanmoins pertinent d'en présenter les courbes. Aucune différence notable n'est visible entre les rives Est et Ouest de la rivière Chaudière (figure 4.9).

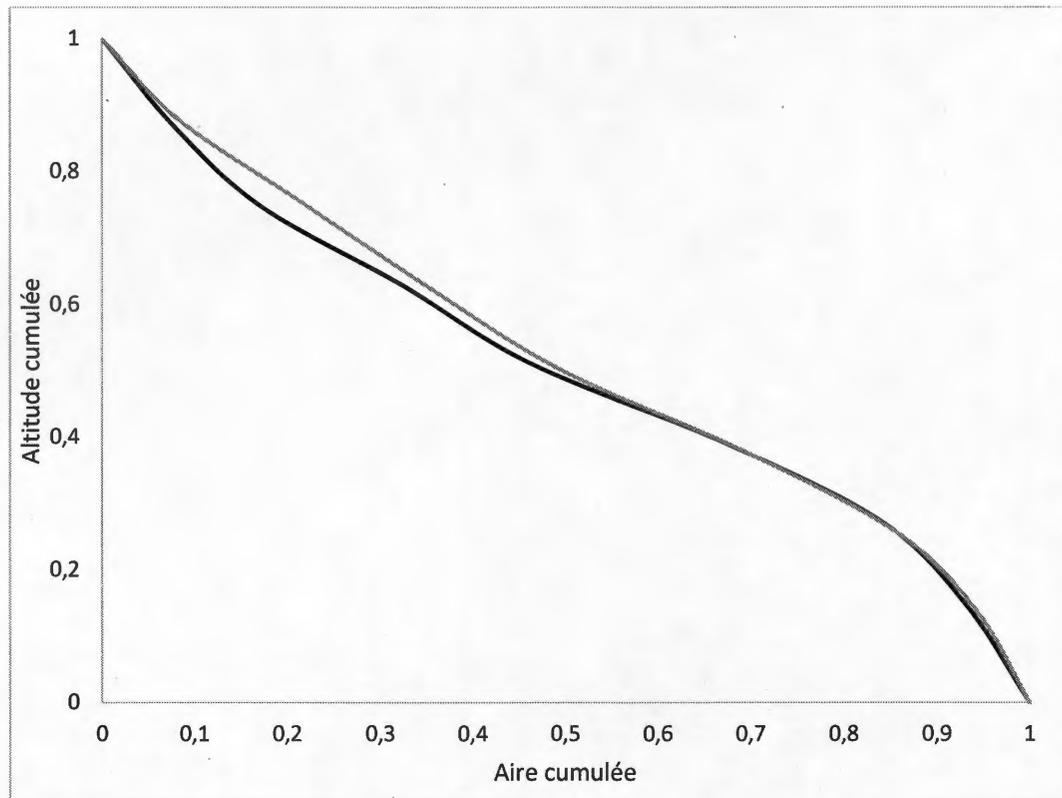


Figure 4.9: Comparaison des hypsométries intégrales pour les bassins versants situés sur les rives Est (noir) et Ouest (gris) de la rivière Chaudière.

La comparaison des courbes hypsométriques moyennes des bassins versants avec ou sans un cône alluvial permet toutefois de noter une légère différence (figure 4.10). Selon la classification de Strahler (1952), les bassins versants avec un cône alluvial à leur exutoire sont plus « matures » que ceux qui en sont dépourvus. Ces bassins plus « matures » ont des hypsométries intégrales plus faibles que les autres bassins. Les bassins avec un cône présentent aussi des ruptures de pente plus accentuées à proximité de leur exutoire, alors que les autres bassins ont des pentes plus douces et continues à cet endroit.

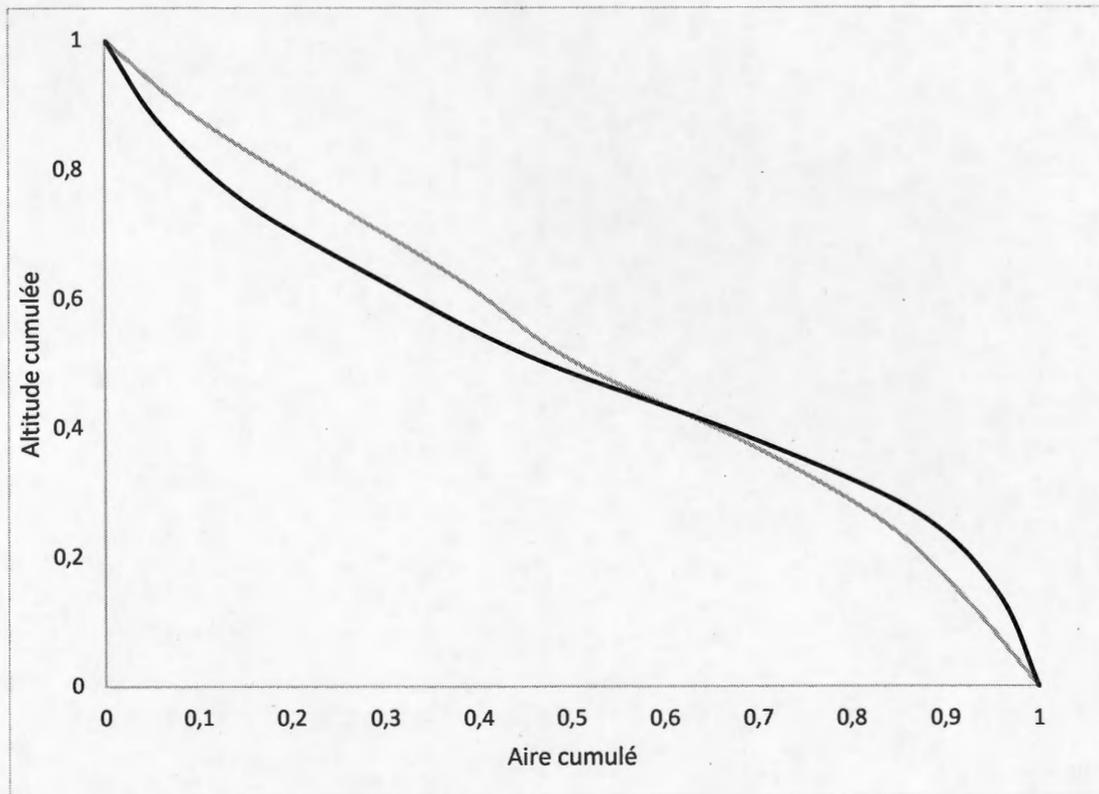


Figure 4.10: Comparaison des hypsométries intégrales moyennes pour les bassins versants avec (noir) et sans (gris) un cône alluvial.

4.3.3 Analyse des variables qualitatives

Étant donné que l'anthropisation est de nature qualitative, un tableau de contingence a été réalisé (tableau 4.7). Le niveau de cette dépendance se décrit par le coefficient de contingence, qui dans ce cas équivaut à 0,236, soit une relation existante statistiquement, mais relativement faible.

Tableau 4.7: Contingence de la présence de cônes alluviaux et du taux d'anthropisation des bassins versants.

Anthro. Cônes	A	B	C	Total
Présence	17 (12,42)	23 (22,52)	1 (6,06)	41
Absence	26 (30,58)	55 (55,48)	20 (14,94)	101
Total	43	78	21	142

Le degré de liberté étant de 2, le χ^2 se lit sur la table de distribution du chi-carré comme étant de 5,99 à un niveau de confiance de 95%. Le chi-carré obtenu à partir du présent tableau est de 8,34.

4.4 Discrimination statistique des bassins versants avec ou sans un cône alluvial

4.4.1 Régressions logistiques

Les régressions logistiques permettent de comparer les bassins versants avec un cône alluvial à leur exutoire en fonction du taux d'anthropisation qui leur a été attribué au préalable (tableau 4.8). Les régressions logistiques effectuées montrent que la densité de drainage, le relief et le produit de la pente et de l'aire sont les variables les plus significatives.

Tableau 4.8: Variables significatives issues des régressions logistiques du taux d'anthropisation avec la présence de cônes alluviaux.

Anthropisation	Variable	Valeur-p.
A	Relief	0,021 (<0.05)
	Pente.aire	0,039 (<0.05)
B	Relief	0,091 (< 0.1)
	Densité de drainage	0,034 (<0.05)

Dans le cas des bassins fortement anthropisés (A), ce sont le relief et la variable pente.aire qui sont significatives pour expliquer la présence des cônes alluviaux. On peut avancer que dans un bassin fortement anthropisé, le relief, peu importe l'aire du bassin (et en théorie sa disponibilité sédimentaire), favorise les accumulations granulaires à l'exutoire des bassins. Dans un contexte d'anthropisation moyenne (B), le relief et la densité de drainage deviennent les variables significatives dans les régressions logistiques. Ces résultats indiquent que dans un milieu naturel, le relief du bassin de drainage et son niveau de ramification influencent positivement le transport de sédiments jusqu'à l'exutoire, tout comme le niveau d'anthropisation d'un milieu. En effet, plus ces derniers sont élevés, plus l'apport de sédiments par ruissellement de surface est accentué. Enfin, cela confirme que le relief, les milieux anthropisés et le produit de l'aire et de la pente d'un bassin versant ont une influence positive sur la formation des cônes alluviaux à l'embouchure des tributaires de la rivière Chaudière.

4.4.2 Analyse par composantes principales (PCA)

L'analyse en composantes principales (PC) est présentée dans le tableau 4.9. La PC1 est composée principalement des variables que sont le relief, l'aire et le produit de l'aire et de la pente (pente.aire). La PC2 fait référence à la densité de drainage (D.D.)

et l'indice de Gravelius. La PC3 est très semblable à la PC2 avec une importance un peu plus grande accordée à l'indice de Gravelius. Les PC1, PC2 et PC3 expliquent 48, 21 et 14% de la variance des données pour un cumul de 83% de la variance.

Tableau 4.9: Résultat de l'analyse par composantes principales et les valeurs obtenues pour les différentes PC.

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Relief	0,530	-0,022	0,090	-0,125	-0,737
D.D.	-0,150	0,697	-0,503	-0,434	0,002
Gravelius	0,115	0,625	0,757	0,072	0,129
Aire.Log	0,529	-0,150	-0,041	-0,115	0,661
Hyps	-0,351	-0,317	0,393	-0,778	0,004
Pente.Aire	0,530	0,022	-0,095	-0,415	0,052

L'utilisation de la PCA, en réduisant la dimensionnalité de notre jeu de données sur deux axes, indique qu'une bonne partie de la variance des données est due aux variables que sont le relief, l'aire et le produit de l'aire et de la pente. Lorsque représenté graphiquement (figure 4.11), on remarque tout de même que les bassins versants, avec ou sans un cône alluvial à leur exutoire, ne sont pas clairement distincts les uns des autres.

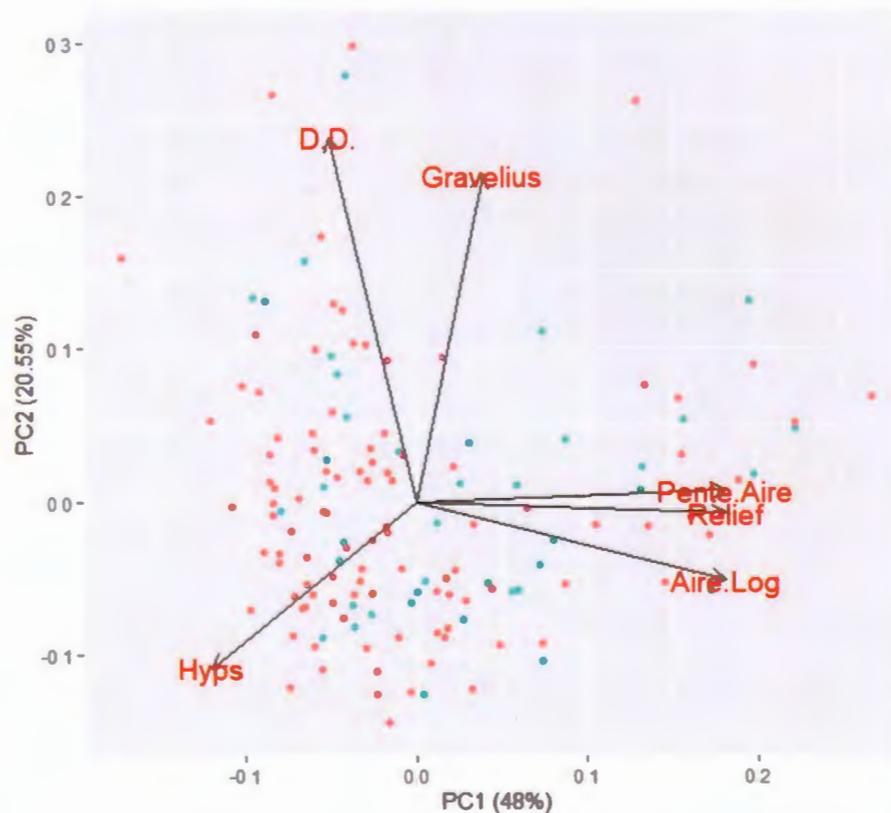


Figure 4.11: Représentation graphique des données selon la PC1 et la PC2. Les points représentent les bassins versants avec (bleu) et sans (rouge) un cône alluvial à l'embouchure.

L'hypsométrie intégrale d'une valeur faible indique une évolution avancée des bassins versants, supposant que le cours d'eau est près de sa pente d'équilibre. Cette information a été validée avec les observations sur le terrain, puisque la majorité des cours d'eau observés s'écoule directement sur la roche en place. Par conséquent, les cours d'eau ont une capacité d'érosion surtout latérale en période de fort débit. L'analyse par PCA indique que les bassins versants avec un cône à leur embouchure ont vraisemblablement une superficie et un relief relativement élevés.

4.4.3 Les arbres de classification et de régression (CART)

Les arbres de classification et de régression mettent en valeur les variables qui discriminent le mieux la présence ou l'absence d'un cône alluvial (figure 4.12). Le relief est la première variable utilisée pour distinguer les groupes. La densité de drainage est ensuite priorisée. L'utilisation de ce prédicteur indique qu'un réseau hydrographique plus fortement développé augmente la probabilité d'avoir un cône à l'embouchure du bassin versant.

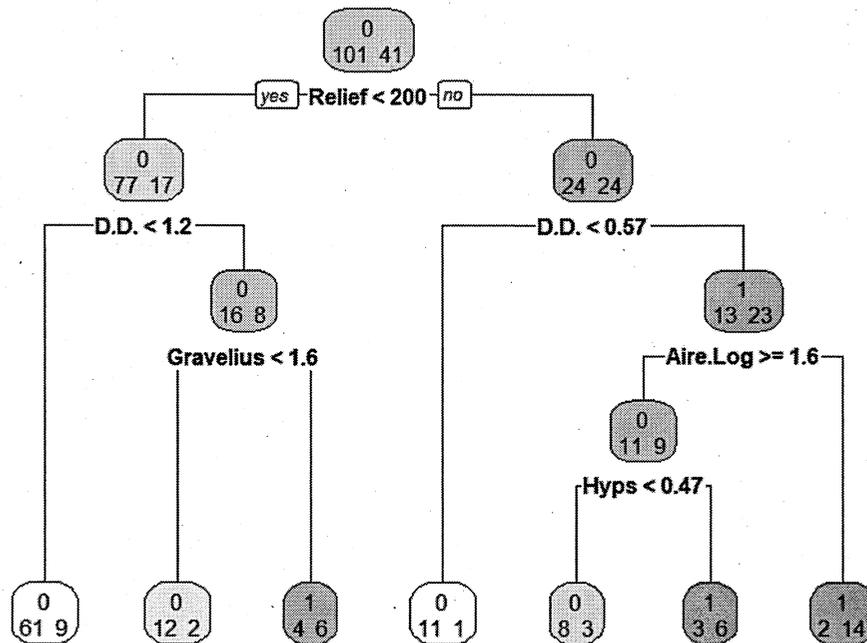


Figure 4.12 : Arbre de régression. Le chiffre dans le haut de chaque boîte correspond à la majorité des bassins versants contenus par celle-ci, à savoir : présence (1) ou absence (0) de cônes alluviaux. Le dégradé de couleur varie en fonction de la majorité des bassins que contient chaque boîte. Les chiffres à la base des boîtes indiquent le nombre de bassins versants contenus : à gauche les bassins versants dépourvus de cônes alluviaux et à droite les bassins avec des cônes alluviaux).

4.4.4 Analyse discriminante linéaire (LDA)

L'analyse discriminante linéaire utilise des variables prédictives dans le but de classer la présence et l'absence d'un cône à l'embouchure des affluents de la rivière Chaudière. Dans le cas présent, les variables sont l'aire, le relief, la densité de drainage, le coefficient de Gravelius, l'hypsométrie intégrale ainsi que le produit de la pente du cours d'eau et de l'aire du bassin. La LDA a permis d'identifier

correctement 11 bassins avec un cône alluvial et 95 qui en sont dépourvus. C'est dire que 95 des 101 (94%) bassins versants dépourvus d'un cône ont bien été classifiés, alors que seulement 14 des 41 (34%) bassins versants avec un cône alluvial ont été correctement classifiés. Au total, c'est donc 77% des bassins versants qui ont été bien identifiés (109 sur 142) sur la base de la présence ou l'absence d'un cône alluvial à leur embouchure.

Tableau 4.10 : Tableau de contingence des résultats de la LDA

	Absence (observée)	Présence (observée)	Total	Taux de réussite
Absence (prédite)	95	27	101	94%
Présence (prédite)	6	14	41	27%

CHAPITRE V DISCUSSION

5.1 Caractéristiques et fonctionnement des cônes alluviaux

Les cônes alluviaux et leur fonctionnement sont peu documentés en Amérique du Nord et au Québec. De manière générale, les cônes alluviaux sont des accumulations de sédiments sous une forme en éventail et acheminée par un cours d'eau qui les dépose à la suite d'une perte de compétence, généralement associée à une rupture de pente (Blair et McPherson, 1994). Leur fonctionnement est régi par une disponibilité sédimentaire, des conditions hydrométéorologiques favorables (fonte rapide des neiges au printemps ou d'intenses précipitations) et les caractéristiques morphométriques de leur bassin versant (Blair et McPherson, 1994, Ouellet et Germain, 2014). Les cônes présentent généralement un chenal actif et des chenaux intermittents qui s'activent selon les épisodes hydroclimatiques et l'évolution du cône (Millard *et coll.*, 2010; Blair et McPherson, 1994).

Bien que les cônes alluviaux étudiés au long de la rivière Chaudière présentent une certaine variabilité quant à leur forme et leur taille, tous sont similaires d'un point de vue granulométrique avec une forte dominance des graviers (figure 4.4). En revanche, les observations et dépôts recueillis à la limite distale de certains cônes montrent une mince couche de sédiments fins en surface (figure 5.1A), lesquels proviennent vraisemblablement de la rivière Chaudière. L'absence de ces dépôts limoneux à l'apex des cônes laisse présager une sédimentation associée plutôt à la dynamique de la rivière Chaudière. La présence de chenaux récemment actifs sur plusieurs cônes

illustre aussi la variabilité granulométrique à l'échelle du cône (figure 5.1B). Le matériel plus grossier qui constitue la majorité des cônes est généralement absent au sein de ces chenaux. Par contre, la taille des plus gros blocs mesurés sur les cônes illustrent bien la grande capacité de transport et de destruction des écoulements de forte intensité. L'hypothèse d'une mise en place sous un régime hydrologique proximo-paraglaciaire dont les dépôts auraient été délavés par la suite de leur matrice fine apparaît ici peu convaincante. En effet, dans la mesure où ces blocs ont été observés pour l'essentiel que sur les cônes eux-mêmes, et non en amont ou en aval de ceux-ci, laisse présager une déposition plus contemporaine.

À la lumière de ces informations, il est fort probable que ces cônes soient actifs d'un point de vue géomorphologique selon deux régimes distincts. Un premier régime faisant appel à des écoulements à forte fréquence mais d'une faible intensité, comme en témoignent les chenaux actifs sur les cônes et composés de matériel relativement fins. Le second régime, plus sporadique dans le temps, fait appel à des épisodes à faible fréquence mais d'une forte intensité capables de transporter des sédiments grossiers, voire des blocs. Ce questionnement ramène d'ailleurs à une problématique phare en géomorphologie exposée par Wolman et Miller dès 1960, soit le rapport entre la fréquence et l'intensité des processus géomorphologiques menant à la création de formes, dans ce cas-ci l'édification de nombreux cônes alluviaux situés à l'embouchure de plusieurs tributaires de la rivière Chaudière.



Figure 5.1 : Observation d'un dépôt limoneux en dessiccation dans la partie distale d'un cône alluvial (A) et granulométrie fine tapissant un chenal récemment actif sur un cône alluvial (B).

À titre d'exemple, deux épisodes de mise en place de cônes alluviaux ont été identifiés à proximité des municipalités de Vallée-Jonction et de Saint-Martin. Le premier a eu lieu en août 2003 et a mené à la mise en place de deux cônes alluviaux (MELCC, 2019). Le second évènement a eu lieu en août 2011, à la suite du passage de l'ouragan Irène (MRC Nouvelle-Beauce, 2012). Cet évènement a d'ailleurs été confirmé par des expertises subséquentes réalisées par la Direction de l'Expertise Hydrique et de l'Atmosphère (DEHA) du Québec. Un troisième évènement potentiel a aussi été recensé à partir de l'analyse de photographies aériennes diachroniques datant de juin 1984 (figure 5.2). L'absence de précipitation pour la période concernée en concomitance avec une baisse significative du niveau d'eau (1,76 m) de la rivière Chaudière, entre le 3 et le 12 juin, illustre plutôt les conditions de visibilité des cônes alluviaux en fonction du niveau d'eau de la rivière Chaudière.



Figure 5.2 : Photographies aériennes illustrant l'exutoire des ruisseaux Cliche (au Nord-Ouest) et Pouliot (au Sud-Est) en date du 3 et 12 juin 1984..

L'analyse des données météorologiques pour les deux périodes ci-devant mentionnées montre des précipitations d'une faible intensité en 2003 par comparaison à celles de 2011, selon les archives d'Environnement Canada (figure 5.3). Le décret 1110-2003 fait d'ailleurs état de pluies diluviennes pour les 4 et 5 août 2011 (MELCC, 2019). Le tableau 5.1 présente les périodes de retour (PR) calculées à partir des 51 années d'enregistrement des pluies disponibles à Vallée-Jonction.

Tableau 5.1: Périodes de retour calculées en années selon une distribution de Gumbel pour les épisodes de précipitations du mois de juin 2003 et 2011.

Durée	24 h	48 h	72 h	5 Jours	10 Jours
Année					
2003	2	< 2	< 2	< 2	< 2
2011	250	100	100	75	250

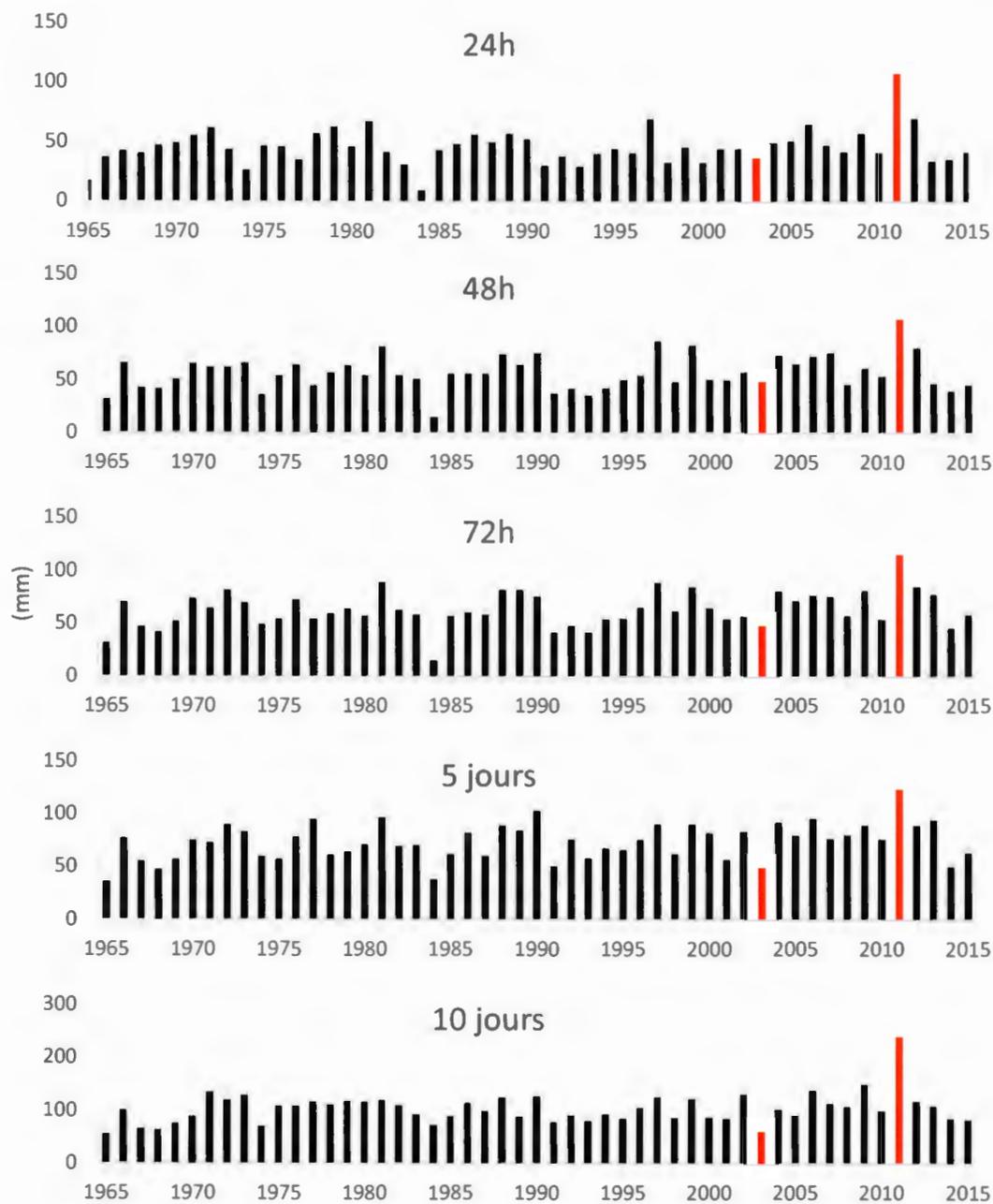


Figure 5.3: Précipitations annuelles maximales selon les données issues de la station météorologique d'Environnement Canada (2019) à Vallée-Jonction pour différents pas de temps (24 h, 48 h, 72 h, 5 et 10 jours).

Sur la base de ces deux événements, il est impossible d'affirmer que les épisodes de précipitations intenses sont les seuls responsables de la mise en place des cônes alluviaux à l'embouchure des tributaires de la rivière Chaudière. Certes, les précipitations lors du passage de l'ouragan Irène en août 2011 sont qualifiables d'extrêmes et ont vraisemblablement eu une influence sur la mise en place de plusieurs cônes alluviaux, ou du moins leur réactivation, à l'embouchure des rivières Nadeau et Lessard. En revanche, l'épisode d'août 2003 ne semble pas avoir les mêmes causes. En effet, si l'on regarde à un pas de temps de 10 jours, c'est 60 mm de pluie qui ont été enregistrés pour la période du 26 juillet au 5 août. La période de retour établie pour les précipitations enregistrées est inférieure à 2 ans (tableau 5.1), dont le seuil a été établi à 102 mm. Le cumul des précipitations journalières ne fournit toutefois pas d'indication sur les effets d'une précipitation de courte durée et d'une forte intensité capable d'accroître le débit de ces tributaires de manière significative, surtout en contexte d'un sol déjà saturé en eau (Bracken et Croke, 2007). La comparaison des événements de 2003 et 2011, dont les cônes sont situés à moins de 50 km l'un de l'autre, illustre bien le fait qu'un épisode de précipitations intenses n'est visiblement pas la cause principale, ou l'unique cause de l'édification des cônes alluviaux au long de la rivière Chaudière, puisque les précipitations de 2003 n'ayant rien d'exceptionnel à cet égard.

Dans le secteur de la Basse Chaudière, aucun cône alluvial n'a été recensé. Il s'agit cependant du secteur de la rivière Chaudière avec la pente la plus forte (3 m/ km). C'est également le secteur où les variables prédictives (relief, aire et pente.aire) sont plus petites par comparaison aux secteurs de la Moyenne et de la Haute Chaudière. Il est donc plausible que les apports sédimentaires issus des tributaires, le cas échéant, dans le secteur de la Basse Chaudière soient rapidement repris en charge par la rivière Chaudière.

5.2 Discrimination à l'échelle des bassins versants

Les analyses statistiques réalisées ont permis de cerner l'influence prépondérante de certains paramètres morphométriques des bassins versants quant à la présence ou l'absence d'un cône alluvial à l'embouchure des affluents. Le relief et le produit de la pente et de l'aire sont les variables qui permettent le plus fréquemment de différencier les bassins versants avec ou sans un cône alluvial.

La relation positive entre la pente (soit le relief du bassin versant ou la pente du cours d'eau lui-même) et l'apport de sédiments est d'ailleurs bien établie dans la littérature scientifique (Manner, 1958; Schumm, 1954; De Vente *et coll.*, 2007). Un relief prononcé augmente la vitesse à laquelle l'eau ruisselle jusqu'à un cours d'eau en plus d'en augmenter aussi la compétence. En ce qui concerne l'aire, composante de la variable pente.aire, cette relation varie beaucoup d'une région à l'autre (De Vente *et coll.*, 2007). Au Canada, à l'exception du sud de l'Ontario et des Prairies, la relation entre l'aire et l'apport sédimentaire est reconnue comme étant positive (Church *et coll.*, 1999). Cette même relation a également été documentée dans les Appalaches dans un bassin versant à environ 50 km du lac Mégantic et 100 km de la rivière Chaudière (Carson *et coll.*, 1973).

L'anthropisation favorise le ruissellement de surface et l'érosion des sols. Cette variable, difficilement quantifiable, a certes des répercussions sur la capacité de transport d'un cours d'eau et les intrants en sédiments. Il est reconnu que l'activité humaine, comme la déforestation et l'agriculture, contribue à l'érosion des sols (Lang, 2002; Bork et Lang, 2003; Kalis *et coll.*, 2003; Trimble et Mendel, 1995; Hundecha et Bårdossy, 2004; Liu *et coll.*, 2014; Bracken *et coll.*, 2007).

Somme toute, malgré l'identification des paramètres préalablement mentionnés, la discrimination statistique des bassins versants avec ou sans un cône alluvial demeure

complexe. En effet, bien que certaines différences aient été soulevées quant aux caractéristiques morphométriques des bassins versants où les cônes sont présents, ces différences demeurent peu explicites. Les investigations quant à l'organisation spatiale, les caractéristiques des bassins versants et les événements météorologiques extrêmes n'ont pas entièrement élucidé le fonctionnement des cônes alluviaux sur le territoire de la rivière Chaudière. Les discriminations statistiques ont tout de même fourni des résultats intéressants (section 4.4).

Diverses analyses statistiques ont également été effectuées quant à la présence de bancs alluviaux à l'exutoire de plusieurs tributaires. En revanche, aucun test n'a été concluant. L'accumulation de sédiment au long de la rivière Chaudière est probablement redevable, en partie du moins, à l'activité géomorphologique des tributaires. L'analyse subséquente de leur position spatiale en lien avec les secteurs à méandres, les îles, les plages, et les secteurs en érosion permettraient sans doute de mieux comprendre leur présence.

5.2.1 Rééchantillonnage statistique (bootstrap)

Afin de valider l'efficacité des arbres de classifications et de régression (CART) et l'analyse discriminante linéaire (LDA) utilisées pour l'identification de prédicteurs et la discrimination quant à la présence ou l'absence d'un cône alluvial à l'embouchure des tributaires, des rééchantillonnages de type bootstraps ont été réalisés pour un total de 1000 ré-échantillonnages. Lorsque comparés, c'est la LDA qui présente le meilleur taux de réussite quant à la classification des 142 bassins versants en fonction de la présence ou l'absence des cônes alluviaux (figure 5.4). À l'aide de cette approche, il est possible de classer correctement 76% des bassins versants. Le tableau 15 présente les moyennes obtenues en ce qui concerne la sensibilité, la spécificité et la performance globale (voir la section Méthodologie pour plus de détails) de ces deux

approches statistiques utilisées. Le tableau 5.2 montre que les CART permettent d'identifier correctement les bassins avec (*sensibilité*) ou sans (*spécificité*) un cône alluvial avec des taux de succès de 32% et 81% pour une performance globale de 66%. Finalement, la LDA discrimine relativement bien les bassins versants avec un cône (65%) de ceux qui en sont dépourvus (78%). Dans l'ensemble, cette approche statistique donne de meilleurs résultats avec une performance globale de 76%.

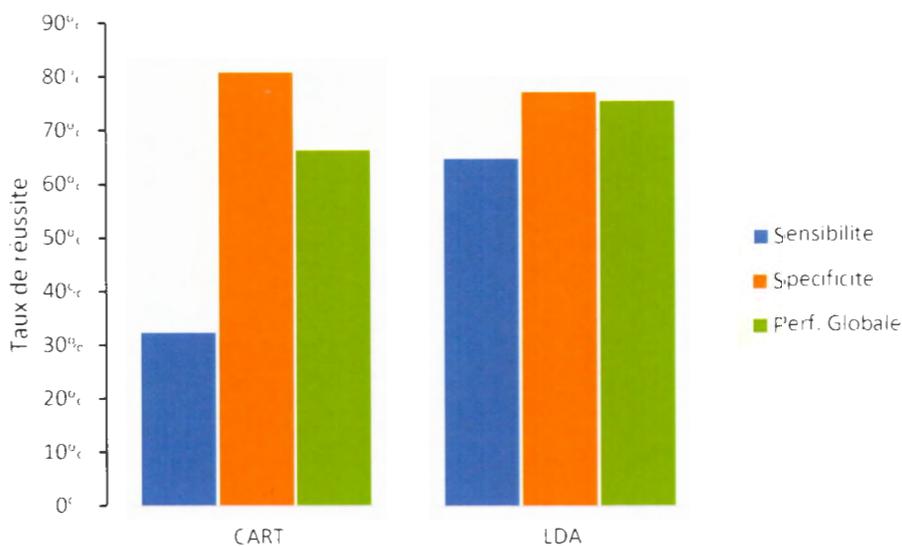


Figure 5.4: Comparaison de la performance des CART et de LDA quant à la discrimination des bassins versants avec ou sans un cône alluvial à leur confluence avec la rivière Chaudière.

Tableau 5.2: Performances de chacune des approches statistiques utilisées.

	Sensibilité	Spécificité	Performance
CART	32.4%	80.8%	66.4%
LDA	64.5%	77.7%	75.5%

5.3 La connectivité sédimentaire à l'échelle de la rivière Chaudière

La connectivité sédimentaire de chacun des tributaires serait à étudier pour mieux comprendre les dynamiques géomorphologiques de ces cours d'eau dont le fonctionnement est souvent intermittent. En ce sens, les sédiments sont plus souvent en résidence dans les zones de stockage qu'en transport (Fryirs, 2013). Il est toutefois fort probable que des tributaires jusqu'alors considérés comme inactifs en termes de mise en place d'un cône alluvial deviennent actifs dans les années à venir. Les changements climatiques et la hausse prévue des précipitations (Ouranos, 2010) pourraient être en partie responsables de cette activation.

Les zones de stockage des sédiments et leur fonctionnement ne sont pas négligeables dans la compréhension de la connectivité sédimentaire (Bracken et Croke, 2007; Fryirs, 2013; Bracken *et coll.*, 2015; Cossart et Fressard, 2017). Les sources sédimentaires n'ont toutefois pas été identifiées ni caractérisées dans la présente étude étant donné le nombre élevé de bassins versants considérés. Il s'agirait là pourtant d'une avenue intéressante pour mieux comprendre les dynamiques sédimentaires de la rivière Chaudière et ses affluents. À l'échelle de la rivière Chaudière, les cônes alluviaux eux-mêmes doivent être considérés comme des zones de stockage, plutôt qu'une finalité, tel qu'à l'échelle des affluents. L'identification des bassins versants avec un cône alluvial à l'embouchure met en lumière qu'ils sont *producteurs* de sédiments. Les sources sédimentaires dans chacun des bassins versants peuvent toutefois grandement varier en fonction des héritages quaternaires et des modifications anthropiques de l'environnement pour la période récente. Ceux-ci *produisent* des sédiments dans la mesure où ils contribuent positivement au bilan sédimentaire de la rivière Chaudière en y acheminant une bonne quantité de sédiments qui seront éventuellement repris par la Chaudière elle-même. Un relief important, une grande aire et un niveau d'anthropisation élevé sont des facteurs contribuant à la productivité et la mobilité sédimentaire dans les bassins versants

comme démontré dans le présent mémoire. L'approche de la connectivité sédimentaire se base entre autres sur la conception d'un continuum du transfert des sédiments (Bracken *et coll.*, 2014). Dans ce sens, les bassins versants des tributaires de la rivière Chaudière produisent des sédiments et les acheminent à leur embouchure, parfois sous forme de cônes alluviaux. Ceux-ci sont ensuite partiellement remaniés et repris par la rivière Chaudière pour un transport éventuel vers le fleuve Saint-Laurent.

Le présent mémoire a permis de comprendre que l'accumulation des sédiments sous la forme d'un cône alluvial à l'embouchure de nombreux affluents de la rivière Chaudière n'a pas de cause unique. Que ce soit en comparant les secteurs (Basse, Moyenne et Haute Chaudière), les rives ou même les variables morphométriques qui caractérisent chacun des bassins versants, la discrimination n'est pas aisée. La connectivité sédimentaire n'a pu être établie pour tous les bassins versants ni pour la rivière Chaudière, mais ce travail pourrait être fait maintenant que les bassins producteurs ou susceptibles de l'être ont été identifiés.

De nombreux ajouts ou compléments pourraient être apportés à ce projet de recherche. D'abord, l'hydraulique du phénomène n'a pas été abordée tout au long du travail. L'angle de confluence des cours d'eau et les variations du débit des tributaires et de la rivière Chaudière n'ont pas été étudiés alors qu'ils ont certainement un rôle clé dans la mise en place des cônes alluviaux (Benda *et coll.*, 2005). Ensuite, un recensement des événements connus de mise en place de ces cônes permettrait une meilleure compréhension des mécanismes hydrométéorologiques à l'origine de leur formation. Cet ajout serait d'autant plus pertinent dans l'optique où les changements climatiques prévus risquent d'augmenter les épisodes de précipitation intenses.

La conceptualisation de la connectivité sédimentaire au sein d'un système pose de nombreux problèmes. D'abord, l'organisation des réseaux et leur niveau de connectivité (de production ou de stockage) sont grandement variables dans le temps

et l'espace. Il s'agit qu'un bon nombre de conditions soient en place au moment où un évènement d'une intensité modérée ou faible survient pour avoir des résultats équivalents ou même supérieurs à un évènement d'une plus forte intensité (Bourgeois *et coll.*, 2017). On pourrait imaginer par exemple, un embâcle de bois qui atteint son point de rupture lors d'un épisode de précipitations modérées. L'application du concept de connectivité sédimentaire demanderait alors de représenter graphiquement chacun des bassins versants étudiés pour bien rendre compte de leur production et leur importance dans la dynamique sédimentaire de la rivière Chaudière. Bourgeois (2017) propose une représentation graphique appliquée de la connectivité sédimentaire selon la théorie des graphes. Le travail que représente cette schématisation de chacun des nœuds qui composent les bassins versants des différents affluents de la rivière Chaudière, en plus d'établir les liens entre les cônes eux-mêmes, permettrait néanmoins de mieux comprendre les dynamiques sédimentaires de la rivière Chaudière et son bassin versant.

CONCLUSION

Le but de cette recherche consistait à identifier les affluents de la rivière Chaudière *producteurs* en termes sédiments sous la forme de cônes alluviaux à partir de variables morphométriques de leur bassin versant. Ainsi, on cherchait à savoir si statistiquement il est possible de discriminer sur la base de paramètres morphométriques, les bassins versants avec un cône alluvial à leur embouchure des bassins versants qui en sont dépourvus, et ce, tout au long de la rivière Chaudière. Ces derniers causant des problématiques d'érosion et d'obstruction du libre écoulement de l'eau, il nous est apparu important de s'intéresser au phénomène. Pour se faire, 142 bassins versants ont été caractérisés à l'aide d'un SIG et par photo-interprétation. De ceux-ci, 41 (29%) présentent un cône alluvial à leur exutoire.

D'un point de vue cartographique et granulométrique, le phénomène à l'étude apparaît relativement homogène. Lorsque l'on dresse le portrait des sections que représentent la Basse, la Moyenne et la Haute-Chaudière, les résultats montrent une légère variabilité quant à la présence de bassins versants avec un cône alluvial (0%, 36% et 23%), la Basse Chaudière ne présentant aucun cône alluvial, mais quelques bancs d'accumulation. C'est également le secteur où la pente de la rivière Chaudière est la plus prononcée (3m /km) et où les bassins versants des tributaires ont en moyenne une aire plus petite et un relief moins prononcé.

Les analyses statistiques montrent que le relief, l'anthropisation et le produit de la pente des cours d'eau et de l'aire du bassin versant sont les meilleures variables pour

discriminer la présence ou l'absence d'un cône alluvial. Sans grande surprise, les bassins versants dont les variables ci-haut mentionnées présentent des valeurs élevées semblent plus propices à la formation d'un cône alluvial.

Ces différences ont été également été soulevées par les analyses en composantes principales (PCA), les arbres de classification et de régression (CART) et l'analyse discriminante linéaire (LDA). Le relief s'est encore révélé être la variable la plus importante, quoique sa corrélation avec la présence des cônes à l'embouchure des tributaires était peu élevée (0.26). Le rééchantillonnage statistique (bootstrap) a confirmé que la LDA était la meilleure méthode de discrimination statistique pour identifier les bassins versants avec ou sans un cône alluvial à leur embouchure, et ce, avec un taux de réussite avoisinant les 75%.

ANNEXE A

DONNÉES UTILISÉES POUR ANALYSES STATISTIQUES

Id	Relief	D.D.	Gravelius	Aire.Log	Cone	Ant	Cone.num	Ant.num	Hyps	Melton	Pente.Aire	Banc
1	22	0,73	1,21	0,67	B	B	0	1	0,50	0,01	3,51	0
2	14	1,72	1,34	0,45	C	B	0	1	0,49	0,01	1,92	0
3	39	1,67	1,49	1,15	C	B	0	1	0,49	0,01	6,83	1
4	17	2,56	1,24	-0,16	C	A	0	1	0,70	0,02	0,58	0
5	32	0,41	1,36	0,82	C	A	0	1	0,58	0,01	5,34	0
6	32	0,65	1,82	0,67	C	A	0	1	0,77	0,01	2,86	1
7	92	1,09	1,45	1,08	C	A	0	1	0,24	0,03	15,83	1
8	50	1,10	1,50	-0,05	C	A	0	1	0,51	0,05	2,40	1
10	93	1,14	1,48	0,74	C	B	0	1	0,61	0,04	11,75	1
11	33	1,03	1,73	0,78	C	B	0	1	0,57	0,01	3,07	0
12	46	1,85	1,28	0,57	C	A	0	1	0,72	0,02	5,69	1
13	77	1,39	1,30	0,65	C	A	0	1	0,50	0,04	11,47	0
15	63	1,60	1,87	-0,29	B	A	0	1	0,43	0,09	1,04	0
16	98	1,16	1,43	0,69	A	B	1	1	0,47	0,04	9,56	0

Id	Relief	D.D.	Gravelius	Aire.Log	Cone	Ant	Cone.num	Ant.num	Hyps	Melton	Pente.Aire	Banc
17	271	1,12	1,44	1,89	A	A	1	1	0,52	0,03	271,30	0
18	167	1,23	1,84	-0,01	C	B	0	1	0,55	0,17	4,02	0
19	170	0,84	1,54	0,34	A	A	1	1	0,64	0,11	10,97	0
20	162	0,66	1,31	0,79	A	A	1	1	0,58	0,07	26,69	0
21	142	0,42	1,49	0,23	C	B	0	1	0,64	0,11	8,92	0
22	220	0,91	1,27	1,06	A	B	1	1	0,59	0,07	52,44	0
23	233	1,08	1,31	1,46	A	A	1	1	0,40	0,04	78,51	0
24	241	1,06	2,07	1,84	C	A	0	1	0,19	0,03	53,04	0
25	290	0,72	1,49	1,64	A	B	1	1	0,63	0,04	124,13	0
27	168	1,62	1,64	0,21	A	A	1	1	0,59	0,13	10,25	0
29	150	1,51	1,67	0,09	A	A	1	1	0,69	0,14	7,74	0
30	340	1,33	1,33	1,39	A	A	1	1	0,45	0,07	127,93	0
32	469	0,66	1,48	1,59	B	B	0	1	0,43	0,08	162,07	0
33	179	0,50	1,23	0,16	B	C	0	0	0,59	0,15	14,02	0
34	182	1,42	1,64	0,52	B	A	0	1	0,59	0,10	10,55	0
35	159	1,28	1,31	0,77	C	B	0	1	0,47	0,07	13,99	0
36	480	0,78	1,72	1,86	A	B	1	1	0,54	0,06	350,55	0
37	180	0,64	1,48	0,33	C	B	0	1	0,73	0,12	12,94	0
38	439	1,06	1,49	1,69	B	A	1	1	0,39	0,06	161,43	0
39	393	0,74	1,44	1,25	A	B	1	1	0,53	0,09	76,52	0
41	142	0,69	1,35	0,37	C	A	0	1	0,49	0,09	5,29	0
42	177	1,12	1,65	0,49	C	C	0	0	0,52	0,10	7,84	0
43	194	0,81	1,59	0,92	C	C	0	0	0,62	0,07	19,50	0
45	470	0,84	1,76	1,94	C	C	0	0	0,42	0,05	204,92	0
46	156	1,00	1,33	0,23	C	C	0	0	0,68	0,12	7,21	0
48	169	0,65	1,65	0,50	C	B	0	1	0,72	0,09	9,37	0

Id	Relief	D.D.	Gravelius	Aire.Log	Cone	Ant	Cone.num	Ant.num	Hyps	Melton	Pente.Aire	Banc
49	506	1,20	1,72	1,77	A	A	1	1	0,42	0,07	215,54	0
50	184	0,49	1,66	0,83	C	C	0	0	0,64	0,07	15,53	0
53	187	0,67	1,48	0,80	C	C	0	0	0,66	0,07	12,43	0
57	376	0,89	1,53	2,07	A	A	1	1	0,49	0,03	330,23	0
66	132	1,31	1,33	0,12	C	B	0	1	0,74	0,11	5,67	0
67	196	0,86	1,29	0,16	C	C	0	0	0,68	0,16	8,68	0
70	131	0,79	1,32	0,06	C	B	0	1	0,72	0,12	6,48	0
71	204	1,13	1,48	0,40	A	A	1	1	0,66	0,13	10,79	0
75	166	0,94	1,38	-0,14	C	B	0	1	0,62	0,20	1,13	1
79	199	0,77	1,31	0,58	C	B	0	1	0,60	0,10	14,17	0
80	144	0,78	1,59	0,73	C	B	0	1	0,59	0,06	15,28	0
81	214	1,24	1,42	0,97	A	B	1	1	0,57	0,07	28,43	0
82	201	0,59	1,39	0,67	A	B	1	1	0,67	0,09	14,91	0
84	148	0,83	1,44	0,09	C	B	0	1	0,49	0,13	3,00	0
86	251	1,16	1,68	1,57	A	A	1	1	0,46	0,04	89,48	0
87	161	0,66	1,28	0,92	C	B	0	1	0,63	0,06	30,48	0
88	170	1,81	1,84	0,11	A	B	1	1	0,43	0,15	5,27	0
89	356	0,81	1,51	1,79	A	B	1	1	0,47	0,05	159,28	0
92	179	0,64	1,34	0,52	A	B	1	1	0,69	0,10	8,48	0
93	110	0,92	1,46	0,51	C	A	0	1	0,77	0,06	5,16	0
96	191	0,42	1,43	0,37	C	C	0	0	0,63	0,12	4,62	0
99	441	0,84	1,64	2,10	C	A	0	1	0,37	0,04	418,11	1
103	126	2,01	1,81	0,47	C	B	0	1	0,40	0,07	7,84	0
105	121	1,06	1,32	0,01	C	C	0	0	0,58	0,12	7,88	0
106	152	1,10	1,32	0,38	C	A	0	1	0,50	0,10	11,23	0
107	249	0,75	1,53	0,81	B	B	0	1	0,47	0,10	29,25	0

Id	Relief	D.D.	Gravelius	Aire.Log	Cone	Ant	Cone.num	Ant.num	Hyps	Melton	Pente.Aire	Banc
109	155	1,26	1,26	0,46	C	A	0	1	0,66	0,09	15,58	0
115	218	0,42	1,54	1,02	B	A	1	1	0,65	0,07	20,88	0
118	176	1,00	1,46	0,05	C	A	0	1	0,29	0,17	3,80	0
119	210	0,47	1,54	1,34	C	A	0	1	0,64	0,04	26,78	0
120	136	1,15	1,38	0,20	C	B	0	1	0,64	0,11	7,49	0
121	141	0,69	1,41	0,56	C	B	0	1	0,72	0,07	13,88	0
125	239	0,69	1,33	1,89	A	B	1	1	0,68	0,03	179,91	0
126	140	0,90	1,25	0,67	C	B	0	1	0,72	0,06	9,14	0
127	118	1,38	1,47	-0,09	C	A	0	1	0,63	0,13	0,15	0
130	137	0,84	1,43	0,58	C	B	0	1	0,69	0,07	10,27	0
133	206	0,46	1,30	1,58	C	B	0	1	0,59	0,03	61,91	0
135	111	1,25	1,80	-0,02	B	B	1	1	0,69	0,11	2,46	0
136	105	0,88	1,51	0,13	C	B	0	1	0,64	0,09	1,67	0
137	120	0,07	1,35	0,72	C	B	0	1	0,50	0,05	0,99	0
138	186	0,60	1,39	1,03	A	B	1	1	0,53	0,06	31,87	0
139	137	0,68	1,63	0,30	C	B	0	1	0,69	0,10	6,73	1
141	90	0,85	1,38	0,48	C	B	0	1	0,67	0,05	5,56	1
142	246	0,64	1,41	1,53	A	B	1	1	0,56	0,04	92,27	0
143	292	1,14	1,53	1,80	C	A	0	1	0,40	0,04	207,12	1
144	128	1,30	1,30	0,58	A	B	1	1	0,68	0,07	9,23	0
146	156	0,68	1,64	0,77	C	C	0	0	0,60	0,06	5,62	0
147	133	0,57	1,48	0,63	C	B	0	1	0,64	0,06	8,22	0
148	144	0,84	1,38	0,72	B	B	1	1	0,61	0,06	13,92	0
152	146	0,86	1,38	0,66	B	B	1	1	0,59	0,07	15,38	0
156	129	1,32	1,40	0,23	C	B	0	1	0,62	0,10	6,61	0
157	176	0,59	1,69	0,57	C	C	0	0	0,58	0,09	6,30	1

Id	Relief	D.D.	Gravelius	Aire.Log	Cone	Ant	Cone.num	Ant.num	Hyps	Melton	Pente.Aire	Banc
158	166	0,79	1,59	0,59	C	B	0	1	0,49	0,08	8,20	1
160	170	0,39	1,30	1,30	A	B	1	1	0,59	0,04	36,24	0
161	389	1,26	1,45	2,17	C	B	0	1	0,47	0,03	402,49	1
162	144	1,22	1,24	0,88	C	B	0	1	0,41	0,05	14,87	0
163	160	1,01	1,30	0,93	C	B	0	1	0,52	0,05	33,63	1
164	280	0,84	1,34	2,17	C	A	0	1	0,52	0,02	265,55	1
165	160	1,26	1,61	0,58	C	A	0	1	0,55	0,08	11,75	0
166	199	0,84	1,55	1,90	C	A	0	1	0,59	0,02	121,68	0
167	122	1,42	1,62	0,98	A	B	1	1	0,67	0,04	16,91	0
171	177	0,35	1,29	1,04	B	B	0	1	0,66	0,05	35,31	0
174	156	0,50	1,47	0,86	C	C	0	0	0,62	0,06	15,87	0
175	151	0,46	1,28	0,91	C	C	0	0	0,56	0,05	12,70	0
176	126	0,66	1,48	0,30	C	C	0	0	0,53	0,09	0,37	0
179	236	0,56	1,38	1,67	C	B	0	1	0,62	0,03	88,85	1
180	137	0,46	1,48	0,95	C	B	0	1	0,52	0,05	20,45	1
181	279	0,73	1,46	1,72	C	A	0	1	0,48	0,04	155,01	1
183	188	0,79	1,41	0,69	C	C	0	0	0,57	0,08	13,89	0
185	236	0,61	1,35	1,14	C	B	0	1	0,52	0,06	56,37	0
186	200	0,72	1,34	1,50	B	A	1	1	0,50	0,04	71,07	0
187	185	1,17	1,69	0,61	A	B	1	1	0,68	0,09	11,29	0
188	177	0,43	1,20	0,88	C	A	0	1	0,36	0,06	22,34	0
189	227	1,04	1,58	1,52	A	A	1	1	0,59	0,04	52,66	0
191	162	0,27	1,59	0,43	C	B	0	1	0,69	0,10	7,40	0
192	169	0,72	1,40	0,76	C	A	0	1	0,63	0,07	23,76	0
193	187	0,84	1,21	1,27	C	A	0	1	0,58	0,04	85,22	1
194	296	0,66	1,54	1,76	C	C	0	0	0,53	0,04	247,07	0

Id	Relief	D.D.	Gravelius	Aire.Log	Cone	Ant	Cone.num	Ant.num	Hyps	Melton	Pente.Aire	Banc
195	185	0,69	1,31	1,23	C	B	0	1	0,50	0,04	50,40	0
198	233	0,56	1,32	1,67	C	B	0	1	0,55	0,03	142,56	1
202	230	0,44	1,59	1,16	C	B	0	1	0,50	0,06	22,57	0
203	133	0,62	1,23	1,06	C	C	0	0	0,50	0,04	29,12	0
207	221	0,72	1,47	1,01	A	A	1	1	0,52	0,07	27,71	0
208	420	0,39	1,93	1,57	C	B	0	1	0,48	0,07	143,53	1
210	229	0,69	1,52	0,97	A	B	1	1	0,46	0,07	28,17	0
214	132	0,66	1,22	0,51	C	B	0	1	0,70	0,07	14,11	0
215	239	0,43	1,57	1,54	C	B	0	1	0,62	0,04	58,74	0
219	412	0,58	1,33	1,70	A	C	1	0	0,40	0,06	224,60	0
221	173	0,41	1,33	1,23	C	B	0	1	0,64	0,04	43,02	1
222	313	0,54	1,62	2,23	C	B	0	1	0,55	0,02	275,42	1
224	199	0,41	1,55	1,23	A	B	0	1	0,58	0,05	35,20	0
226	144	0,46	1,73	0,78	C	B	0	1	0,52	0,06	16,50	0
231	150	0,55	1,43	0,75	A	B	1	1	0,63	0,06	15,54	0
233	190	0,63	1,45	1,36	C	B	0	1	0,56	0,04	54,42	1
242	440	0,65	1,49	1,84	C	B	0	1	0,31	0,05	174,60	1
245	395	0,54	1,37	1,14	C	C	0	0	0,45	0,11	63,02	1
253	234	0,37	1,23	0,66	C	B	0	1	0,44	0,11	18,26	0
257	148	1,16	1,57	0,57	C	C	0	0	0,63	0,08	27,73	1
262	251	0,64	1,26	0,97	A	B	1	1	0,50	0,08	60,12	0
266	396	0,85	1,49	1,60	C	B	0	1	0,37	0,06	184,85	1
267	221	0,46	1,36	1,06	B	B	0	1	0,53	0,07	40,12	0
270	187	0,68	1,35	1,77	A	A	1	1	0,49	0,02	94,67	0

BIBLIOGRAPHIE

- Batalla, R.J., De Jong, C., Ergenzinger, P. et Sala, M. (1999). Field observations on hyperconcentrated flows in mountain torrents. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(2-3), 247-253.
- Beaty, C.B. (1990). Anatomy of a White Mountains debris flow, *Alluvial Fans: a Field Approach*, dans A.H. Raochocki et M. Church, 68-89.
- Beauce Média. (2018). Sainte-Marie-de-Beauce. Récupéré de <https://www.beaucemedia.ca/2018/02/21/la-sedimentation-progressive-de-la-chaudiere/>
- Benda, L., Andras, K., Miller, D. et Bigelow, P. (2004). Confluence effects in rivers : Interactions of basin scale, network geometry, and disturbance regimes. *Water Resources Research*, 40, 1-15.
- Best, J. (1988). Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology*, 35, 481-498.
- Beverage, J.P. et Culbertson, J.K. (1964). Hyperconcentrations of suspended sediments. *Journal of the Hydraulics Division*, 90(HY6), 117-126.
- Biron, P., Roy, A., Best, J. et Boyer, C. (1993). Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels. *Geomorphology*, 8, 115-129.

- Blair, T.C. et McPherson, J.G. (1994). Alluvial fan processes and forms. *Geomorphology of Desert environments*, 354-402.
- Blair, T.C. et McPherson, J.G. (1999). Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 69, 6-19.
- Blair, T.C. (2001). Outburst Flood Sedimentation on the Proglacial Tuttle Canyon Alluvial Fan, Owens Valley, California, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 71(5), 657-679.
- Boivin, M. (2016). *Analyse par bilan ligneux de la dynamique des bois morts à multiples échelles spatiales et temporelles dans une rivière semi-alluviale de région froide*. (Thèse de doctorat). Université du Québec à Rimouski.
- Bork, H.R. et Lang, A. (2003). Quantification of past soil erosion and land use / land cover changes in Germany. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 101, 231-239.
- Bourgeois, M., Cossart, E. et Fressard, M. (2017). Mesurer et spatialiser la connectivité pour modéliser les changements des systèmes environnementaux. Approches comparées en écologie du paysage et en géomorphologie. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 23(4), 289-308.
- 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.
- Bracken, L. et Croke, J. (2007). The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 21, 1739-1763.

- Bracken, L., Turnbull, L. Wainwright, J. et Bogart, P. (2014). Sediment connectivity : a framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 177-188.
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, C.J. et Olshen, R.A. (1984). Classification and Regression Trees, New York : Chapman and Hall.
- Brierley, G.J. et Fryirs, K. (1999). Tributary-trunk stream relations in a cut-and-fill landscape: a case study from Wolumla catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology*, 28(1-2), 61-73
- Bull, W.B. (1964). Geomorphology of segmented alluvial fan in western Fresno County, California. *USGS Numbered Series*, 352E, 89-129
- Bull, W.B. (1977). The alluvial-fan environment. *Progress in Physical Geography*, 1(2), 222-270.
- Cammeraat, L. H. (2002). A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 1201-1222.
- Caron-Fournier, E. (2009). *Stratigraphie, sédimentologie et dynamique d'un petit cône alluvial holocène du nord de la Gaspésie*. (Mémoire de Maîtrise). Université du Québec à Rimouski.
- 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*. (Thèse de doctorat). Université du Québec à Montréal.

- Carson, M. A. (1973). Sediment production in a small Appalachian Watershed during spring runoff: The Easton basin, 1970-1972. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 10(12), 1707-1734
- Church, M. (1999). Fluvial clastic sediment yield in Canada: scaled analysis. *Canadian Journal of Earth Science*, 36, 1267-1280
- Church, M. (2006). Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 325-354.
- Charlton, R. (2007). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*, London : Routledge, 234p.
- Cobaric (2014). *Territoire du COBARIC*, [En ligne]. (<http://cobaric.qc.ca/bassin-versant/territoire-du-cobaric/>). Page consultée le 23 Février 2016.
- Cobaric (1996). *Rapport final du comité de bassin de la rivière Chaudière*, [En ligne]. (http://cobaric.qc.ca/wp-content/uploads/2013/11/rapport-final-phase_1.pdf). Page consultée le 4 Avril 2019.
- Costa, J.E. (1988). Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. *Flood Geomorphology*, dans V.R. Baker, R.C. Kochel et P.C. Patton, 113-122.
- Curtis, K.E., Renshaw, C.E., Magilligan, F.J. et Dade, W.B. (2010). Temporal and spatial scales of geomorphic adjustments to reduced competency following flow regulation in bedload-dominated systems. *Geomorphology*, 118, 105-117.

- Czuba, J.A. et Foufoula-Georgiou, E. (2015). Dynamic connectivity in a fluvial network for identifying hotspots of geomorphic change. *Water Resources Research*, 51, 1401-1421.
- De Vente, J., Poesen, J., Arabkherdi, M. et Verstraeten, G. (2007). The sediment delivery problem revisited. *Progress in Physical Geography*, 31, 155-178.
- Down, P. et Gregory K. (1995). Approches to river channel sensitivity. *The Professional Geographer*, 47, 168-175.
- Florsheim, J.L., Mount, J.F. et Rutten, L.T. (2001). Effect of baselevel change on floodplain and fan sediment storage and ephemeral tributary channel morphology, Navarro River, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(2), 219-232.
- Fryirs, K. (2013). (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades : A fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 30-46.
- Fryirs, K. (2016). River sensitivity : A lost foundation concept in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 70, 55-70.
- GIEC (2014). *Changements Climatiques 2014 – Rapport de synthèse résumé à l'intention des décideurs*, [En ligne] (https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM_fr.pdf).
- Gregory, K.J. (2003). Fluvial Geomorphology, dans A.S Goudie, (dir.) *Encyclopedia of Geomorphology*, London: Routledge, p. 390-398.
- 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), 532-553.
- Hurtubise, M.-A. et Milette, S. (2014). *Géologie des formations superficielles : Région de Saint-Joseph-de-Beauce*. 1:50 000, système national de référence cartographique 021L07, Montréal.
- Jobin, A. (2019). *Impacts géomorphologiques de la tempête post-tropicale de Juillet 2014 sur un versant raide de la vallée de Mont-Saint-Pierre, Gaspésie, Québec*. (Mémoire de Maîtrise). Université du Québec à Montréal.
- Johnson, A.M. et Rodine, J.R. (1984). Debris flow. Dans D. Brunsten et D.B. Proior. *Slope Instability*, 257-361.
- Kalis, A.J., Merkt, J. et Wunderlich, J. (2003). Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe – human impact and natural causes. *Quaternary Science Reviews*, 22(1), 33-79.
- Kochel, R.C. (1990). Humid fans of the Appalachian Mountains. *Alluvial fans*, 109-129.
- Kondolf, M.A., Piégay, H., Schmitt, L. et Montgomery, D.R. (2005). Geomorphic classification of rivers and streams. *Tools in fluvial geomorphology*, 9(171), 204.
- Kostaschuk, R.A., Macdonald, G.M. et Putnam, P.E. (1986). Depositional process and alluvial fan – drainage basin morphometric relationships near Banff, Alberta, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11(5), 471-484.
- Lang, A. (2003). Phases of soil erosion-derived colluviation in the loess hills of South Germany. *Catena*, 51, 209-221.

- Liu, Y.J., Wang, T.W., Cai, C.F., Li, Z.X. et Cheng, D.B. (2014). Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the three gorges reservoir area, China. *Science of the Total Environment*, 485-486, 93-102.
- Lord, M.L., Germanoski, D. et Allmendinger, N.E. (2009). Fluvial geomorphology : Monitoring stream systems in response to a changing environment. *Geological Society of America*, 69-103.
- Magilligan, F. et McDowell, P. (1997). Stream channel adjustments following elimination of cattle grazing. *Journal of the American Water Resources Association*, 33, 867-878.
- Martin, J.-P. et Germain, D. (2016). Dendrochronological reconstruction of snow avalanche regime and triggering weather conditions : A classification tree model approach. *Progress in Physical Geography*, 40(2), 1-22.
- Marston, R.A. et Pearson, M.E. (2003). Sediment Budget, dans A.S Goudie, (dir.) *Encyclopedia of Geomorphology*, London: Routledge, p. 927-931.
- Matthews, J.A., Shakesby, R.A., McEwen L.J., Berrisford, M.S., Owen, G. et Bevan, P. (1999). Alpine debris-flow in Leirdalen, Jotunheimen, Norway, with particular reference to distal fans, intermediate-type deposits, and flow types. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 31(4), 421-435.
- Mazgareanu, I. (2019). *A GIS- and field-based investigation of main channel morphological sensitivity to tributary inputs at the watershed scale in Québec*. (Mémoire de maîtrise non publié). Université de Concordia.
- Millard, T.H., Hogan, D.L., Wilford, D.J., Roberts, B. (2010). A method to assess fan

channel networks, with a preliminary application to fans in coastal British Columbia. *Geomorphology*, 115, 286-293.

Ministère de l'Environnement - Directeur des évaluations environnementales (2003). *Projet de dragage d'urgence dans la rivière Chaudière sur le territoire de la Paroisse de Saint-Martin*. Québec : Ministère de l'environnement, Rapport d'analyse environnementale, 18.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2003). *Decret 1110-2003*, [En ligne]. (<http://www.environnement.gouv.qc.ca/evaluations/decret/st-martin.htm>). Page consultée le 14 juin 2019.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2018). *De l'eau du nord au sud, de l'est à l'ouest*, [En ligne]. (<http://www.environnement.gouv.qc.ca/rapportsurleau/portrait-Qc-aquatique-eau-nord-sud-est-ouest.htm>). Page consultée le 21 février 2019.

Ministère de la Sécurité Publique, (2018). *Principaux sinistres survenues au Québec*, [En ligne]. (<https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/se-preparer-aux-sinistres/sinistres/cartes-sinistres/inondation.html>). Page consultée le 21 février 2019.

Morrow, F. et McConchie, J. (2010). Hutt River Mouth – Fluvial sediment transport. *Opus International Consultants Limited Environmental*, 38 p.

MRC Nouvelle-Beauce, (2012). *Procès-verbal de la municipalité régionale de comté de la Nouvelle-Beauce*, [En ligne]. (http://mrc.nouvellebeauce.com/upload/mrc.nouvellebeauce/editor/asset/MRC_PV_17_janvier_2012.pdf). Page consultée le 5 mars 2017.

Musy, A. (2005). *Hydrologie générale*, Lausanne : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, [En ligne]. (<http://echo2.epfl.ch/e-drologie>). Page consultée le 12 avril 2017.

Naylor, L., Spencer, T., Lane, S.N., Darby, S.E., Magilligan, F.J., Macklin, M.G., Moller, I. (2016). Stormy geomorphologic contributions in an age of climate extremes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 190, 166-190.

Normandeau, X. (2010). *Histoire du drainage tardiglaciaire de la vallée de la rivière Chaudière et des régions avoisinantes, Québec*. (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal.

Oregon (2004). *Watershed Fundamentals*, Watershed Assessement Manual, 47p.

Ouellet, M.-A. (2010). *Écoulement hyperconcentré et risque associé : une analyse dendrogéomorphologique d'un cône de déjection en milieu forestier, Gaspésie septentrionale, Québec*. (Mémoire de Maîtrise). Université du Québec à Montréal.

Ouellet, M.-A. et Germain, D. (2014). Hyperconcentrated flows on a forested alluvial fan of eastern Canada: geomorphic characteristics, return period, and triggering scenarios. *Earth surface processes and landforms*, 39, 1876-1887.

Ouranos (2010). *Savoir s'adapter aux changements climatiques*, [En ligne]. (https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportDesjarlais2010_FR.pdf)

Ouranos (2018). *Historique des sinistres d'inondations et d'étiages et des conditions météorologiques associées*, [En ligne]. (<https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportMayerJouanjean2018.pdf>).

- Pierson, T.C. et Costa, J.E. (1987). A rheologic classification of subareal sediment-water flows. *Debris flow/Avalanches*, 1-12.
- Reid, S.C., Lane, S.N., Berney, J.M. et Holden, J. (2007). The timing and magnitude of coarse sediment transport events within an upland, temperate gravel-bed river. *Geomorphology*, 83, 152-182.
- Rice, S.C. (1998). Which tributaries disrupt downstream fining along gravel-bed rivers?, *Geomorphology*. 22, 39-56.
- Schumm, S. A. (2003). Threshold, Geomorphic, dans A.S Goudie, (dir.) *Encyclopedia of Geomorphology*, London: Routledge, p. 1051-1052.
- Smith, N. (1974). Sedimentology and bar formation in the Upper Kicking Horse River, a braided outwash stream. *Journal of Geology*, 82, 205-223.
- Strahler, A.N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *The Geological Society of America*, 63(11) 1117-1142.
- Trimble, S. et Mendel, A. (1995). The cow as a geomorphic agent- A critical review. *Geomorphology*, 13, 233-253.
- Wan, Z. et Wang, Z. (1994). *Hyperconcentrated Flow*, Rotterdam : Balkema, 290 p.
- Wells, S.G. et Harvey, A.M. (1987). Sedimentologic and geomorphic variations in storm-generated alluvial fans, Howgill Fells, northwest England. *Geological Society of America Bulletin*, 98(2), 182-198.

- Wilford D.J. et, Sakals, M.E., Innes, J.L. et Bergerud, W.A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1, 61-66
- Wilford, D.J, Sakals, M.E., Innes, J.L. et Sidle, R.C. (2005). Fans with forests : Comtemporary hydrogeomorphic processes on fans with forests in west central British Columbia, Canada. *Geological Society Special Publication*, 251, 25-40.
- Winkler, R., Moore, R.D., Redding, T.E. Spittlehouse, D.L., Carlyle-Moses, D.E. et Smerdon, B.D (2010). Hydrologic processes and watershed response. *Compendium of forest hydrology and geormorphology in British Columbia*, 133-178.