

Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

Étude de la sensibilité morphodynamique de six cônes alluviaux en Estrie par l'approche
hydrogéomorphologique

Antoine Pruneau

Essai présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographiques (M. Sc.)
Cheminement en géodéveloppement durable

Mars 2022

© *Antoine Pruneau, 2022*

Composition du jury

Étude de la sensibilité morphodynamique de six cônes alluviaux en Estrie par l'approche hydrogéomorphologique

Antoine Pruneau

Cet essai a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Mélanie Trudel, directrice de recherche

(Département de génie civil et génie du bâtiment, Faculté de génie, Université de Sherbrooke)

Thomas Buffin-Bélanger, codirecteur de recherche

(Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski)

Jérôme Théau, codirecteur de recherche

(Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke)

Frédéric Bouchard, évaluateur externe

(Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke)

Sommaire

Les cônes alluviaux sont des formations composées d'alluvions provenant d'une région de forte pente et se déposant à une rupture de pente dans le cours d'eau généralement sur une plaine alluviale. Les cônes alluviaux sont dynamiques et sont vulnérables aux événements torrentiels. Les avulsions, qui consistent au changement soudain de la position d'un chenal, et l'aggradation, soit l'accumulation de sédiments sur le lit du chenal, forment les principaux processus des cônes et contribuent aux risques qu'ils leurs sont associés. Cinq cônes dans la vallée de la rivière Coaticook à Compton, au Québec, ont été jugés prioritaires par le Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF), en collaboration avec le Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) et la municipalité régionale de comté (MRC) de Coaticook à la suite de l'endommagement d'infrastructure lors d'une crue en 2015. Un cône potentiel a aussi été ciblé à Dudswell dans le bassin versant de la rivière Saint-François, au Québec, à la suite de la destruction d'un pont d'une piste cyclable en 2019. L'objectif principal de l'essai est de caractériser la dynamique des cônes alluviaux avec l'approche hydrogéomorphologique afin de comprendre la sensibilité morphodynamique des cônes étudiés ainsi que la récurrence des dynamiques qui y surviennent. Des données terrain, acquises en 2020 et 2021, et LiDAR aéroportées, acquises en 2015 pour Compton et 2018 pour Dudswell, ont été utilisées. Les inventaires terrain ont permis de cibler les sources de sédiments et de bois morts ainsi que de localiser les ponts et ponceaux. La méthode EXZECO a été utilisée afin de déterminer la surface d'expansion des cônes et les corridors potentiels d'avulsion. Un indice de connectivité sédimentaire a aussi été utilisé afin de déterminer la probabilité d'activation des sources de sédiments. Les résultats des analyses de surface d'expansion suggèrent que les cinq cônes alluviaux de Compton pourraient potentiellement mettre à risque des infrastructures situées en aval. Certains corridors d'avulsion ont aussi été ciblés dans une zone forestière et dans une zone occupée par des maisons mobiles. Les sources principales de sédiments proviennent de l'incision et des processus de ravinement présent à la rupture de pente de quatre des cinq cours d'eau. Les cinq cours d'eau ont une source de sédiments disponible et les conditions hydrologiques les rendent susceptibles à l'aggradation et potentiellement aux avulsions. Les berges des cours d'eau en aval sont aussi peu hautes dans tous les cas. À Dudswell, les analyses révèlent un cône inactif dont le potentiel d'avulsion est faible. Les analyses montrent l'absence de surface d'expansion. Les analyses historiques révèlent cependant que le cours d'eau était

auparavant susceptible aux débordements. Deux zones à risque d'avulsion ont été ciblées en amont d'un pont et d'un ponceau, qui sont liées à de l'aggradation. Les sédiments proviennent majoritairement de l'érosion des berges. Une zone de glissement de terrain, dont l'indice de connectivité sédimentaire est élevé, pourrait être la source principale. Au final, l'essai a permis de faire une caractérisation des cônes alluviaux à l'étude et des zones potentiellement à risque ont été identifiées. Des modélisations hydrologiques et hydrauliques, des analyses de connectivité sédimentaire plus approfondies et des analyses de données LiDAR plus récentes pourraient notamment être effectuées pour la suite du projet afin de cibler des mesures de gestion de risque appropriées à l'état actuel des cours d'eau.

Mots clés : Cône alluvial, LiDAR, connectivité sédimentaire, avulsion, aggradation, EXZECO, SedInConnect

Remerciements

Je tiens à remercier ma directrice d'essai, Mélanie Trudel, et mes co-directeurs, Thomas Buffin-Bélanger et Jérôme Théau, pour leur aide constant au cours du projet. Leurs implications au projet m'ont permis de me dépasser et d'acquérir une multitude de connaissances dans un domaine qui m'était peu connu. Je suis reconnaissant de leur soutien constant qui m'a permis de rendre un travail complet. Je tiens aussi à remercier Maxime Maltais pour son aide lors des sorties terrain et sur les méthodes utilisées dans le projet. Je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur support et encouragement pendant l'entièreté de l'essai. Finalement, je remercie le ministère de la Sécurité Publique pour le soutien financier au projet et l'Union des producteurs agricoles de nous avoir mis en contact avec les agriculteurs. Je remercie aussi les agriculteurs de nous avoir permis d'accéder à leur terrain.

Tables des matières

Sommaire	i
Remerciements	iii
Tables des matières	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	ix
1. Introduction	1
1.1. Mise en contexte.....	1
1.2. Problématique.....	1
1.3. Objectifs	4
2. Cadre théorique	4
2.1. Définition, processus et facteurs de contrôle des cônes alluviaux	4
2.2. Aménagement du territoire et cônes alluviaux.....	9
2.3. Méthode de caractérisation des cônes alluviaux	14
2.3.1. Caractérisation terrain	14
2.3.2. Caractérisation par images aériennes	14
2.3.3. Caractérisation par LiDAR.....	15
2.3.4. Caractérisation de la connectivité sédimentaire	16
2.3.5. Autres méthodes de caractérisation.....	18
3. Méthodologie	19
3.1. Sites d'étude	19
3.2. Acquisition des données terrain	23
3.3. Données géospatiales et prétraitements.....	23
3.4. Traitements.....	25
3.4.1. Analyse historique des photographies aériennes.....	25
3.4.2. Analyse de la surface d'expansion et des corridors d'avulsion potentiels	26
3.4.3. Analyse de la connectivité sédimentaire	28
3.4.4. Profils en long	29
4. Résultats	30
4.1. Historique des bassins versants	30
4.1.1. Cônes de Compton	30

4.1.2. Cône du ruisseau Hall	32
4.2. Inventaire terrain	35
4.2.1. Cônes de Compton	35
4.2.2. Cône du ruisseau Hall	42
4.3. Surface d'expansion des cônes alluviaux et corridors potentiels d'avulsion	49
4.3.1. Cônes de Compton	49
4.3.2. Cône du ruisseau Hall	52
4.4. Connectivité sédimentaire	54
4.4.1. Cônes de Compton	54
4.4.2. Cône du ruisseau Hall	56
5. Discussion	58
5.1. Cônes alluviaux de Compton	58
5.2. Cône alluvial du ruisseau Hall	62
5.3. Limite des analyses	65
5.4. Recommandations	67
5.4.1. Suites des analyses	67
5.4.2. Mises à jour des données et suivi terrain.....	68
5.4.3. Intégration des connaissances générées	69
6. Conclusion.....	70
Références	71
Annexe 1 – Contexte géologique de Compton	77
Annexe 2 – Contexte géologique du ruisseau Hall	78
Annexe 3 – Fiche de caractérisation	79

Liste des figures

Figure 1 : Forme et contexte de formation d'un cône alluvial (tirée de COGESAF, 2020). La figure (a) illustre les conditions topographiques nécessaires à un cours d'eau pour la formation d'un cône alluvial, soit une région montagneuse et une plaine alluviale. La figure (b) présente un exemple à l'échelle d'un cône et de son bassin versant dans la vallée de la rivière Coaticook.	6
Figure 2 : Enrochement des deux berges le long d'un segment le long du ruisseau Hall (source : Antoine Pruneau, 2021).....	12
Figure 3 : Principe de l'affouillement aux pieds d'un pont (tirée de Deng et Cai, 2010). La vitesse et la direction des courants peuvent causer de l'érosion à la base des piliers.	13
Figure 4 : Organigramme méthodologique du projet.....	21
Figure 5 : Bassins versants des six cônes alluviaux à l'étude localisés à Dudswell (A) et Compton (B).....	22
Figure 6 : Chaîne d'opérations de la méthode EXZECO (inspirée de Pons et al., 2010). Les cercles bleus représentent les intrants du modèle, les carrés jaunes représentent les traitements et les cercles verts représentent les résultats des traitements. Les « P » représentent les paramètres de la méthode, c'est-à-dire les données qui ne changent pas entre chaque itération.	28
Figure 7 : Occupation du sol dans les bassins versants des cônes alluviaux à l'étude de Compton et les alentours pour 1945 (A) et 2018 (B).....	31
Figure 8 : Évolution des cours d'eau des bassins versants des cônes alluviaux de Compton entre 1945 et 2018. Les encadrés blancs présentent des zones ayant connu des changements marqués pendant la période étudiée.	32
Figure 9 : Occupation du sol de la partie aval du bassin versant du ruisseau Hall à Dudswell pour 1945 (A) et 2013 (B).	33
Figure 10 : Évolution du tracé du ruisseau Hall entre 1945 (jaune) et 2018 (bleu foncé). Les encadrés blancs présentent des zones ayant connu des changements marqués pendant la période étudiée.	34
Figure 11 : Signes d'avulsion du ruisseau Hall observables dans l'encadré rouge sur la photographie aérienne de 1960.	35
Figure 12 : Profil en long de la berge (vert clair) et du cours d'eau (vert foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du premier cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d'eau à l'étude (vert foncé).....	36
Figure 13 : Profil en long de la berge (bleu clair) et du cours d'eau (bleu foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du deuxième cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d'eau à l'étude (bleu foncé).	38
Figure 14 : Photographie à l'apex potentiel du deuxième cône alluvial de Compton (A) et du dépôt des sédiments un peu partout dans la forêt en aval de l'apex (B).....	38
Figure 15 : Profil en long de la berge (orange claire) et du cours d'eau (orange foncée) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du	

troisième cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d'eau à l'étude (orange foncé).	39
Figure 16 : Profil en long de la berge (jaune clair) et du cours d'eau (jaune foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du quatrième cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d'eau à l'étude (jaune foncé).	40
Figure 17 : Profil en long de la berge (mauve clair) et du cours d'eau (mauve foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du cinquième cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d'eau à l'étude (mauve foncé).	41
Figure 18 : Ponceau situé dans la zone agricole, près de la forêt, dans le cinquième bassin versant étudié à Compton	42
Figure 19 : Profil en long de la berge (gris) et du cours d'eau (noir) du bassin versant du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (noir).	43
Figure 20 : Profil en long de la berge (vert clair) et du cours d'eau (vert foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le premier segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (vert foncé).	44
Figure 21 : Profil en long de la berge (bleu clair) et du cours d'eau (bleu foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le deuxième segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (bleu foncé).	45
Figure 22 : Profil en long de la berge (orange claire) et du cours d'eau (orange foncée) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le troisième segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (orange foncée).	46
Figure 23 : Profil en long de la berge (jaune clair) et du cours d'eau (jaune foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le quatrième segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (jaune foncé).	47
Figure 24 : Pont croisant le ruisseau Hall et le chemin Lessard à Dudswell (source : Antoine Pruneau, 2021)	47
Figure 25 : Profil en long de la berge (mauve clair) et du cours d'eau (mauve foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le cinquième segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (mauve foncé).	48
Figure 26 : Surface d'expansion des cônes alluviaux, selon les variations topographiques (A). Les encadrés blancs indiquent les surfaces d'expansion des cinq cônes alluviaux de Compton. La figure B présente une combinaison des scénarios à 50 cm, 100 cm et 150 cm.	51

Figure 27 : Résultats des analyses pour la surface d’expansion du cône alluvial du ruisseau Hall selon les variations topographiques de 100 cm (jaune), 150 cm (orange) et 200 cm (rouge). La figure B présente une combinaison des trois scénarios qui représente les corridors d’avulsion potentiels dans les encadrés blancs.	53
Figure 28 : Indice de connectivité sédimentaire pour les bassins versants des cinq cônes alluviaux de Compton. Les encadrés blancs correspondent à des zones d’intérêt.	55
Figure 29 : Indice de connectivité sédimentaire du bassin versant du ruisseau Hall (A). Trois zones (encadrés blancs) d’intérêt sont identifiées en aval du bassin versant (B).	57
Figure 30 : Synthèse des observations et des analyses effectuées pour les cinq cônes alluviaux de Compton.	60
Figure 31 : Enrochement situé dans le segment 4 du ruisseau Hall à Dudswell (source : Antoine Pruneau, 2021)	63
Figure 32 : Emplacement de l’enrochement (vert) et la connectivité sédimentaire dans le bassin versant du ruisseau Hall. L’encadré blanc représente une zone de forte connectivité.	64
Figure 33 : Contexte géologique des bassins versants du site de Compton.	77
Figure 34 : Contexte géologique du bassin versant du ruisseau Hall à Dudswell	78
Figure 35 : Exemple de la fiche de caractérisation utilisée pour la campagne terrain.	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des données géospatiales et de leurs caractéristiques	24
Tableau 2 : Liste des photographies aériennes et orthophotographies ainsi que leurs caractéristiques	25
Tableau 3 : Occupation du sol dans les bassins versants des cônes alluviaux à l'étude de Compton et leurs alentours pour 1945 et 2018.....	30
Tableau 4 : Occupation du sol pour le bassin versant du ruisseau Hall et ses alentours pour 1945 et 2018.....	33

1. Introduction

1.1. Mise en contexte

Les cônes alluviaux sont des accumulations d'alluvions créées à une rupture significative de la pente d'un cours d'eau. Les cônes se forment généralement lorsqu'un tributaire provenant d'un bassin versant à fortes pentes joint la plaine alluviale d'un cours d'eau principal dont la pente est relativement faible. Les cours d'eau se trouvant dans les cônes ont généralement une pente élevée et de fortes capacités de transport (Buffin-Bélanger et Héту, 2008). Ces formations se créent un peu partout sur la planète et dans des climats différents (Ventra et Clarke, 2018).

La nature des cônes alluviaux implique que la position du cours d'eau et la forme du cône changent dans le temps. L'intensité de ces changements dans les cônes alluviaux dépend aussi des caractéristiques du bassin versant alimentant le cône, de la nature des alluvions, de la végétation qui compose le cône et de la dynamique du cours d'eau principal construisant la plaine où se forme le cône. Deux processus principaux contribuent à l'évolution des cônes : l'aggradation et l'avulsion (Reitz et Jerolmack, 2012). L'aggradation consiste en l'accumulation de sédiments sur le lit du chenal principal, augmentant donc le niveau de l'eau dans ce dernier. L'avulsion, quant à elle, consiste au changement de la position du chenal sur le cône (Buffin-Bélanger et Héту, 2008). Ce processus survient lorsque le cours d'eau principal ne peut plus contenir le volume d'eau et déborde de son lit (National Research Council, 1996). D'ailleurs, la forme d'éventail des cônes alluviaux provient des avulsions passées (Buffin-Bélanger et Héту, 2008). L'aggradation et l'avulsion sont généralement liées. En effet, plus l'aggradation du lit est rapide, plus la fréquence des avulsions augmente (Reitz et Jerolmack, 2012). La compréhension des deux processus agissant dans les cônes alluviaux est nécessaire pour évaluer les risques fluviaux sur les cônes et aider à leur gestion. La caractérisation des sources de sédiments est aussi très importante afin d'estimer la fréquence ainsi que l'intensité des événements qui surviennent dans les cônes alluviaux (National Research Council, 1996).

1.2. Problématique

Les événements torrentiels ainsi que les activités humaines peuvent potentiellement avoir des impacts sur l'ampleur de la dynamique des cônes. Tout d'abord, des événements hydrologiques de forte intensité étendus sur de petites périodes, tels que de fortes pluies, peuvent causer des réactions dans les cônes alluviaux (Ventra et Clarke, 2018). En effet, ces réponses surviennent de façon

soudaine et peuvent être violentes (COGESAF, 2020). L'un des problèmes est lié à la production et à la mobilité des sédiments dans le bassin versant alimentant le cône. En effet, les crues peuvent entraîner un mouvement soudain des sédiments dans le bassin versant du cône et provoquer une accumulation massive dans le cours d'eau sur le cône. Cette accumulation dans le cours d'eau peut ensuite générer l'avulsion du chenal en provoquant des inondations peu profondes, mais dont les vitesses seront très élevées ce qui en font des inondations dévastatrices pour les infrastructures se trouvant sur les cônes (Buffin-Bélanger et Héту, 2008). Les crues torrentielles sur les cônes transportent de grandes quantités de sédiments, mais peuvent aussi transporter du bois provoquant des embâcles. Bien que l'accumulation de bois morts puisse atténuer l'intensité de ces crues (Demers et al., 2017), les embâcles sont aussi responsables de l'avulsion du cours d'eau sur le cône en favorisant l'accumulation de sédiments. Des cônes ayant des pentes de plus de 20% peuvent créer des courants composés à plus de 50% de sédiments appelés laves torrentielles (Buffin-Bélanger et Héту, 2008). Les crues peuvent causer de nombreux dommages aux habitations et aux infrastructures se trouvant dans les zones à risque des cônes alluviaux à cause de la vitesse d'écoulement (Demers et al., 2017).

L'occupation du sol a aussi des impacts non négligeables sur la dynamique des cônes alluviaux, notamment sur le régime hydrologique. Les zones forestières limitent le ruissellement de l'eau lors de pluie. Les arbres permettent d'intercepter une partie de l'eau avant qu'elle atteigne au sol. De plus, la couche organique du sol permet de retenir des sédiments et tient le sol en place, limitant l'érosion par les cours d'eau. Les activités agricoles ont aussi un impact sur le ruissellement de l'eau. En effet, l'ajout de fossés de drainage, la linéarisation et l'augmentation de l'efficacité du drainage peuvent augmenter les débits et la quantité d'eau qui ruisselle sur le territoire agricole (Rivard, 2011). De plus, le type de culture peut aussi influencer l'apport en sédiment (AGRCQ, 2017). L'érosion des cours d'eau, augmentant avec le débit et le volume d'eau, a aussi un impact sur la quantité de matière en suspension dans les cours d'eau. Finalement, l'imperméabilisation des surfaces, comme en zone urbaine, augmente aussi le ruissellement de l'eau (Rivard, 2011).

Les changements climatiques peuvent avoir un impact sur les cours d'eau et les cônes alluviaux. Selon les prédictions, les changements climatiques vont causer une augmentation des précipitations maximales annuelles et des précipitations intenses plus fréquentes. Cela pourrait notamment avoir

des impacts sur la magnitude des débits et donc sur l'érosion des cours d'eau ainsi que sur la fréquence d'inondations (Ouranos, 2015).

Ces aléas fluviaux peuvent causer de multiples problèmes aux populations et aux infrastructures situées sur les cônes ou à proximité. Même si les cônes sont de tailles restreintes, la vallée de la rivière Coaticook, située au sud de l'Estrie au Québec, n'est pas épargnée par les risques fluviaux liés à la présence des cônes alluviaux. En effet, les territoires à proximité de différents tributaires de la rivière ont été inondés à plusieurs reprises durant les dernières années. Depuis 2004, six crues d'envergures ont eu lieu dans la vallée de la rivière. En 2015, plusieurs bâtiments ont été endommagés par des boues et graviers qui ont été déplacés dans les cônes alluviaux situés dans le bassin versant de la rivière Coaticook lors d'un événement de précipitations intenses. À la suite de ces événements, une cartographie des aléas fluviaux a été financée par le ministère de la Sécurité Publique (MSP) (Demers et al., 2017). La municipalité régionale de comté (MRC) de Coaticook a par la suite mis en place un comité de travail sur les actions pouvant être prises dans les bassins versants des cônes alluviaux afin de mieux gérer les risques. Dans le cadre d'un projet financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), et réalisé par le Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF), en collaboration avec la MRC de Coaticook et le Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), cinq cônes alluviaux, situés dans la municipalité de Compton, ont été délimités et identifiés prioritaires en raison de la présence d'habitations permanentes situées sur les cônes (COGESAF, 2020). Un portrait préliminaire de la problématique a été dressé et permet de comprendre que les bassins versants de ces cônes alluviaux sont tous caractérisés par un faible couvert forestier, par un réseau de drainage optimisé et augmenté, ainsi que par la présence d'activités agricoles en amont.

Dans le bassin versant de la rivière Saint-François, un autre secteur attire également l'attention à Dudswell dans la MRC du Haut-Saint-François. En novembre 2019, une crue importante a engendré la destruction d'un pont de la piste cyclable situé en aval du ruisseau Hall. Des mesures de la bathymétrie en 2019 avant l'événement et après l'événement montrent la mobilité du ruisseau. La possibilité de la présence d'un cône alluvial a été soulevée et nécessite une investigation.

Actuellement, peu d'informations nous permettent de comprendre et de caractériser la dynamique de ces cônes alluviaux, en termes de récurrence et d'intensité. Or, ces informations sont nécessaires pour optimiser la gestion du risque associé à la présence de ces morphologies fluviales.

1.3. Objectifs

Basé sur cette problématique, l'objectif général vise à caractériser la dynamique de six cônes alluviaux dans le bassin versant de la rivière Saint-François, dont cinq de ces derniers sont localisés dans le bassin versant de la rivière Coaticook, en utilisant une approche hydrogéomorphologique, et ce, dans le but de comprendre la récurrence de ces dynamiques ainsi que la sensibilité morphodynamique de ces formations. Ce dernier comporte cinq sous-objectifs :

1. Inventorier les sources de sédiments et de bois morts en identifiant l'état des berges et le type de végétation présente dans les cônes.
2. Inventorier les ponts et ponceaux traversant la rivière et les cours d'eau afin de déterminer leurs impacts sur la dynamique du cours d'eau.
3. Identifier les corridors d'avulsions potentiels et la surface d'expansions des cônes à partir de données LiDAR.
4. Analyser les sources sédimentaires et de bois morts dans le bassin versant pour déterminer le potentiel d'aggradation dans les cônes.
5. Analyser l'apport en sédiments des cours d'eau du bassin versant dans les cônes.

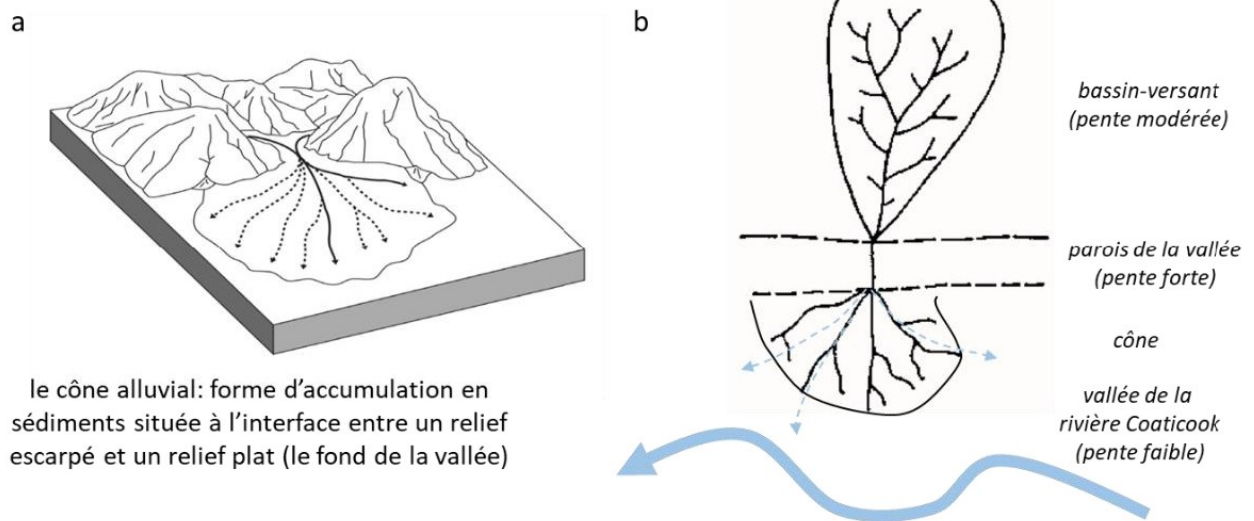
Ces analyses effectuées dans le cadre du projet permettront notamment de comprendre la dynamique des cônes alluviaux à l'étude. Par la suite, les résultats de l'essai pourront être couplés aux résultats de modélisations hydrologiques et hydrauliques ce qui permettra de mieux comprendre les risques associés aux aléas fluviaux dans les cônes.

2. Cadre théorique

2.1. Définition, processus et facteurs de contrôle des cônes alluviaux

Les cônes alluviaux sont des formations composées de sédiments transportés par un cours d'eau. Ces formations se créent à des endroits de pente faible, comme dans une plaine alluviale, lorsque le cours d'eau provient d'une région ayant une forte pente (Figure 1). Cette variation de pente donne généralement une forme convexe au chenal du cours d'eau d'un cône alluvial (National Research Council, 1996). Les cônes alluviaux peuvent se former si trois conditions sont

présentes. La première concerne les conditions topographiques dans lequel le cours d'eau se retrouve. Pour que le cône se forme, le cours d'eau doit connaître une transition entre une région montagneuse ou de forte pente et une plaine alluviale (Blair et McPherson, 2009). Les cônes se forment en raison de cette différence entre la capacité de transports des sédiments qui est plus forte en amont et qu'en aval (Clarke, 2015). La capacité de transports de sédiments se définit par la quantité maximale de sédiments que l'écoulement d'un cours d'eau peut déplacer (Zhang et al., 2009). La compétence d'un cours d'eau, c'est-à-dire la taille des particules que l'écoulement d'un cours d'eau peut transporter, est aussi plus élevée en amont (Whitaker et Potts, 2007). Une quantité de sédiments suffisante doit aussi être disponible au cours d'eau. Cela constitue la deuxième condition pour la formation d'un cône alluvial. Finalement, la troisième condition consiste en un mécanisme qui déclenche la formation du cône comme des événements torrentiels (Blair et McPherson, 2009). Les cônes sont créés par l'accumulation et la dispersion des sédiments fluviaux sur la surface du cône (COGESAF, 2020). Ces accumulations de sédiments sont formées par la diminution de la puissance de l'écoulement du cours d'eau, qui est elle-même liée à la diminution de la pente du cours d'eau. Cette perte de puissance cause la diminution de la capacité et de la compétence provoquant le dépôt des sédiments sur le lit du cours d'eau et la surface du cône. Les sédiments des cônes alluviaux sont fortement mobiles et peuvent être transportés depuis l'amont puis déposés par le cours d'eau en aval. La mobilité des sédiments permet aussi le mouvement latéral du cours d'eau par les processus de migration latérale et d'avulsion, ce qui donne la forme d'éventail aux cônes. Les cônes alluviaux peuvent être actifs ou inactifs et ils peuvent aussi être divisés en zones actives et zones non actives. Les cônes actifs et les zones actives impliquent que les processus d'érosion et de dépôt de sédiments sont susceptibles de survenir. Les zones susceptibles aux inondations correspondent aussi à ce critère. Les cônes inactifs consistent aux cônes où aucun des processus n'est survenu récemment et n'est potentiellement pas susceptible de survenir dans le contexte hydrosédimentaire actuel (National Research Council, 1996). Les cônes actifs et inactifs peuvent être recouverts de végétation laissant présager que l'endroit ne semble pas susceptible aux inondations ou autres phénomènes. Cela peut entraîner la construction d'infrastructures à ces endroits qui sont dès lors à risque (Buffin-Bélanger et Héту, 2008).



le cône alluvial: forme d'accumulation en sédiments située à l'interface entre un relief escarpé et un relief plat (le fond de la vallée)

Figure 1 : Forme et contexte de formation d'un cône alluvial (tirée de COGESAF, 2020). La figure (a) illustre les conditions topographiques nécessaires à un cours d'eau pour la formation d'un cône alluvial, soit une région montagneuse et une plaine alluviale. La figure (b) présente un exemple à l'échelle d'un cône et de son bassin versant dans la vallée de la rivière Coaticook.

Les dynamiques des cônes alluviaux sont influencées par différents processus. Les avulsions sont des processus influençant grandement la forme des cônes et forment en partie la problématique qui leur est associée. En effet, les avulsions sont des changements de direction soudaine d'un cours d'eau qui surviennent généralement lors d'événement torrentiel (Buffin-Bélangier et Héту, 2008). Ce processus est relativement imprévisible. Lors d'une avulsion, le cours d'eau emprunte le chemin le plus efficace, donc qui a généralement la pente la plus élevée. Une avulsion peut survenir lorsque la quantité d'eau transportée par le chenal est trop grande et déborde de son lit de façon soudaine. Ce débordement crée alors le nouveau chenal, qui peut devenir le nouveau chenal principal, alors que l'autre est abandonné ou partiellement abandonné (Slingerland et Smith, 2004). Lorsque le cours d'eau possède une balance en sédiments négatifs, les processus d'avulsion et de changement de direction du cours d'eau surviennent moins fréquemment. Puisque le cours a peu de sources de sédiments, ce dernier aura tendance à s'inciser (National Research Council, 1996). Le processus d'incision consiste au creusement du cours d'eau qui survient lorsque les sédiments du lit sont érodés par l'écoulement de l'eau (AGRCQ, 2017). Le cours d'eau devient alors plus creux, les risques d'avulsion sont réduits et la forme du cours d'eau devient plus stable. La mobilité des sédiments dans le cours d'eau peut aussi jouer un rôle sur la fréquence des avulsions. En effet, l'accumulation de sédiments peut augmenter le niveau du lit. Ce phénomène se nomme

l'aggradation. L'aggradation du lit peut éventuellement créer un débordement puis une avulsion (National Research Council, 1996). L'aggradation est d'ailleurs une des principales causes de l'avulsion. Plusieurs autres caractéristiques peuvent causer des avulsions. Une pente élevée, des berges peu élevées, des blocages du cours d'eau et l'augmentation de l'apport en sédiments en font notamment partie (Fuller, 2012). Les cônes alluviaux peuvent aussi être retrouvés dans différents climats. Ces différences d'environnement affectent notamment les processus de formation et de modification des cônes (Blair et McPherson, 2009).

Deux types de cônes alluviaux peuvent être observés selon l'environnement dans lequel ils se retrouvent. Le premier type est le cône caractérisé par des écoulements d'eau chargés en sédiments et le deuxième type est le cône caractérisé par des écoulements chargés en débris. Le premier type de cône est caractérisé par des sédiments relativement mobiles causant de l'érosion rapide des berges et du lit. L'aggradation est aussi rapide dans ce type de cône. L'aggradation survient généralement sur le lit et peut aussi créer des bancs de sédiments au milieu du cours d'eau qui peuvent créer de nouvelles branches au cours d'eau ou changer la direction du cours d'eau. L'érosion des berges et la formation de bancs d'accumulation peuvent aussi causer des avulsions lorsque le cours d'eau déborde de son lit. En ce qui concerne les cônes caractérisés par des écoulements de débris, ces derniers sont caractérisés par des écoulements ayant une concentration très élevée en sédiment, autant fins que grossiers. Cela crée des écoulements de boue peu perméables et directionnels. Ces écoulements peuvent être la conséquence de divers phénomènes tels qu'un apport soudain et ponctuel d'une grande quantité de sédiments fins ou grossiers directement dans le cours d'eau. L'écoulement de débris peut aussi survenir lorsqu'une source de sédiments importante est rapidement emportée par le cours d'eau (National Research Council, 1996).

Ensuite, les processus liés aux sédiments peuvent être classés en deux catégories : soit les processus primaires et les processus secondaires. L'ensemble des processus et événements qui transportent les sédiments jusqu'au cône alluvial compose les processus primaires. Ils sont à l'origine de la formation du cône, sont généralement de courte durée et sont déclenchés à la suite d'événements torrentiels. Les glissements de terrain, les écoulements de sédiments, de débris et de boue ainsi que la chute de roches sont des exemples de processus primaires pouvant contribuer à la formation d'un cône. Les processus secondaires, quant à eux, contribuent à la modification et aux déplacements

des sédiments déjà déposés dans le cône alluvial et sont les principaux processus observés. Ils ne contribuent pas nécessairement à la formation du cône, mais plutôt à sa modification (Blair et McPherson, 2009).

Différents processus peuvent être observés en dynamique fluviale et sont nécessaires à la compréhension de la dynamique des cônes alluviaux. Les processus d'érosion impliquent une connaissance de la nature et de l'origine des sédiments. L'érosion provient de la mobilisation des matériaux constituant le lit, la berge ou une surface sous la force d'agents d'érosion (Brooks et al., 2012). La contrainte de cisaillement est une variable hydraulique souvent utilisée pour expliquer l'érosion des matériaux. Cette variable se définit par la force exercée sur une surface par un écoulement en mouvement. Le seuil critique de contrainte de cisaillement correspond à la force nécessaire pour qu'une particule se mobilise (Moody et al., 2005). Ce seuil varie en fonction des caractéristiques des matériaux constituant le lit, les berges et les surfaces, telles que la taille des particules (Shi et al., 2015). L'écoulement de l'eau, le vent et le mouvement des glaces provoquent tous l'érosion. Dans les bassins versants où l'eau est le principal agent d'érosion, on distingue généralement l'érosion surfacique et l'érosion dans les cours d'eau. L'intensité des événements climatiques influence aussi le rythme de l'érosion. Les fortes pluies peuvent influencer l'érosion surfacique. En effet, l'impact des gouttes au sol peut être suffisant pour déloger des particules de sol et les transporter par ruissellement dans les cours d'eau. Un écoulement de l'eau plus intense dans un chenal augmentera aussi les taux d'érosion dans les cours d'eau. Les caractéristiques du sol peuvent aussi affecter les processus d'érosion de surface et dans les cours d'eau. La granulométrie, la porosité ainsi que l'imperméabilité des sols peuvent toutes affecter la capacité de l'écoulement de l'eau à causer de l'érosion. Ce principe s'applique aussi à la pente et la présence de végétation. Le ravinement est un processus pouvant aussi être observé dans le bassin versant des cônes alluviaux et fait partie des différents processus d'érosion dans les cours d'eau. Les ravins se forment lorsqu'un cours d'eau rencontre une rupture de pente et que ce changement de pente affecte les taux d'érosion de l'écoulement de l'eau. Le changement du taux d'érosion en aval de la rupture de pente cause alors le creusement du lit du cours d'eau et son élargissement donnant alors lieu à des berges très hautes par rapport au lit. Le ravinement peut créer à son tour de l'érosion régressive (Brooks et al., 2012). Ce type d'érosion consiste au recul du lit du cours d'eau. Ce recul se produit lorsque l'écoulement de l'eau érode le fond du lit à partir de l'aval vers l'amont, soit en sens contraire de l'écoulement (Su et al., 2014).

Les embâcles peuvent exercer une influence sur la dynamique des cours d'eau et des cônes alluviaux. En effet, les embâcles de bois morts permettent notamment la régulation des débits des crues et la rétention d'une partie des sédiments. Bien que les embâcles de bois puissent diminuer l'intensité des crues (Demers et al., 2017), ces dernières peuvent retenir une grande quantité de sédiments et créer des blocages du cours d'eau. Ce genre d'obstruction peut forcer le cours d'eau à changer de direction à cause de l'augmentation du niveau de l'eau et donc, causer une avulsion (Fuller, 2012).

2.2. Aménagement du territoire et cônes alluviaux

L'aménagement du territoire a majoritairement des impacts indirects sur les cônes alluviaux et leurs dynamiques. L'étude de Crosta et Frattini (2003) visait à identifier les impacts de plusieurs facteurs, tels que la lithologie, le type de dépôt, les caractéristiques du bassin versant et l'occupation du sol sur le type d'écoulement dans des cônes alluviaux d'une région en Italie. L'étude a montré que l'occupation du sol a plus ou moins d'impacts directs sur les processus affectant le type de cône alluvial. Les auteurs ont conclu que seulement les pâturages et les prairies ainsi que les zones forestières pourraient avoir des impacts significatifs sur les cônes alluviaux de leur étude. Les pâturages et les prairies pourraient réduire le risque d'écoulements chargés en débris alors que les zones recouvertes de végétation naturelle, telles que la végétation riveraine ainsi que la végétation peu dense dans les régions rocheuses, pourraient l'augmenter selon les auteurs. Les parcelles cultivées et les terres abandonnées n'ont pas d'impacts significatifs sur les cônes alluviaux étudiés, selon l'étude. Les auteurs ont montré que la grandeur du bassin versant peut affecter le type de cône. Un grand bassin versant est moins susceptible d'avoir des écoulements de débris. En revanche, l'occupation du sol a un effet indirect sur l'apport en sédiments dans les cônes alluviaux (Crosta et Frattini, 2003). Les sédiments peuvent être divisés en deux catégories, soit les sédiments grossiers, tels que le gravier, correspondant généralement à la charge de fond, et les sédiments fins, comme les limons et les sables fins, qui correspondent généralement à la charge en suspension. Les sédiments grossiers se déplacent sous la puissance de l'écoulement des cours d'eau sans être en suspension dans l'eau. Ils sont déplacés par le roulement des particules sur le lit ou encore par saltation alors que les sédiments fins se déplacent par la turbulence de l'eau qui met les particules en suspension. Une puissance plus grande est nécessaire pour déplacer les particules plus grossières et donc, la charge de fond provient généralement des berges et du lit du cours d'eau directement (Chanson, 2004). D'ailleurs, l'augmentation des vitesses de l'écoulement augmente la capacité des

cours d'eau à faire de l'érosion et donc, à transporter les sédiments (AGRCQ, 2017). Le couvert végétal, le type de sol et une multitude de facteurs affectent le déplacement des sédiments dans un bassin versant. Les zones agricoles ont en général un réseau de drainage bonifié, ce qui augmente le ruissellement et l'érosion dans les cours d'eau (Demers et al., 2017). L'ajout de fossés agricoles augmente d'ailleurs l'intensité des crues notamment en ce qui concerne les vitesses d'écoulement et peut affecter les débits d'étiage (Rivard, 2011). Les cultures dont les sols sont plus dénudés vont aussi avoir un impact sur l'apport en sédiments en suspension dans les cours d'eau. C'est le cas des cultures de soja et maïs qui ont un plus grand apport en sédiments que les champs de foin ou encore les pâturages. En effet, plus l'espace entre les rangs de la culture est grand, plus il y aura du ruissellement. Les bandes riveraines permettent quant à elles de réduire l'érosion de surface et dans le cours d'eau en retenant le sol en place (AGRCQ, 2017). Les forêts permettent de réduire le ruissellement au sol de l'eau en interceptant les pluies et la couche organique retient les sédiments (Rivard, 2011). La structure de la végétation exerce une influence sur le ruissellement et permet d'augmenter l'infiltration dans le sol (Cammeraat, 2004). Finalement, les zones urbaines font augmenter le ruissellement puisqu'elles présentent une grande quantité de surfaces imperméables. Ce genre de surface accélère notamment la vitesse que prend l'eau pour rejoindre un cours d'eau. Cela entraîne notamment une augmentation des débits de pointes (Rivard, 2011). En général, plus le type d'occupation du territoire favorise l'intensité du ruissellement, plus il affectera la dynamique des cônes alluviaux et aura potentiellement des effets négatifs sur les infrastructures (Demers et al., 2017).

L'érosion des berges est un phénomène qui peut avoir des effets indésirables sur l'environnement et les activités anthropiques. Bien que ce soit un phénomène naturel et commun qui fait partie de la dynamique d'un cours d'eau, plusieurs éléments, tels que l'occupation du sol et certaines installations anthropiques, peuvent l'accélérer (Brooks et al., 2012). Certains facteurs de contrôle peuvent être mis en place afin de réduire en partie l'érosion et l'apport en sédiments dans un cours d'eau. L'un des moyens souvent mis en place afin de réduire la migration latérale du cours d'eau et l'érosion des berges du cours d'eau est l'enrochement (Figure 2). Cette pratique peut autant être retrouvée en zone agricole qu'en zone urbaine pour la protection des infrastructures (Reid et Church, 2015). L'enrochement des berges est aussi une activité importante à considérer lors de l'analyse de la dynamique sédimentaire d'un cours d'eau. En effet, malgré les bienfaits de ces installations sur l'érosion, l'enrochement cause aussi des problèmes sur ce même aspect.

L'enrochement a comme effet d'accélérer l'écoulement de l'eau en aval de la zone enrochée et de réduire l'apport en sédiment de cette zone. Cette augmentation de la vitesse peut augmenter l'érosion des berges en aval de l'enrochement et la réduction de l'érosion des berges peut entraîner l'incision du lit dans la zone enrochée. Les enrochements sont souvent associés à une baisse de bois morts dans le cours d'eau, ce qui élimine en partie les bénéfices des embâcles dans les cours d'eau (Demers et al., 2017). Selon l'équation de Manning, la rugosité du lit et des berges, qui est notamment affectée par un enrochement, influence la vitesse des écoulements dans un cours d'eau. L'équation de Manning est présentée à l'équation 1.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

où V représente la vitesse d'écoulement (m/s), R_h représente le rayon hydraulique (m), S correspond à la pente de la ligne d'énergie (m/m) et n le coefficient de rugosité de Manning (Coon, 1998). Le rayon hydraulique se définit par le rapport entre la surface d'écoulement de l'eau et le périmètre qui se retrouve en contact avec l'eau (Rivard, 2011). Le coefficient de rugosité de Manning varie en fonction de la composition des berges telles que la présence de végétation, la granulométrie des sédiments et la forme du cours d'eau (Coon, 1998). Dans le cas des enrochements, ces derniers augmentent notamment la rugosité des berges, qui par la suite, augmente le niveau d'eau de la rivière, mais réduit la vitesse de l'écoulement dans la section enrochée (Fischenich, 2003).

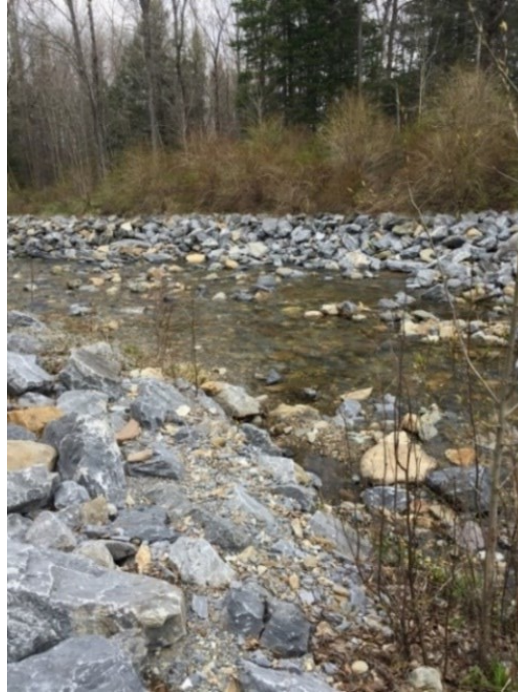


Figure 2 : Enrochement des deux berges le long d'un segment le long du ruisseau Hall (source : Antoine Pruneau, 2021).

La modification des cours d'eau peut entraîner de l'érosion dans le cours d'eau et une sédimentation excessive dans ce dernier si les travaux de modification sont mal effectués (Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, 2012). La linéarisation des cours d'eau notamment peut causer une augmentation de l'incision des cours d'eau. En forçant le cours d'eau dans une position linéaire, l'équilibre entre l'érosion et le transport de sédiments est perdu. Le cours d'eau va donc chercher un nouvel équilibre en s'incisant et par l'érosion des berges, augmentant donc la charge de sédiment en suspension dans le cours d'eau (AGRCQ, 2017). La construction d'une digue a aussi des impacts sur la dynamique des cours d'eau. Les digues sont des installations qui servent à rediriger un cours d'eau problématique. Cependant, afin d'assurer l'efficacité d'une digue, plusieurs éléments doivent être considérés. Tout d'abord, l'eau doit être déviée vers une zone stable, soit une zone qui ne sera pas affectée par de l'érosion excessive ou encore de l'aggradation, afin de ne pas déplacer le problème. Ensuite, la digue doit aussi être stabilisée. La plantation d'arbres et de végétaux est notamment un moyen de stabilisation souvent utilisé. Le dragage des cours d'eau est aussi une pratique couramment utilisée. Cette pratique sert notamment à retirer des sédiments et débris du fond d'un cours d'eau (Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, 2012). Le dragage peut aussi servir à augmenter la capacité du cours d'eau à recevoir un plus grand volume d'eau (Gouvernement du Canada, 2016). En revanche, cette

opération peut augmenter la sédimentation dans la section draguée ainsi que la quantité de sédiments en suspension dans l'eau (Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, 2012) et les risques associés aux cônes alluviaux (National Research Council, 1996).

Les ponts et ponceaux peuvent aussi être problématiques. Un pont est une infrastructure qui traverse un cours d'eau alors qu'un ponceau est une infrastructure couverte et enfouie au niveau de l'eau permettant le passage de l'écoulement. Un débit trop élevé pour ce genre d'infrastructure peut notamment créer des inondations. Cela peut survenir lorsqu'un pont ou ponceau ne laisse pas suffisamment d'espace pour le passage de l'eau et qu'il y a du refoulement. Un pont ou ponceau mal construit peut aussi avoir des impacts sur la sédimentation en particulier lors de leur construction (Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, 2012). Les ponts et leurs piliers peuvent notamment causer de l'affouillement, c'est-à-dire de l'érosion et de la sédimentation (Figure 3). Ce phénomène peut se produire de différente façon telle qu'au pied des piliers, sur le lit du cours d'eau ou encore sur les berges. L'affouillement, notamment sur le lit, est intensifié avec la vitesse des courants. La vitesse de l'eau peut d'ailleurs être augmentée lors de son passage sous un pont. En effet, si l'espace sous le pont est plus petit que la largeur du cours d'eau, le courant sera plus rapide (Deng et Cai, 2010). D'ailleurs, les cônes alluviaux ne sont pas propices à l'installation de ce genre d'infrastructure. Les processus d'aggradation notamment peuvent affecter l'intégrité des ponts. Cependant, des ponts peuvent être installés près de l'apex (Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador, 2018).

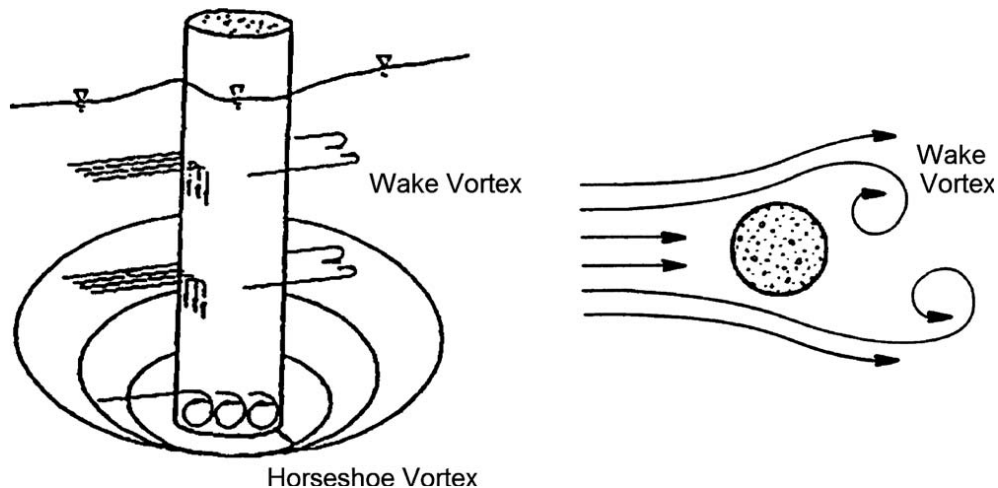


Figure 3 : Principe de l'affouillement aux pieds d'un pont (tirée de Deng et Cai, 2010). La vitesse et la direction des courants peuvent causer de l'érosion à la base des piliers.

2.3. Méthode de caractérisation des cônes alluviaux

2.3.1. Caractérisation terrain

Plusieurs méthodes de caractérisation peuvent être utilisées afin de caractériser des cônes alluviaux. Une des méthodes très importantes est la caractérisation terrain par des experts et celle-ci est nécessaire afin de bien comprendre les dynamiques et les risques d'inondation selon le National Research Council (1996). La granulométrie, leur morphologie et leur localisation permettent toutes de monter un portrait des cônes à l'étude. L'évaluation terrain est aussi importante afin de caractériser le type d'écoulement et déterminer les parties actives des cônes, en ciblant notamment des signes de dépôts de sédiments récents. Les limites des cônes et l'apex peuvent aussi être observés sur le terrain (National Research Council, 1996). Les données terrain sont récurrentes dans la littérature. Ces dernières sont utilisées dans une multitude d'articles afin de caractériser plusieurs aspects des cônes alluviaux et de confirmer des hypothèses. Cependant, cette méthode est généralement combinée à d'autres méthodes telles que l'analyse de données LiDAR, de photographies aériennes ou de modélisation.

2.3.2. Caractérisation par images aériennes

Les photographies aériennes et les orthophotographies sont couramment utilisées pour analyser certains aspects des cônes alluviaux. Scorpio et al., (2014) ont identifié les limites des cônes alluviaux à l'aide de photographies aériennes dans le domaine du visible et du proche infrarouge. Ce genre d'information peut être identifié grâce aux textures et aux couleurs qui diffèrent en fonction de l'âge des dépôts visibles au sol. Les anciens chenaux, les avulsions et les zones ayant subi des inondations peuvent aussi être identifiés à partir de ce genre de données (National Research Council, 1996). Les surfaces actives des cônes peuvent aussi être identifiées à l'aide de photographies historiques. En utilisant cette méthode de photo-interprétation, la position et les formes du chenal principal au fil des années peuvent être observées afin de déterminer si des avulsions sont survenues historiquement (Fuller, 2012). Tomczyk et al. (2019) ont caractérisé la surface d'un cône alluvial en Norvège à l'aide d'imagerie à haute résolution prise par drone. Les auteurs ont produit des orthomosaïques à l'aide des images recueillies avec le drone. En combinant ce produit avec un MNT, des profils en long et transversaux ainsi que des évaluations terrains, les données ont permis d'identifier différents types de dépôts sur la surface du cône, les chenaux actifs, d'anciens chenaux ainsi que plusieurs autres caractéristiques du cône à l'étude. La méthode d'acquisition par drone offre notamment des résolutions spatiales et temporelles avantageuses. En

effet, l'imagerie satellite et les photographies aériennes acquises par avion offrent une couverture temporelle beaucoup moins intéressante notamment puisque les formes des cônes alluviaux peuvent évoluer rapidement. Cependant, ce genre d'étude peut être limité par les conditions météorologiques et la différence de pente observée sur ces formations peut compliquer l'acquisition des données. L'imagerie de drone a aussi été utilisée par de Haas (2014), pour effectuer une étude similaire où cette technologie a permis d'analyser les textures et la morphologie d'un cône au Chili.

2.3.3. Caractérisation par LiDAR

La caractérisation des environnements fluviaux peut être faite de plusieurs façons. En revanche, les données topographiques sont nécessaires afin de bien caractériser ce genre d'environnement (Notebaert et al., 2008). Le LiDAR aéroporté est d'ailleurs de plus en plus utilisé pour la caractérisation des cônes alluviaux et plusieurs études en font mention. Cavalli et Marchi (2008) ont utilisé des données LiDAR afin de caractériser la morphologie et la topographie d'un cône situé en Italie dont la surface était recouverte de végétation. À l'aide des données, les auteurs ont produit un indice de rugosité permettant de visualiser des variations locales de la topographie. Cela permettait notamment d'observer les endroits ayant été affectés par un écoulement de débris. Des données sur la courbure de la surface du cône ont aussi été produites. Ce produit dérivé permet de visualiser les changements de direction de la pente dans le cône et permet d'identifier notamment des éléments non visibles sur les MNT. À l'aide de cette méthode, les auteurs ont identifié notamment d'anciens chenaux et les anciennes directions de l'écoulement. Une étude similaire a été faite par Frankel et Dolan (2007) qui, à l'aide du LiDAR, ont identifié un lien entre l'âge de la surface d'un cône et sa rugosité. De Haas et al. (2019) ont utilisé le LiDAR afin de déterminer le potentiel d'avulsion des quelques cônes alluviaux (écoulement de débris) en Californie aux États-Unis. Leur méthode se basait sur l'évaluation de la hauteur et la largeur des berges, la profondeur du cours d'eau ainsi que la différence de hauteur entre le lit du cours d'eau et l'élévation la plus faible de la zone séparant deux chenaux. L'étude montre qu'il est possible d'identifier des zones d'avulsions potentielles à l'aide de données topographiques à haute résolution, disponibles par le LiDAR.

Une autre méthode pouvant être utilisée dans l'étude des cônes alluviaux est la méthode EXZECO. Cette méthode a été conçue par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement afin de calculer l'écoulement des eaux (Cerema). La chaîne

d'opération d'EXZECO consiste à la simulation d'écoulement des eaux à l'aide d'un MNT, pouvant être un produit dérivé du LiDAR. La méthode inclut une variation topographique aléatoire déterminée par l'utilisateur afin de simuler des modifications au territoire telles que l'aggradation ou encore des accumulations de bois morts sur l'ensemble du MNT. Cette méthode est notamment utilisée afin de déterminer les zones susceptibles aux crues soudaines (Cerema, 2020). Elle a été adaptée pour une utilisation sur des bassins versants de petite taille (Pons et al. 2020) notamment afin de cartographier les zones susceptibles aux inondations. L'intérêt envers cette méthode dans la caractérisation des cônes alluviaux est la simulation des trajectoires d'écoulement potentiel d'un cours d'eau afin de déterminer les secteurs à risque.

Indirectement, le LiDAR permet aussi l'étude des profils en long et des profils transversaux. Les profils transversaux sont en revanche peu étudiés, mais permettent d'obtenir de l'information sur le potentiel d'avulsion en observant l'aggradation du lit. Les profils en long peuvent notamment indiquer la présence de certains processus tels que l'érosion, des embâcles et de l'aggradation (Blair et McPherson, 2009). Les profils en long peuvent aussi aider à identifier le type de dépôts de sédiments retrouvés dans le cône. En effet, un cône ayant une pente entre 25 et 35° par exemple, peut indiquer la présence de grosses roches et un cône ayant une pente très faible sera caractérisé par des dépôts plus fins (Stock et al., 2008).

2.3.4. Caractérisation de la connectivité sédimentaire

Les cônes alluviaux sont créés par l'accumulation en sédiments en provenance d'un cours d'eau. Il est donc important de caractériser la dynamique sédimentaire afin de mieux comprendre leurs processus. La connectivité sédimentaire est un concept qui peut se définir par le potentiel des sédiments à se déplacer dans un bassin versant et ses cours d'eau (Blanpied et al., 2018). La connectivité sédimentaire est importante afin de déterminer et comprendre la dynamique sédimentaire d'un cours d'eau et de son bassin versant (Zingaro et al., 2019). Elle est aussi importante afin de mieux comprendre l'origine des sédiments et d'entreprendre des mesures de gestion appropriées (Croke et al, 2005). Plusieurs éléments peuvent influencer la connectivité sédimentaire d'une région, qui varie d'ailleurs dans le temps (Persichillo et al., 2018) et est hétérogène dans l'espace (Borselli et al., 2008), et encore plusieurs incertitudes persistent en ce qui concerne l'approche à utiliser notamment due à la complexité de la dynamique des sédiments (Zingaro et al., 2019). En effet, la topographie, les modifications du territoire, la végétation et le

drainage peuvent tous exercer une influence sur la connectivité sédimentaire (Persichillo et al., 2018).

Plusieurs indices, méthodes et outils permettant d'évaluer la connectivité sédimentaire ont été développés dans les dernières années. Van Rompaey et al. (2001) ont utilisé une approche simple permettant de prédire l'apport en sédiments vers les rivières d'une région. L'algorithme utilisait la pente la plus forte afin de prédire le mouvement des sédiments dans une région de la Belgique. Trois composantes étaient utilisées dans un modèle de type distribué. La première était la moyenne du taux d'érosion, la deuxième était la capacité de transport moyenne et finalement la troisième portait sur un algorithme qui redistribuait les sédiments disponibles sur la grille de la zone d'étude. Cependant, les résultats prédisaient seulement approximativement la distribution des sédiments et seulement deux facteurs de capacité de transport ont été utilisés. Plusieurs éléments pouvant affecter le déplacement des sédiments n'étaient pas pris en compte dans le modèle.

Borselli et al. (2008) discutent de deux méthodes permettant d'évaluer la connectivité sédimentaire, soit une à partir d'un système d'information géographique (SIG) et une à partir de données terrain. En ce qui concerne l'approche SIG, l'indice défini utilise deux variables principales. La première correspond au potentiel de déplacement vers l'aval des sédiments et la deuxième correspond à la distance entre les sédiments et la cible la plus proche. Deux facteurs de pondération sont utilisés dans l'indice, soit la pente et l'impédance du sol. Une pente minimum a été incluse dans le modèle afin de s'assurer d'obtenir des valeurs dans un intervalle de $-\infty$ à $+\infty$. L'impédance est déterminée en fonction du type de sol et de l'occupation du sol. L'approche terrain quant à elle consistait à évaluer les mêmes variables, mais en fonction d'indices sur le terrain.

Cavalli et al. (2013) ont utilisé une méthode à partir de données dérivées LiDAR afin de calculer l'indice de connectivité sédimentaire d'une petite région alpine en Italie où un cône alluvial est localisé. L'indice est calculé à partir d'une méthode exploitant un SIG. L'algorithme pour calculer la connectivité sédimentaire utilisée par les auteurs a été adapté de l'étude de Borselli et al. (2008) pour optimiser l'utilisation de MNT à haute résolution et pour l'utilisation de l'indice en région montagneuse. Les deux mêmes variables de Borselli et al. (2008) sont calculées, et ce, à l'aide d'un facteur de pondération calculé à partir de la rugosité du sol et la pente moyenne de la zone à l'étude. Une des principales modifications porte sur la modification du facteur pente qui a été modifié afin d'ajouter une valeur maximale. Les valeurs de pente très élevée augmentent significativement la

valeur de l'indice de connectivité. En ajoutant une valeur maximale, les auteurs évitaient de biaiser les résultats en limitant le potentiel de l'apport en sédiments des régions très escarpées qui ne peuvent pas nécessairement stocker des sédiments. Ensuite, le calcul permettant de déterminer la direction de l'écoulement a été adapté afin de permettre un écoulement diffus. La méthode permet à l'écoulement de se faire dans plusieurs cellules contrairement à la méthode de Borselli et al. (2008). Finalement, la dernière modification portait sur le facteur de pondération qui dans ce cas-ci porte sur la rugosité de la surface qui est calculée en utilisant les valeurs de pente. Cet indice a d'ailleurs été intégré dans une application *Stand Alone* créée par Crema et Cavalli (2018). Cet outil, nommé *SedInConnect*, permet d'évaluer la connectivité sédimentaire d'une région à partir d'un MNT à haute résolution. L'application *SedInConnect*, détermine le potentiel qu'une source de sédiments soit déplacée jusqu'à une cible spécifique. L'outil a été utilisé dans plusieurs études telles que celle de Haselberger et al. (2018) qui ont combiné un modèle sur l'érosion des sols et l'indice de connectivité de Cavalli et al. (2013), par l'entremise de *SedInConnect*, afin de cibler les points sensibles à l'érosion dans une région agricole. Blanpied et al. (2018), ont aussi utilisé l'outil afin de déterminer la contribution en sédiments des sous-bassins d'une région où de grandes crues sont survenues dans une chaîne de montagnes en Europe.

2.3.5. Autres méthodes de caractérisation

Plusieurs types de modèles ont été développés et suggérés afin de caractériser les cônes alluviaux. L'étude de Fuller (2012) avait pour but de proposer une méthodologie afin de déterminer les corridors d'avulsion potentiels de cônes alluviaux en Arizona. Cinq étapes sont nécessaires selon l'auteur et trois de celles-ci portent sur des modélisations. La première étape consiste à déterminer si le cône est propice aux avulsions, notamment à l'aide d'étude historique. Cela peut se faire sous forme d'analyse de photographies aériennes et en analysant le profil stratigraphique du sol du cône. Le profil stratigraphique peut être effectué en analysant les berges exposées des cours d'eau. Ce dernier peut permettre l'identification de dépôts de sédiments indiquant la présence d'un ancien chenal ou d'inondation précédente. La deuxième étape est l'analyse géomorphologique de la surface du cône notamment par des évaluations terrain et l'évaluation des risques d'un écoulement de débris. La troisième étape est la modélisation hydrographique des cônes. Cette modélisation doit être effectuée à partir de l'apex du cône afin de déterminer les zones inondables. La quatrième étape est la modélisation du transport des sédiments sur la surface du cône à partir de son apex. Cette étape a pour but d'estimer le potentiel de dépôt des sédiments. La dernière étape

est de délimiter les zones inondables afin de déterminer les zones plus à risque. Dans un but similaire, Reitz et al. (2010) ont produit un modèle simple permettant de cibler les zones d'avulsion potentielles. À partir de l'apex du cône, des avulsions étaient simulées à l'aide de données topographiques acquises par laser et de variations topographiques aléatoires. Les résultats révèlent que certains chemins sont plus susceptibles d'être empruntés par les cours d'eau. Les modèles peuvent aussi servir à caractériser les inondations sur les cônes alluviaux a posteriori comme l'étude de Kain et al. (2018) le montre. Des modèles hydrauliques combinés à de l'information terrain, du LiDAR ainsi que des photographies aériennes, ont été utilisés afin de caractériser des inondations survenues en 2011 et 2016 sur un cône situé en Australie. La combinaison de ces informations a permis de comprendre les processus qui sont survenus pendant les événements tels que le type d'écoulement, la source des sédiments et l'étendue potentielle des inondations.

3. Méthodologie

La méthodologie est divisée en trois sections principales. La première partie traite des prétraitements des données, qui consistent au géoréférencement des photographies aériennes et à la préparation des données LiDAR pour les analyses. La deuxième étape porte sur la prise de données GPS sur le terrain et à la production des différents inventaires. Finalement, la dernière étape consiste aux traitements des photographies aériennes, les orthophotographies et les données LiDAR. La figure 4 présente les principales chaînes d'opérations permettant d'atteindre les objectifs fixés. Les opérations spatiales ont été effectuées dans les logiciels ArcGIS 10.5 et l'application SedInConnect de Crema et Cavalli (2018).

3.1. Sites d'étude

Les six cônes alluviaux à l'étude sont localisés sur deux sites différents. Le premier site se trouve dans la municipalité de Compton dans le bassin versant de la rivière Coaticook, en Estrie, et cinq des cônes y sont localisés (Figure 5B). Les bassins versants des cônes sont tous adjacents et leur dimension varie de 0,08 à 0,32 km². Ces derniers sont tous caractérisés par des zones boisées en aval. Pour ce qui est des bassins versants 3, 4 et 5, des terres agricoles occupent la majorité du territoire situé en amont. Pour ce qui est des deux autres, la partie en amont est composée de deux territoires agricoles séparés par un boisé. En ce qui concerne le contexte géologique, le principal type de dépôt sédimentologique est du till en couverture continue. Les zones situées plus en aval sont de type alluvion de terrasse fluviale (Annexe 1).

Le deuxième site est situé à Dudswell, en Estrie, à environ 40 km de Sherbrooke. Le bassin versant à l'étude est celui du ruisseau Hall et a une superficie de 10,93 km². Il est localisé dans le bassin versant de la rivière Saint-François (Figure 5A). Le ruisseau Hall se déverse dans le lac Miroir et est situé en zone agricole en aval. La zone située en amont est majoritairement forestière. Une zone habitée et une piste cyclable se retrouvent sur les berges du lac Miroir. Le bassin versant à plusieurs types de dépôt sédimentologique. La plus grande partie du territoire est située en zone de till mince et discontinue. Deux zones de roche en place sont situées au nord-ouest et sud-ouest. Près du lac Miroir, des sédiments glaciolacustres deltaïques et prodeltaïques ainsi que des sédiments juxtaglaciaires sont observables (Annexe 2).

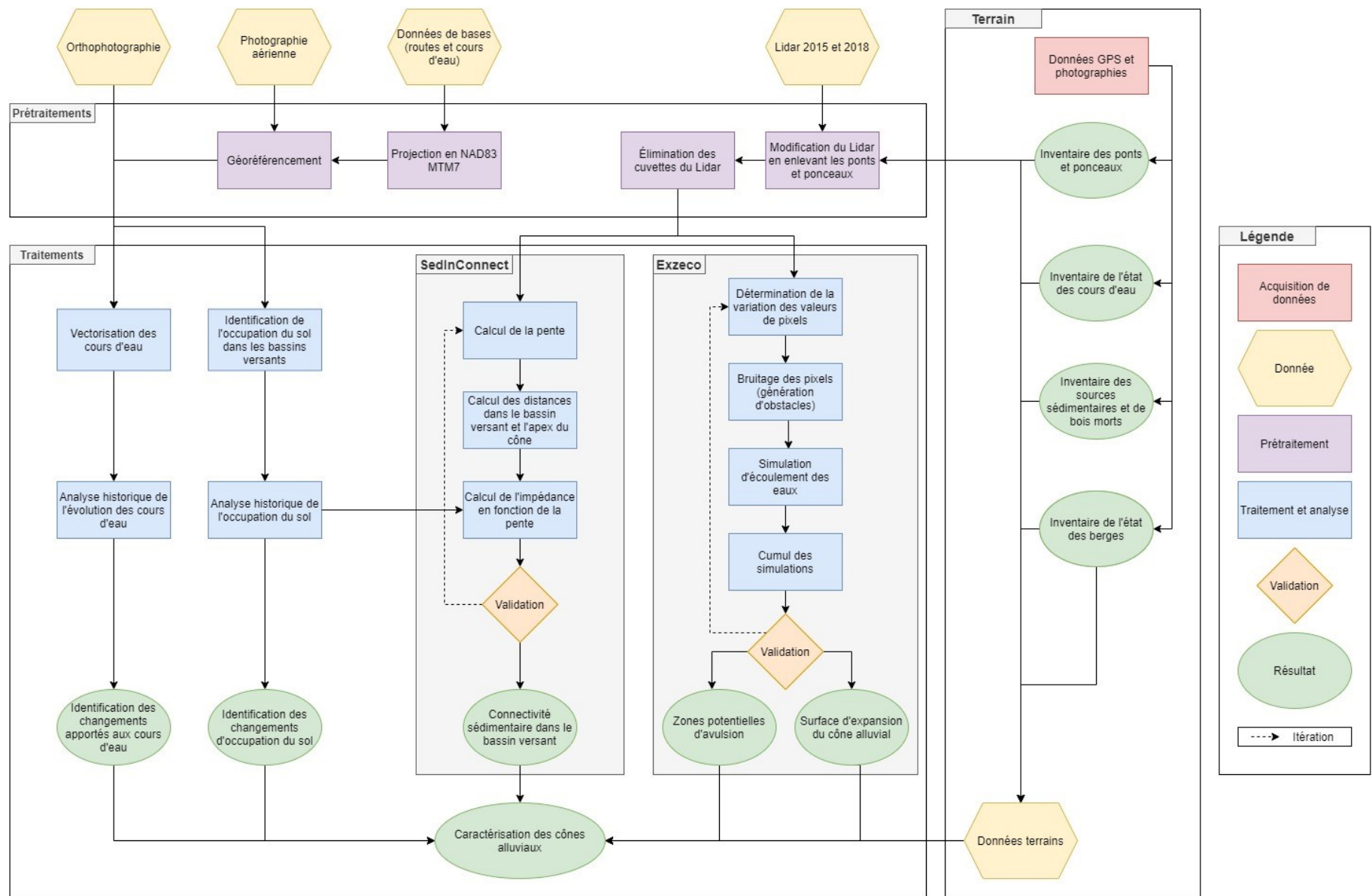


Figure 4 : Organigramme méthodologique du projet.

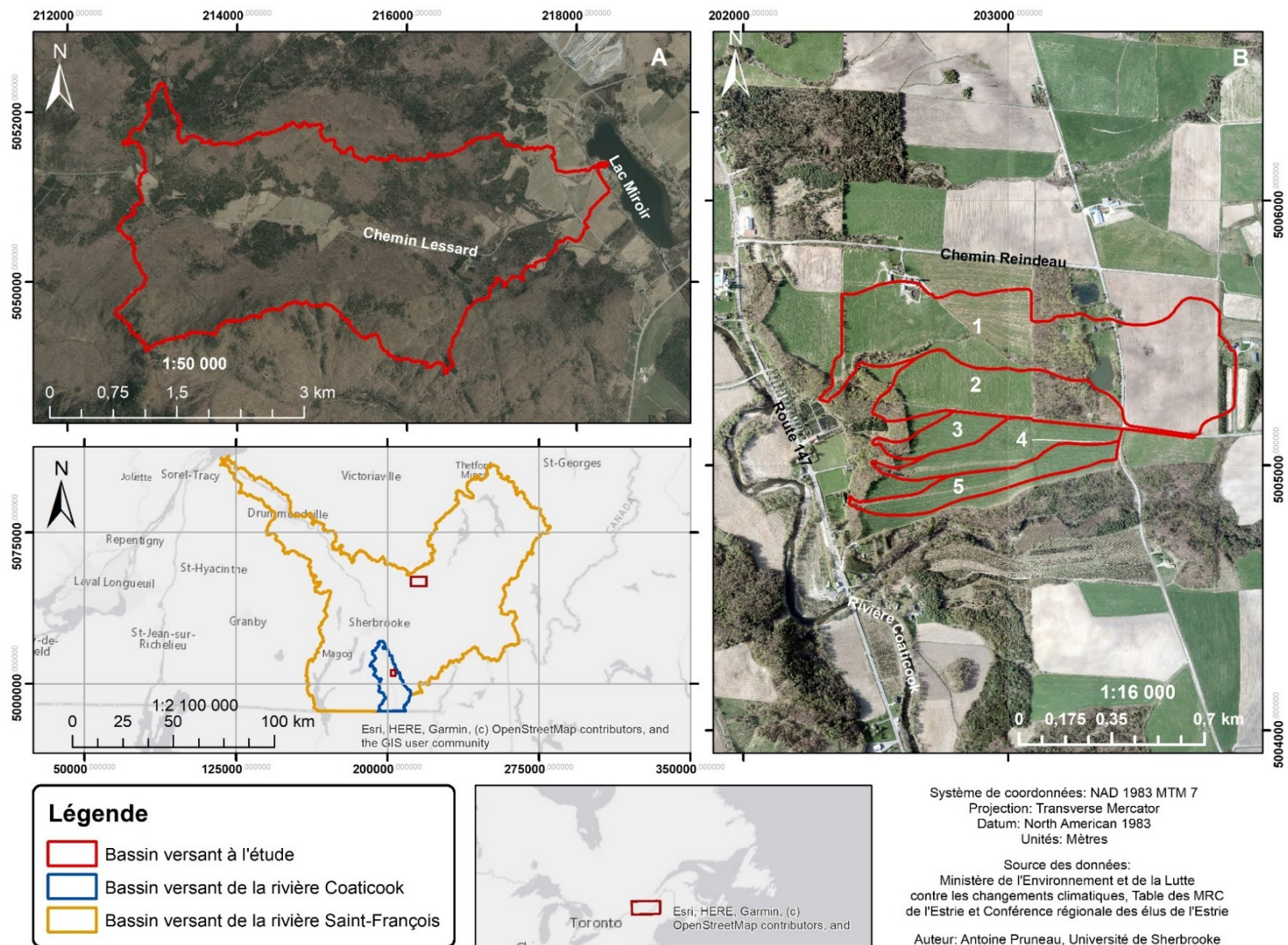


Figure 5 : Bassins versants des six cônes alluviaux à l'étude localisés à Dudswell (A) et Compton (B).

3.2. Acquisition des données terrain

L'acquisition de données terrain a été effectuée en quatre sorties, une à l'automne 2020 et trois à l'été 2021. Les cours d'eau principaux de chacun des bassins versants ont été parcourus de l'amont vers l'aval. Dès qu'un élément d'importance était observé le long du chenal principal, un point GNSS était enregistré de façon systématique. Le but de la campagne terrain était de récolter des données sur les sources de sédiments et de bois morts ainsi que d'identifier les signes d'érosion, d'incision et d'aggradation. Les ponts et ponceaux, le type de végétation ainsi que certaines caractéristiques des sédiments, tels que la granulométrie et leurs dispersions dans l'environnement, aux alentours et à l'intérieur des cours d'eau ont été recensés. Pour ce qui est des ponts et ponceaux, leurs largeurs ont été mesurées à l'aide d'un ruban à mesurer. D'autres informations ont aussi été notées, telles que les zones de transports de sédiments (zone de confinement du cours d'eau), les signes d'avulsion passée et le type de sol.

Afin d'enregistrer les informations recueillies sur le terrain, un GPSMAP 64s de Garmin a été utilisé. Ce récepteur GNSS permet d'enregistrer environ 5000 points et une autonomie de 16h (GARMIN, 2021). Dans ce cas-ci, la précision des points enregistrés sur le terrain variait entre 15 et 20 mètres. Pour ce genre d'application, la précision et la capacité du GPS étaient suffisantes pour l'inventaire.

Afin d'assurer l'identification de tous ces éléments sur le terrain, une fiche de caractérisation a été produite puis imprimée (Annexe 3). Cette fiche contenait plusieurs lignes indiquant le numéro du point GPS. Pour chacun des points, des notes ont été prises concernant les différents éléments observés pour chaque point enregistré. De plus, des photographies ont été prises à l'emplacement de chacun des points avec un cellulaire dont la localisation était activée. Cela permettait donc d'obtenir des coordonnées approximatives pour chacune des photographies et de les associer au point GPS correspondant. Les informations transcrites pendant les campagnes terrain ont par la suite été transcrites dans un fichier Excel. De plus, les points ont été extraits du GPS et transformés en format *Shapefile* afin de pouvoir les visualiser dans un système d'information géographique. Les informations les plus importantes ont été entrées dans un nouveau champ de cette couche.

3.3. Données géospatiales et prétraitements

La donnée principale utilisée dans le projet est une couverture LiDAR aérienne de 2015 et de 2018 (Tableau 1). Les données LiDAR brutes sont en format LAS et les produits dérivés utilisés

sont sous forme de modèle numérique de terrain (MNT). Ces données servent à effectuer les analyses de surfaces d’expansions des cônes, les corridors d’avulsion et la connectivité sédimentaire. Notons que pour le bassin versant du ruisseau Hall, seulement les données de 2018 étaient disponibles. Les données LiDAR ont été récupérées sur le site de la bibliothèque du Frère-Théode de l’Université de Sherbrooke. Pour 2018, les données acquises par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) pour l’ensemble de l’Estrie, donc pour les deux secteurs d’étude, sont utilisées pour le projet. Pour 2015, les données sont disponibles pour le bassin versant de la rivière Coaticook uniquement. Les données sur la géologie du Quaternaire ont servi à cibler le contexte géologique. La géologie du Quaternaire a été acquise sur le site de Données Québec. Les routes et cours d’eau ont été utilisés pour le géoréférencement des photographies aériennes et proviennent de la Base de données topographique du Québec. Elles sont aussi disponibles sur le site de la bibliothèque du Frère-Théode de l’Université de Sherbrooke. Les données géospatiales ainsi que leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Liste des données géospatiales et de leurs caractéristiques

Données	Format	Année	Résolution/ échelle	Densité de point au m ²	Auteur
Géologie du Quaternaire	Vectorel (.gdb)	2018	-	-	Ministère de l’Énergie et des Ressources naturelles
LiDAR	Matriciel (.tif)	2015	Résolution de 1 mètre	4 points	Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
		2018	Résolution de 1 mètre	2,5 points	
Routes et cours d’eau	Vectorel (.shp)	2001	1/20 000	-	Base de données topographiques du Québec

Des photographies aériennes et des orthophotographies ont été utilisées afin d’analyser l’évolution de l’occupation du sol entre 1945 et 2018 ainsi que les modifications subies par les cours d’eau pour la même période. Pour le ruisseau Hall, les années analysées sont 1945, 1960, 1988 ainsi que 2013 alors que pour le site de Compton ce sont les années 1945, 1975, 1998 ainsi que 2018. Le but est d’analyser les changements par intervalle de 20 à 30 ans. Le tableau 2 présente les photographies aériennes ainsi que les orthophotographies et leurs caractéristiques.

Tableau 2 : Liste des photographies aériennes et orthophotographies ainsi que leurs caractéristiques

Type	Année	Site	Échelle/ résolution	Format	Auteur
Photographies aériennes	1945	Compton et ruisseau Hall	1:20000		Gouvernement du Canada
	1960	Ruisseau Hall	1:15000	Papier. Numérisées (800 p.p.p.) en .tif	Gouvernement du Québec
	1975	Compton	1:20000		
	1988	Ruisseau Hall	1:15000		
	1998	Compton	1:15000		
Orthophotos	2013	Ruisseau Hall	10 cm	Geotiff	Conférence régionale des élus de l'Estrie
	2018	Compton	10 cm		Table des municipalités régionales de comté (MRC) de l'Estrie

Les données géospaciales ont été prétraitées afin de faciliter la suite du projet. La première étape était de s'assurer que la projection soit identique pour chacune des données (NAD 83 MTM 7). De plus, un découpage des MNT, des données pour le géoréférencement ainsi que des données géologiques a été effectué. Cette manipulation était nécessaire pour chacun des sites d'étude afin de réduire les temps de traitement. Une fois découpés, les MNT couvraient l'étendue des bassins versants jusqu'en aval du cours d'eau principal, soit la rivière Coaticook pour les cinq cônes de Compton ainsi que le lac Miroir pour le ruisseau Hall.

3.4. Traitements

Cette section présente les traitements des photographies aériennes et des données LiDAR. En ce qui concerne le traitement du LiDAR, le fonctionnement de la méthode EXZECO et de l'application *SedInConnect* y sont présentés.

3.4.1. Analyse historique des photographies aériennes

Premièrement, les photographies aériennes ont été géoréférencées à l'aide d'ArcGIS. Une orthorectification n'a pas été effectuée en raison du temps nécessaire pour effectuer l'opération et la correction des décalages liés au relief, qui n'offre pas une augmentation significative de la précision. Afin d'intégrer les photographies aériennes dans un système d'informations

géographiques, les données de la base de données topographiques du Québec ainsi que les outils de géoréférencement du logiciel ont été utilisés. Le principe de cette étape consiste à choisir un point homologue entre les données de bases et les éléments visibles sur la photographie à localiser afin de les associer. Les éléments des photographies qui ont été privilégiés sont les intersections entre deux routes ou celles entre une route et un cours d'eau. Puisque quelques régions des sites d'étude ont une forte topographie, généralement en aval des bassins versants, certains endroits présentent des décalages. Cependant, les zones à l'intérieur des bassins versants sont géoréférencées de façon à réduire les décalages dans ces derniers.

À l'aide de photographies aériennes géoréférencées, des données d'occupation du sol et de trajectoire des cours d'eau ont été produites par photo-interprétation. Pour ce qui est de l'occupation du sol, les classes vectorisées sont les plans d'eau, les terres agricoles, les zones urbaines ou construites ainsi que les zones forestières. Des zones ont aussi été classées comme sol nu lorsqu'aucune occupation spécifique n'était visible. Des fichiers de forme polygonale (*shapefile*) ont été créés et les limites des classes y ont été vectorisées à une échelle qui se situait entre 1:750 et 1:1 250. En ce qui concerne les cours d'eau, une ligne a été tracée au centre des cours d'eau principaux des bassins versants et enregistrée dans un fichier de forme linéaire. L'échelle de vectorisation était d'environ 1:500. Notons que le cours d'eau a seulement été vectorisé lorsque ce dernier était visible. Ces deux opérations ont été effectuées pour toutes les années d'analyses.

3.4.2. *Analyse de la surface d'expansion et des corridors d'avulsion potentiels*

Afin d'obtenir les couloirs d'écoulement potentiels ainsi que la surface probable d'expansion des cônes alluviaux à partir des MNT de 2015 pour Compton et 2018 pour Dudswell, la méthode EXZECO du Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) a été utilisée (Cerema, 2020). Les ponts et ponceaux doivent préalablement être retirés des MNT pour obtenir des données cohérentes d'un point de vue hydrologique afin de les utiliser dans cette méthode. Les données terrain ont permis de les localiser et de créer un fichier de forme polygonal pour les ponts et ponceau. Un outil développé à l'Université Concordia (G. Choné, comm. pers.) a été utilisé pour faire cette opération. Le principe de l'outil permet de modifier les valeurs d'élévation de la surface couverte par le pont ou ponceau en utilisant la plus petite valeur adjacente aux polygones de l'infrastructure. Ensuite, les cuvettes sont éliminées du MNT en utilisant l'outil *Fill*.

Pour ce qui est de la méthode EXZECO, elle consiste en une chaîne d'opérations, disponible dans l'article de Pons et al. (2010), pouvant être répliquée à l'aide d'un *ModelBuilder* dans ArcGIS (Figure 6). La première étape consiste à générer une nouvelle couche matricielle avec l'outil *Random raster*. La nouvelle couche avait la même étendue que le MNT corrigé et avait des valeurs de pixel entre 0 et 1. Le MNT ainsi que la couche contenant des valeurs aléatoires de pixels sont ensuite additionnés avec l'outil *Raster Calculator*. Le but de cette manipulation est de simuler des processus naturels tels que l'aggradation ou des accumulations de bois morts sur la zone d'étude. Une pondération est ensuite appliquée à la couche aléatoire afin d'ajuster la valeur des variations. Afin de simuler une variation d'un maximum de 150 cm par exemple, la couche ayant des valeurs aléatoires est multipliée par 1,5. Des variations de 50 cm, 100 cm et 150 cm, ont été simulées pour le site de Compton et de 100, 150 et 200 cm pour le ruisseau Hall. Donc, pour chacun des sites, trois simulations ont été faites. Puis, le MNT est à nouveau traité de façon à combler les cuvettes qui pourraient s'être formées après l'ajout des variations topographiques. La trajectoire d'écoulement est ensuite déterminée avec le *Flow direction* suivi d'un *Flow accumulation* qui est calculée. Cette opération permet de déterminer dans quelles cellules se fera l'accumulation d'eau et de déterminer les chenaux d'écoulement. Cet outil prend en intrant le résultat du *Flow Direction* et un point de départ pour l'écoulement sous forme matriciel. Ces points de départ, en format matriciel, ont été localisés en amont des cours d'eau principaux des cônes alluviaux. Ce processus permet d'obtenir une seule simulation de l'écoulement. Un processus d'itération a donc été mis en œuvre, avec une boucle dans le *ModelBuilder*, afin de simuler 1 000 lignes d'écoulements pour chacun des scénarios. Notons que pour Compton, les écoulements pour les cinq cônes alluviaux ont été effectués simultanément. Finalement, un fichier matriciel a été produit pour chaque itération. Les pixels représentant des lignes d'écoulements générées avaient une valeur de 1 alors que les autres avaient une valeur de 0. Afin d'obtenir la surface d'expansion des cônes alluviaux, l'outil *Mosaic to new raster* a été utilisé afin de combiner les 1 000 fichiers produits. Dans l'outil, les paramètres ont été ajustés de façon à obtenir en sortie l'addition des 1 000 couches dans un seul fichier de 32 bits.

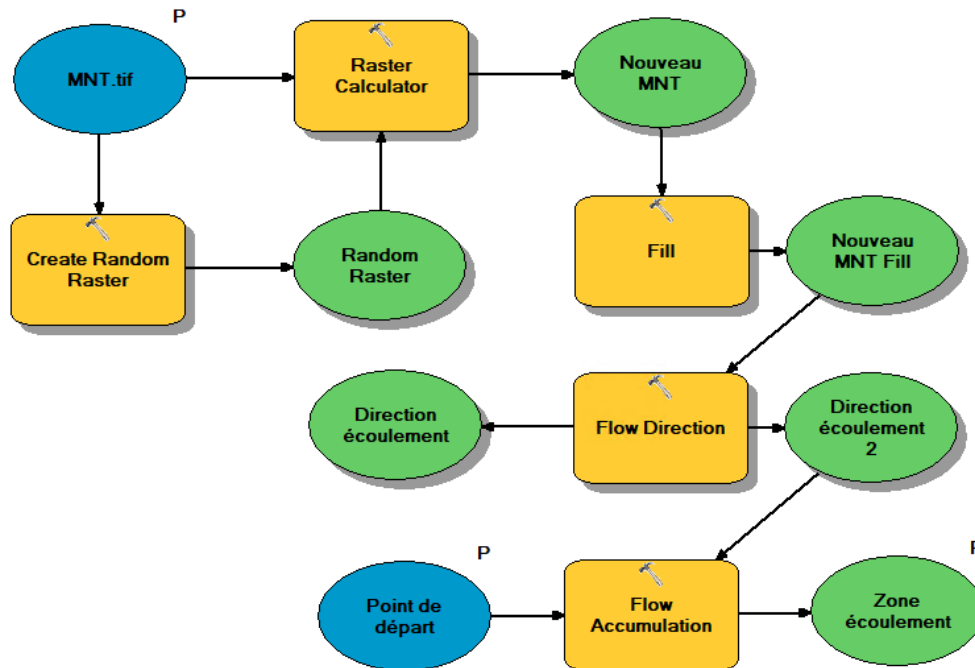


Figure 6 : Chaîne d’opérations de la méthode EXZECO (inspirée de Pons et al., 2010). Les cercles bleus représentent les intrants du modèle, les carrés jaunes représentent les traitements et les cercles verts représentent les résultats des traitements. Les « P » représentent les paramètres de la méthode, c’est-à-dire les données qui ne changent pas entre chaque itération.

3.4.3. Analyse de la connectivité sédimentaire

L’autre outil utilisé est SedInConnect. Ce dernier a été créé par Crema et Cavalli (2018) et vise à analyser la connectivité sédimentaire d’une région. L’indice de connectivité (IC) de Crema et Cavalli (2018) se définit par l’équation 2.

$$IC = \log_{10}\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right) \quad (2)$$

où D_{up} représente le potentiel d’acheminement des sédiments vers l’aval et D_{dn} représente la trajectoire d’écoulement de l’eau nécessaire pour que les sédiments soient transportés jusqu’au chenal ou vers un point. Cet outil utilise par défaut la topographie afin de calculer le poids, aussi nommé l’impédance, de la surface étudiée. C’est ce paramètre qui a été utilisé pour les deux sites étudiés. *SedInConnect* permet aussi d’intégrer différents paramètres au calcul de l’indice comme l’ajout de cible et de piège à sédiments. Dans le cadre de l’étude, une analyse a été effectuée de façon globale, donc sans l’ajout de paramètre et sans cible. La résolution des pixels en sortie est de 1 mètre et le poids calculé par l’outil n’a pas été normalisé. Les résultats ont ensuite été exportés en format matriciel dont les pixels ont une valeur de connectivité située entre $-\infty$ et $+\infty$ où les

valeurs plus élevées correspondent à une connectivité plus élevée. Les valeurs minimales et maximales varient en fonction du site d'étude. Dans le cas de Compton, le LiDAR de 2015 a été utilisé alors que pour Dudswell, le LiDAR de 2018 a été utilisé.

3.4.4. Profils en long

Des profils en long ont été produits. Le but de cette étape est d'observer la topographie des principaux cours d'eau, tels que les ruptures de pente, ainsi que de comparer la profondeur des cours d'eau et de leurs berges. À partir de cette couche, la direction de l'écoulement de l'ensemble des zones d'étude a été calculée avec l'outil *Flow direction* suivie du *Flow accumulation*, les deux, déterminé préalablement à partir des points de départ utilisés lors des analyses EXZECO. Le résultat a ensuite été reclassifié de façon à obtenir des valeurs de pixels de 1 pour les cours d'eau et *NoData* pour le reste des cellules. Le fichier matriciel a été converti par la suite en fichier linéaire vectoriel avec l'outil *Raster to polyline*. Les principaux cours d'eau sont alors obtenus et l'outil *Interpolate shape* a permis d'obtenir une valeur d'altitude en tout point des cours d'eau.

Afin d'obtenir des valeurs d'altitude pour les berges, les cours d'eau ont été transformés en route en utilisant l'outil *Create Route*. Les paramètres de l'outil ont été sélectionnés afin que le point de départ des routes se retrouve en amont du cours d'eau. Des points ont été créés sur le cours d'eau à tous les cinq mètres avec l'outil *Construct points*. Par la suite, la position sur la route de ces points a été calculée grâce à l'outil *Locate feature along line*. Cet outil crée une table avec la distance relative de chaque point au point de départ de la route, donc le premier, deuxième et troisième point par exemple, a une valeur de distance de 0, de 5 et de 10 m respectivement. Les informations sur la distance sont ensuite jointes à la couche de point à l'aide de l'identifiant unique de chaque point. Donc, chaque point généré sur le cours d'eau a une position le long de la route. Ensuite, les points ont été déplacés manuellement et perpendiculairement au cours d'eau en utilisant le MNT et les orthophotographies de façon à obtenir l'altitude de la berge à tous les cinq mètres du cours d'eau. En utilisant l'outil *Interpolate shape* et en intrant le MNT de 2015 pour Compton et 2018 pour Dudswell, l'altitude de chaque point placé sur la berge a été déterminée. Cette altitude a été enregistrée dans un champ à l'aide l'outil *Add Z*. Finalement, l'extension *3D Analyst* a permis de créer un graphique de profil en long des cours d'eau et de leurs berges. Dans le cas des berges, les champs de distance et d'altitude ont permis de placer chaque point sur l'axe des X et l'axe Y du graphique respectivement. Notons que l'utilisation de points pour déterminer la hauteur des berges

était adéquate puisque l'utilisation d'un tracé linéaire parallèle au cours d'eau crée des décalages entre la ligne du cours d'eau et celle de la berge. L'utilisation d'un tracé parallèle cause une ligne de berge soit plus longue ou plus courte que celle du cours d'eau, empêchant une comparaison fiable sur toute la longueur du cours d'eau.

4. Résultats

4.1. Historique des bassins versants

4.1.1. Cônes de Compton

L'occupation du sol des cinq bassins versants de Compton a subi plusieurs changements entre 1945 et 2018. Le tableau 3 présente les superficies de chacune des occupations du sol pour 1945 et 2018. Notons que la variation de la superficie totale est liée à l'arrondissement des valeurs de superficie. La figure 7 présente l'occupation du sol en 1945 et en 2018. Pendant cette période, la plus grande partie du territoire d'étude était occupée par des terres à vocation agricole dans les bassins versants des cônes alluviaux. La deuxième occupation du sol prédominante est la forêt. Les forêts ont peu évolué pendant cette période à l'exception de certains endroits. La zone forestière située en aval des bassins versants (zone 2), près de la rivière Coaticook, a notamment pris de l'expansion vers le nord au profit des zones agricoles, ce qui crée une démarcation entre la zone bâtie en aval et les terres agricoles en amont. D'ailleurs, les principaux changements observés sont la diminution de la superficie occupée par les terres agricoles (zone 1 et 3), l'augmentation de la superficie de la forêt et la construction d'infrastructure près de la rivière Coaticook (zone 1). En effet, un parc de maisons mobiles a été construit entre 1945 et 1975. Depuis, ce parc a pris de l'expansion et un producteur de cèdre s'y est installé. La zone habitée en amont a aussi augmenté en superficie avec notamment deux bassins d'eau qui y ont été aménagés (zone 4). Le bassin le plus au nord semble avoir été aménagé avant 1975 alors que celui plus au sud est apparu entre 1975 et 1998.

Tableau 3 : Occupation du sol dans les bassins versants des cônes alluviaux à l'étude de Compton et leurs alentours pour 1945 et 2018

	1945		2018	
	Km ²	%	Km ²	%
Agricole	1,7	74,8	1,2	54,7
Bâti	0,1	2,3	0,3	11,8
Forestier	0,5	22,9	0,7	33,0
Surface d'eau	0,0	0,0	0,0	0,5
Total	2,3	100,0	2,2	100,0

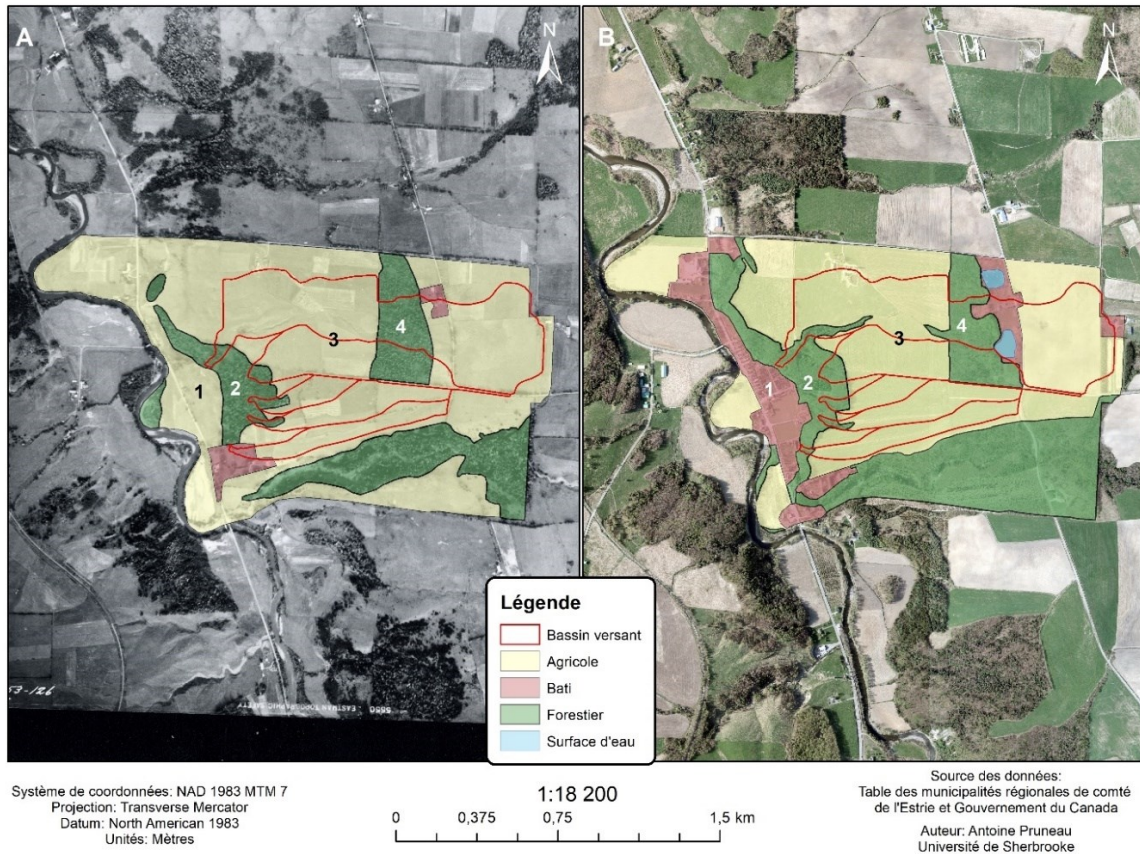


Figure 7 : Occupation du sol dans les bassins versants des cônes alluviaux à l'étude de Compton et les alentours pour 1945 (A) et 2018 (B).

En ce qui concerne le réseau hydrographique, plusieurs changements sont observés. La majorité des cours d'eau observés sur les photographies aériennes de 1945 à 2018 semble être des cours d'eau utilisés à des fins agricoles. Entre 1945 et 2018, le réseau agricole semble avoir pris de l'expansion. En 2018, chaque parcelle agricole semble avoir au moins un cours d'eau qui la traverse en grande partie. En 1945, quelques cours d'eau sont observés à la limite des propriétés et agissent comme ligne de partage entre les parcelles. Ces derniers sont généralement plus petits que ceux observés en 2018 comme il est possible de voir dans la figure 8B et 8C. De plus, les cours d'eau semblent être plus rectilignes en 2018 qu'en 1945. Cette linéarisation est observable dans la figure 8A et 8B. Cependant, notons que plusieurs cours d'eau ont été aménagés entre 1945 et 1975 puis ont disparu entre 1975 et 1998. Notons que les cours d'eau étaient visibles dans la zone forestière en aval sur les photographies aériennes de 1975. Une digue a aussi été aménagée après 2018 en aval de la forêt.

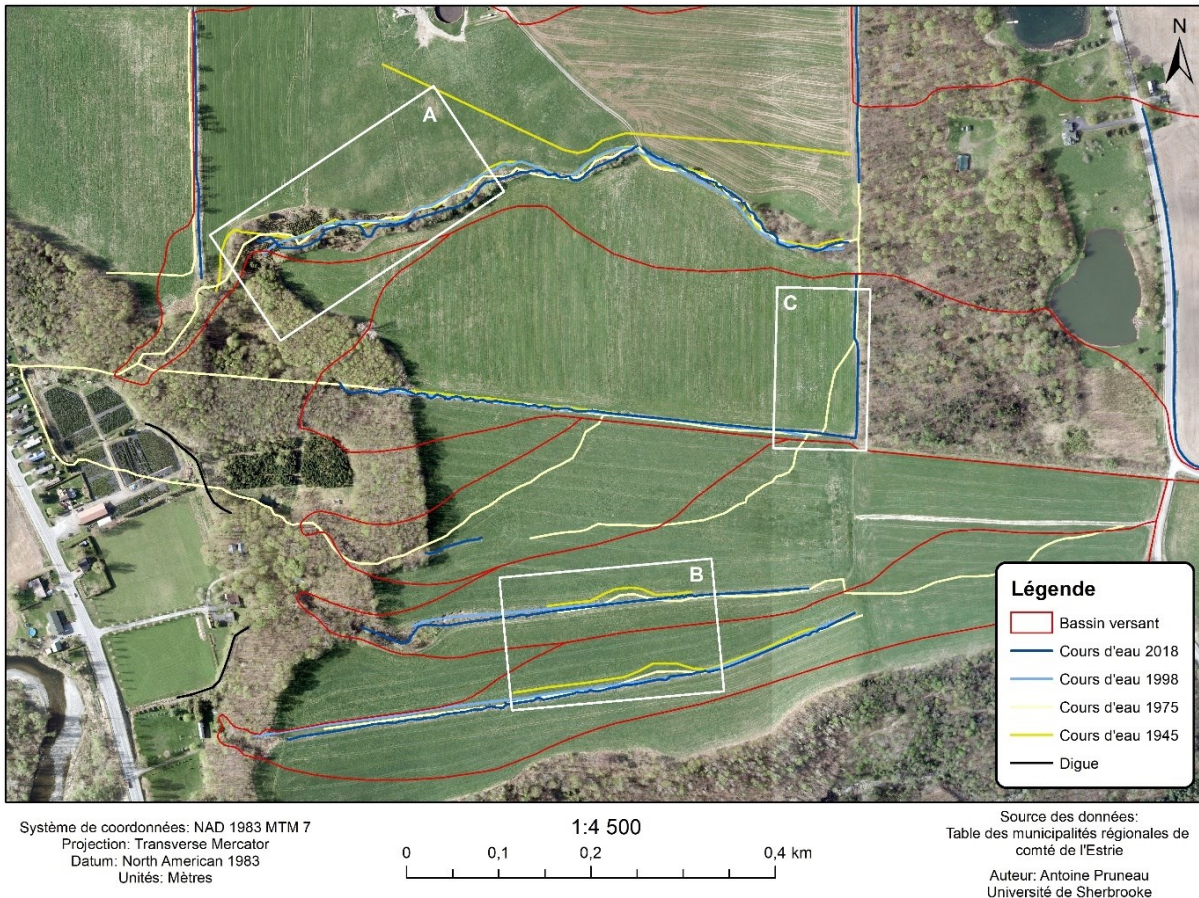


Figure 8 : Évolution des cours d'eau des bassins versants des cônes alluviaux de Compton entre 1945 et 2018. Les encadrés blancs présentent des zones ayant connu des changements marqués pendant la période étudiée.

4.1.2. Cône du ruisseau Hall

Le bassin versant du ruisseau Hall est constitué de zone forestière à l'exception de la région en aval située près du lac Miroir et de quelques zones agricoles en amont. Cette zone a connu plusieurs changements entre 1945 et 2013 (Figure 9A et 9B). Le tableau 4 présente la superficie de chacune des occupations du sol. Une grande partie de cette zone est occupée par des terres agricoles dans les deux cas (zone 2). Cependant, les zones forestières se sont agrandies d'environ 0,33 km² alors que les zones agricoles ont perdu environ 0,53 km² depuis 1945. Ces changements sont survenus majoritairement à l'ouest où la plupart des terres agricoles sont devenues des zones forestières ou du sol nu (zone 3). De plus, la zone sur les berges du lac s'est développée et plusieurs habitations y sont maintenant présentes (zone 1). Notons aussi que certaines zones qui étaient de type agricole

en 1945 semblent ne plus avoir cette vocation malgré le fait qu'elles sont toujours dénudées de végétation.

Tableau 4 : Occupation du sol pour le bassin versant du ruisseau Hall et ses alentours pour 1945 et 2013

	1945		2013	
	Km ²	%	Km ²	%
Agricole	1,3	55,9	0,8	32,9
Bâti	0,0	0,0	0,1	4,2
Forestier	1,0	42,8	1,3	56,4
Sol nu	0,1	1,3	0,1	5,9
Surface d'eau	0,0	0,0	0,0	0,6
Total	2,4	100,0	2,3	100,00

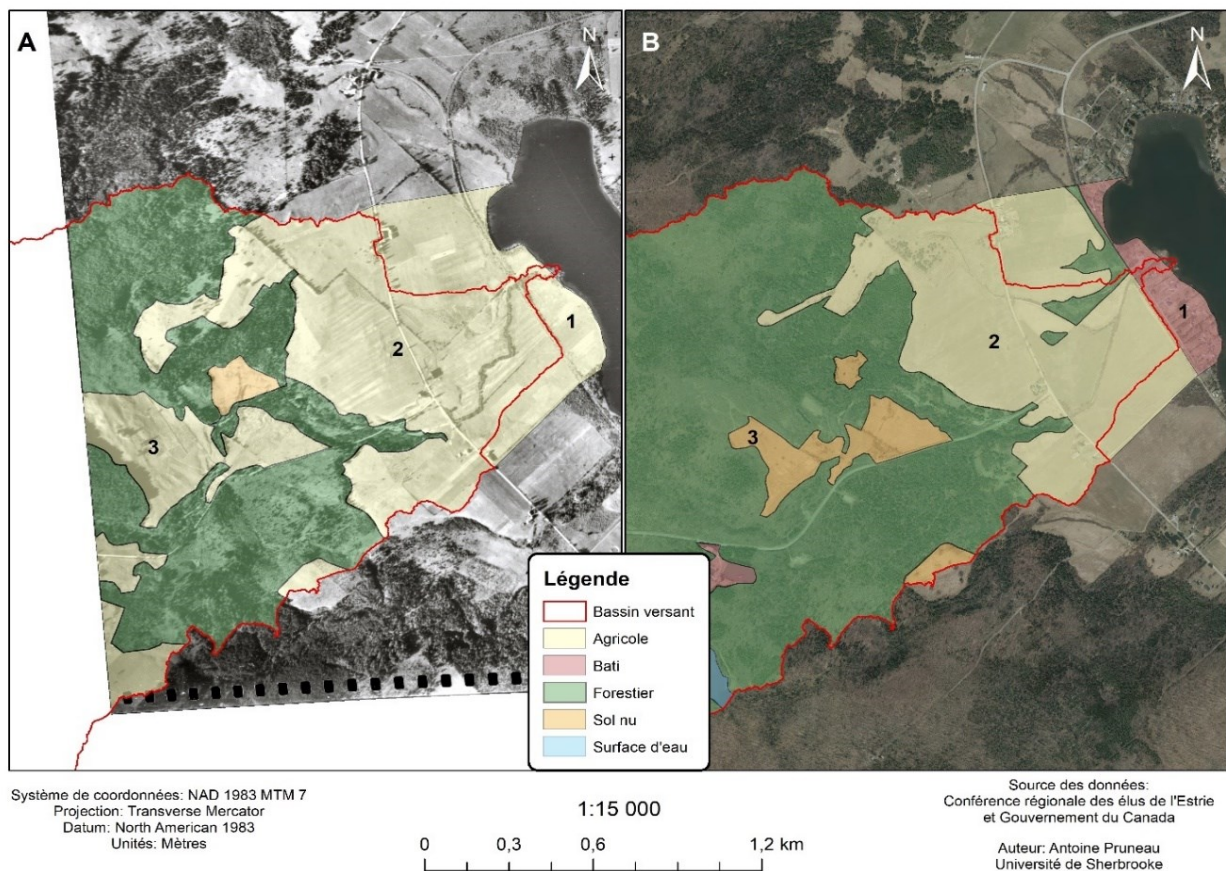


Figure 9 : Occupation du sol de la partie aval du bassin versant du ruisseau Hall à Dudswell pour 1945 (A) et 2013 (B).

En ce qui concerne le ruisseau Hall, globalement, ce dernier ne semble pas avoir changé de trajectoire comme le suggère la figure 10. Cependant, ce dernier a été linéarisé dans la zone agricole en aval et le cours d'eau semble légèrement plus sinueux en amont, dans la zone forestière, comme l'exposent les tracés fluviaux de la figure 10A et 10B. La linéarisation du cours s'est produite entre 1960 et 1988. D'ailleurs, les photographies aériennes de 1960 montrent des signes d'avulsion potentiels dans la section linéarisée (Figure 11).

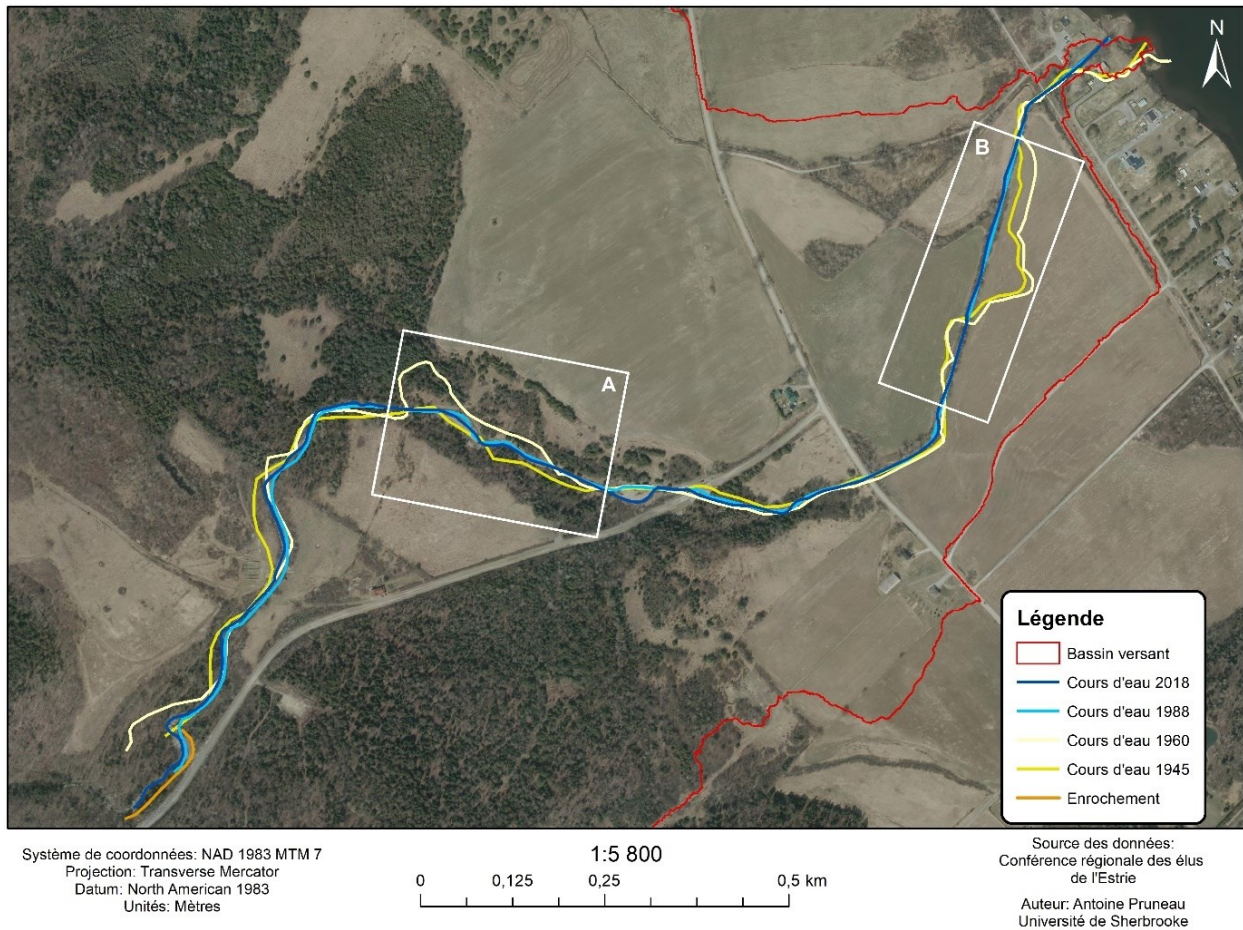


Figure 10 : Évolution du tracé du ruisseau Hall entre 1945 (jaune) et 2018 (bleu foncé). Les encadrés blancs présentent des zones ayant connu des changements marqués pendant la période étudiée.



Figure 11 : Signes d'avulsion du ruisseau Hall observables dans l'encadré rouge sur la photographie aérienne de 1960.

4.2. Inventaire terrain

4.2.1. Cônes de Compton

Les cinq bassins versants de Compton sont caractérisés par des zones agricoles en amont. Ces dernières sont délimitées par une forêt située en aval de celles-ci. À l'entrée dans la forêt, une rupture de pente est observée dans chacun des bassins versants. La pente s'adoucit par la suite juste avant d'atteindre la zone habitée. Puis, une plaine alluviale, occupée par des habitations, est observée jusqu'à la rivière Coaticook (Figure 5B). Les figures 12 et 13 ainsi que 15 à 17 présentent le profil en long des cinq cours d'eau et de leurs berges présentées à la figure 5B. Des observations terrain y figurent aussi et sont regroupées en tronçons de 200 mètres. Notons que la plupart des cours d'eau semblent intermittents et les zones en territoire agricole ont une bande riveraine.

Le premier bassin versant est caractérisé par un cours d'eau majoritairement situé en zone forestière et quelques variations de pente y sont observées (Figure 12). Les zones situées en territoire agricole et forestier sont caractérisées par des berges composées d'arbres et d'herbacés dans les deux cas. Dans la partie boisée en amont de la zone agricole, un embâcle de bois est observé. Des racines d'arbres près du cours d'eau sont dénudées, indiquant une migration latérale du cours d'eau dans le premier tronçon de 200 mètres du cours d'eau. Une légère rupture de pente est aussi observée à

l'approche de la zone agricole et une partie du lit est directement sur la roche mère dans le tronçon de 200 à 400 mètres. Des signes d'érosion du cours d'eau sont observés à la transition entre la zone forestière et agricole. Par la suite, un chemin croise le cours d'eau avant que le cours d'eau retombe en zone forestière où une augmentation de la pente est observée. De gros cailloux semblent être transportés par le cours d'eau dans cette zone et les berges atteignent quelques mètres de hauteur à environ 500 mètres. La pente s'adoucit par la suite et des accumulations de sédiments y sont repérées indiquant potentiellement de l'aggradation. Un piège à sédiments, créé par une ancienne clôture, est aussi observé. Finalement, le cours d'eau traverse une région qui semble touchée par des glissements de terrain qui pourraient contribuer de façon ponctuelle à l'apport en sédiments fins et grossiers dans le chenal. D'ailleurs, la pente du cours d'eau augmente à environ 1200 mètres puis devient très faible vers la marque des 1300 mètres, ce qui donne une forme convexe au cours d'eau. Le cours d'eau se retrouve ensuite derrière le parc de maisons mobiles et traverse un ponton avant de se jeter dans la rivière Coaticook. Notons que la hauteur de la berge du cours d'eau est relativement homogène à l'exception de deux zones. Une partie du tronçon de 600 à 800 mètres est caractérisé par des berges qui peuvent atteindre jusqu'à 5 mètres de hauteur. Le dernier tronçon est caractérisé quant à lui par des berges peu hautes.

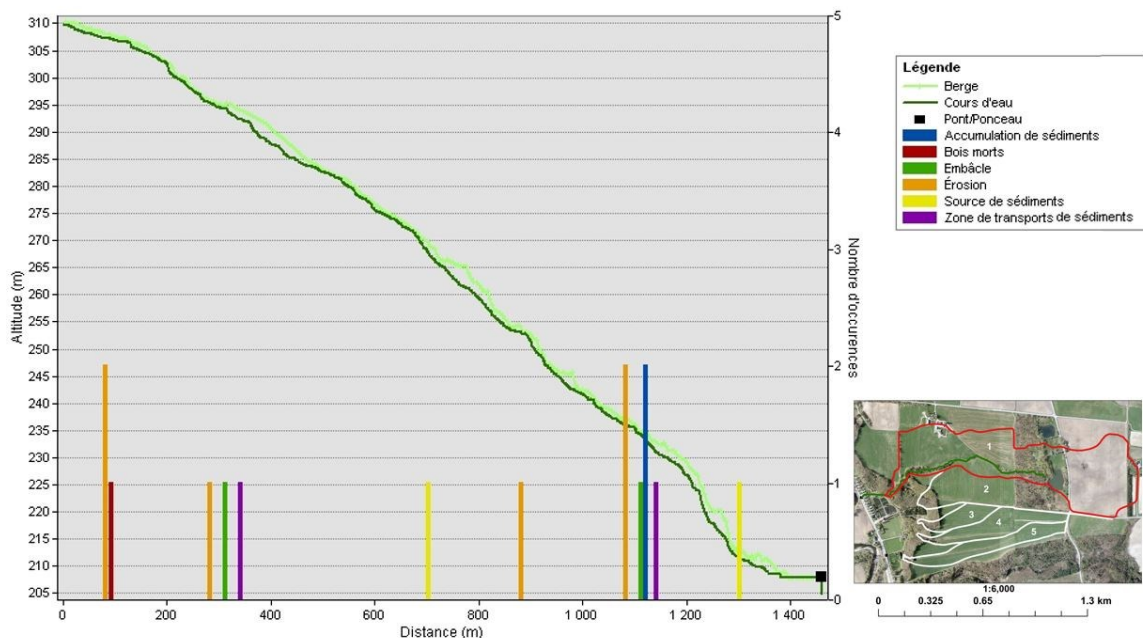


Figure 12 : Profil en long de la berge (vert clair) et du cours d'eau (vert foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du premier cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d'eau à l'étude (vert foncé).

Le cours d'eau du deuxième bassin versant est linéaire sur toute sa partie située en zone agricole (Figure 13). Cependant, avant d'entrer dans la zone forestière, le cours d'eau devient plus sinueux en raison des processus d'érosion latérale observés. Le cours d'eau présente aussi quelques signes d'érosion qui deviennent plus apparents en aval près de la forêt. Les berges sont toutes végétalisées par des herbacés et des arbustes saisonniers. D'ailleurs, des accumulations de bois morts pouvaient être observées dans le fond du cours d'eau, notamment vers l'amont. Des signes d'érosion régressive sont observés à l'entrée de la forêt comme le suggère la forme convexe du cours d'eau à partir de la marque des 500 mètres sur la figure 13. Le cours d'eau devient de plus en plus creux à cet endroit et une rupture de pente est notable. Les berges atteignent environ 5 mètres dans le tronçon de 400 à 600 mètres. Par la suite, le cours d'eau semble être laissé libre et devient plus sinueux. De gros cailloux sont observés sur le lit et d'autres sont retrouvés sur les berges du cours d'eau. Deux embâcles de bois ont aussi été observés dans la partie forestière. Le cours d'eau entre ensuite dans une région où des sapins ont été plantés. Dans cette zone, le cours d'eau ne semble pas suivre une direction particulière et des sédiments sont retrouvés un peu partout (Figure 14). Les berges sont peu hautes à partir de la marque des 700 mètres et la pente diminue comme le montre la figure 13. Il est aussi possible de remarquer une forme convexe en observant la pente du cours d'eau entre 500 et 800 mètres.

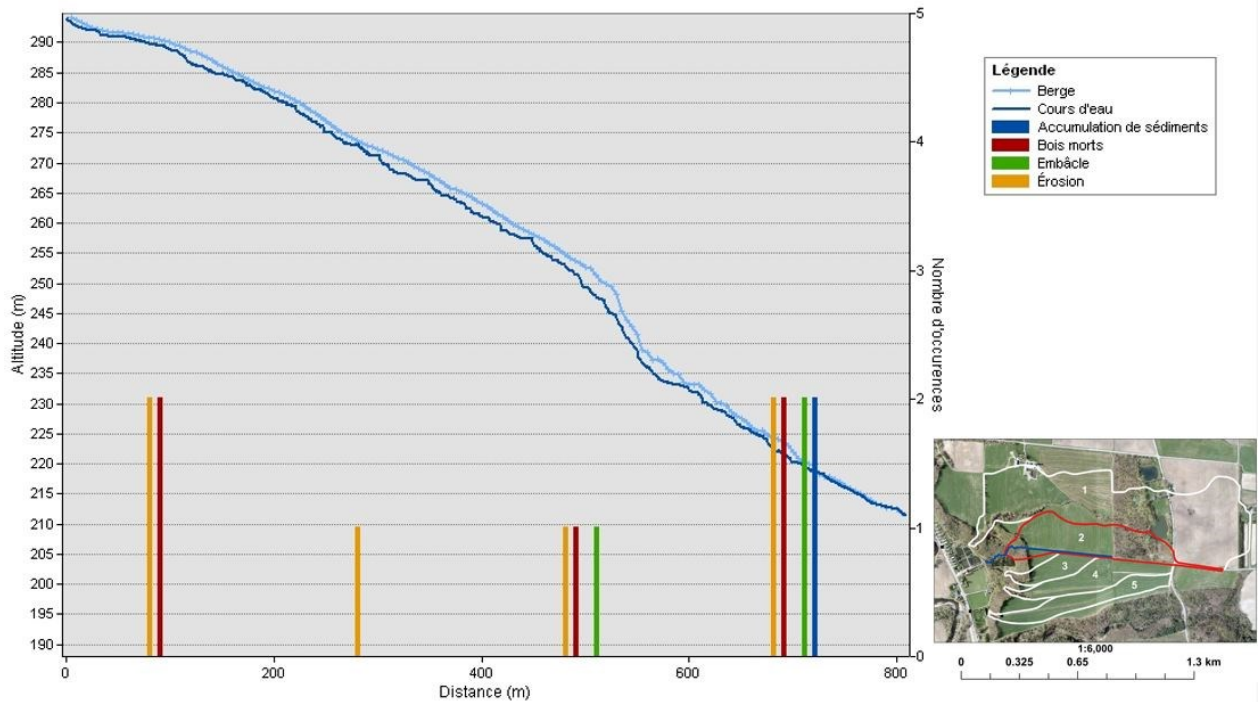


Figure 13 : Profil en long de la berge (bleu clair) et du cours d’eau (bleu foncé) et nombre d’occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du deuxième cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d’eau à l’étude (bleu foncé).



Figure 14 : Photographie à l’apex potentiel du deuxième cône alluvial de Compton (A) et du dépôt des sédiments un peu partout dans la forêt en aval de l’apex (B)

Le cours d'eau du troisième bassin versant est le plus petit des cinq bassins versants des cônes alluviaux de Compton. La pente du cours d'eau est moins prononcée que celle des autres cours d'eau (Figure 15). Seulement une petite partie du cours d'eau de ce dernier est située en zone agricole et le reste est situé en zone forestière. Le cours d'eau est beaucoup plus profond que ses berges causant un ravin d'une longueur de 150 mètres qui débute à environ 50 mètres de distance sur la figure 15. Ces berges, d'environ 12 mètres de hauteur, sont une source de sédiments fins et grossiers pour le cours d'eau puisque des signes de glissement pelliculaire y sont observés. Cette différence entre la hauteur des berges et le cours d'eau peut être identifiée sur la figure 15 et pourrait indiquer de l'érosion régressive du cours d'eau. Des cailloux d'environ 15 à 20 cm de diamètre sont aussi retrouvés sur le lit ainsi que des sédiments fins sableux. Le cours d'eau est ensuite dévié de sa trajectoire tout près de bâtiments par une digue avant de traverser un ponceau et de se déverser dans la rivière Coaticook. Une légère forme convexe de la pente du cours d'eau est encore une fois observée avec une pente plus prononcée en amont qui diminue vers l'aval.

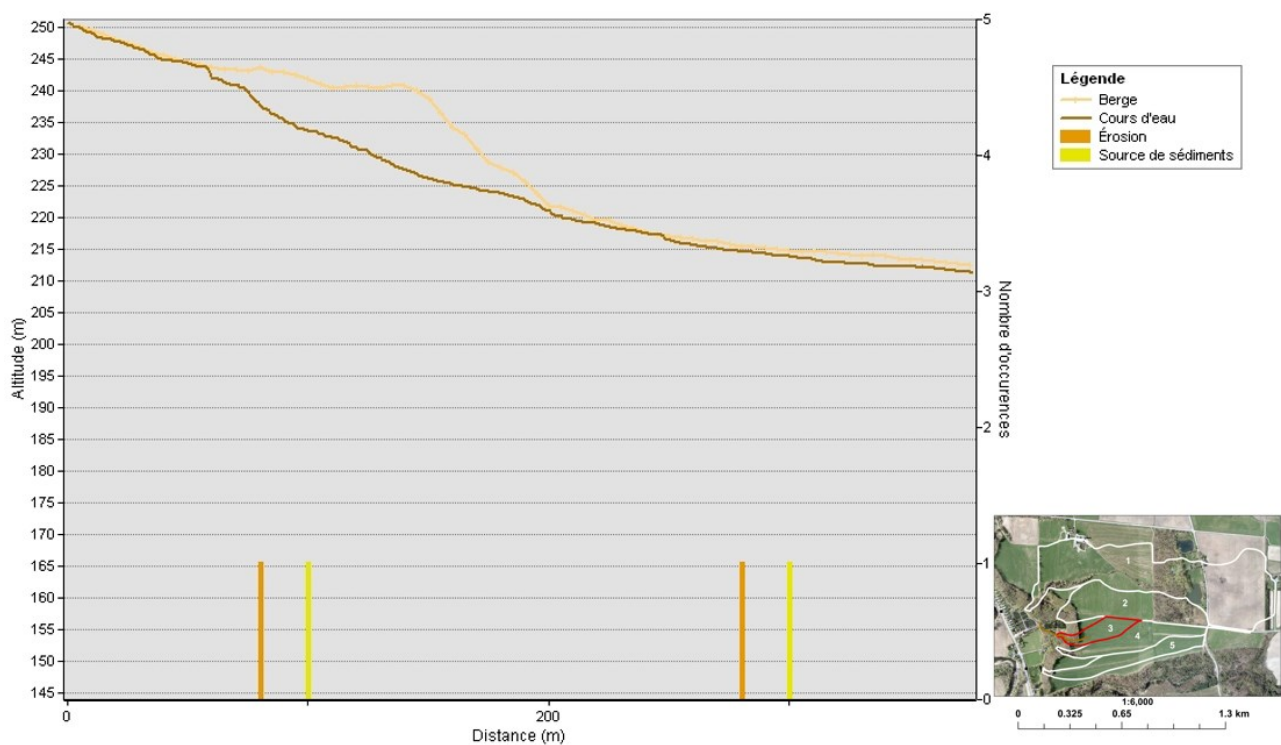


Figure 15 : Profil en long de la berge (orange claire) et du cours d'eau (orange foncée) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du troisième cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d'eau à l'étude (orange foncé).

Le quatrième bassin versant est aussi caractérisé par un cours d'eau linéaire comme les bassins versants des cônes alluviaux 2 et 3 (Figure 16). Dans la partie agricole, les berges sont végétalisées et des arbustes y sont présents. Quelques signes d'érosion et potentiellement d'incision sont observés dans sa partie agricole. Tout comme le troisième cours d'eau, le cours d'eau devient plus profond et plus large en allant vers l'aval. Un deuxième chenal parallèle est observé à côté du chenal principal. Ce dernier présente les mêmes caractéristiques et les deux se rejoignent avant d'atteindre la forêt. À l'entrée de la forêt, du ravinement sur une distance d'environ 200 mètres peut être observé tout comme dans le cas du troisième chenal. Les berges atteignent environ 15 mètres de hauteur et une rupture de pente est observable à 400 mètres comme le montre la figure 16. La différence entre la profondeur du cours d'eau et les berges peuvent indiquer la présence d'érosion régressive à cet endroit. Les sédiments des berges sont un mélange composé de sable et gravier. De gros cailloux sont aussi retrouvés dans le fond du chenal. La pente s'adoucit par la suite vers la marque des 600 mètres et le cours d'eau change de direction à cause de l'aménagement de la digue. Le cours se déverse ensuite dans la rivière Coaticook après avoir traversé un ponton. D'ailleurs, les berges sont peu hautes à l'approche du ponton.

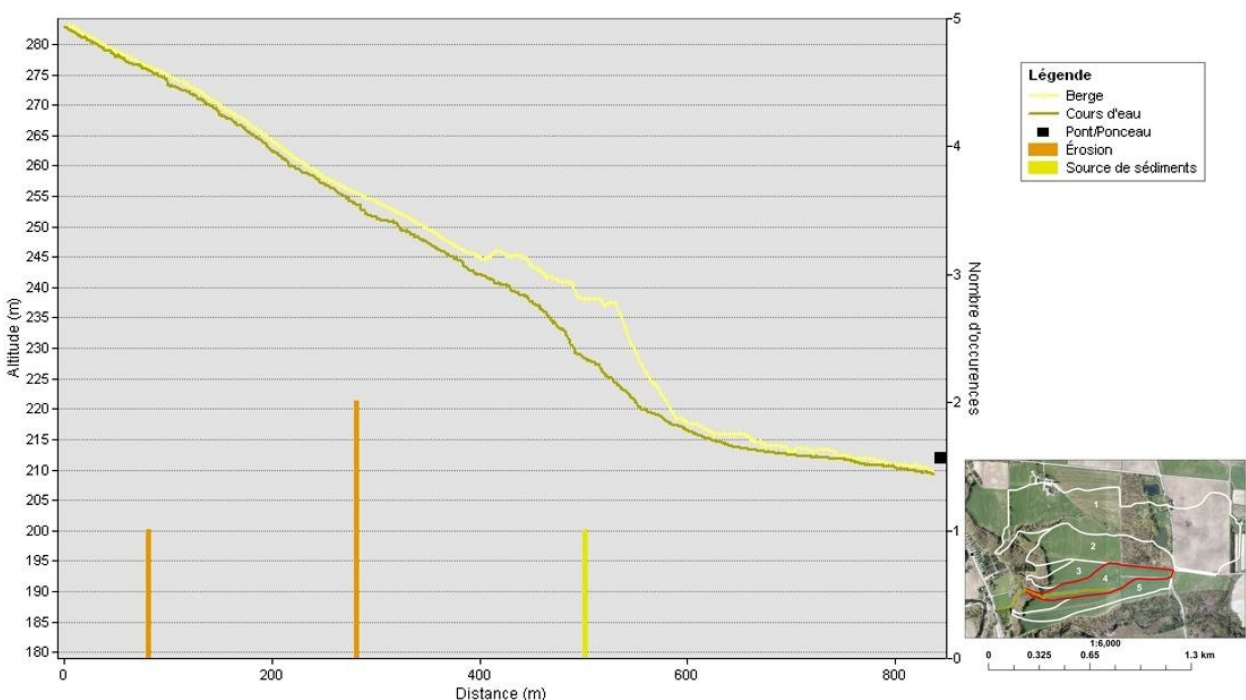


Figure 16 : Profil en long de la berge (jaune clair) et du cours d'eau (jaune foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du quatrième cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d'eau à l'étude (jaune foncé).

Finalement, le dernier bassin versant est très similaire au quatrième (Figure 17). En effet, le cours d'eau débute en zone agricole et ses berges sont végétalisées par des herbacés et arbustes. Quelques signes d'érosion du cours d'eau sont présents et le cours d'eau s'élargit en s'approchant de la zone forestière. La hauteur des berges est relativement homogène dans la partie agricole. Un ponceau est présent juste avant que le cours d'eau entre dans la forêt (Figure 18). Une zone de ravinement d'environ 100 mètres de longueur est ensuite observée et prend fin avant la digne. Les berges de la zone de ravinement atteignent environ 12 mètres comme il est possible d'observer sur la figure 17. Une accumulation de bois morts est observée dans la zone de ravinement, ce qui crée un embâcle. Cette accumulation intercepte les plus grosses roches, ce qui obstrue partiellement le cours d'eau. Notons que ce cours d'eau contient plus de bois morts, dans la zone de ravinement, que les deux cours d'eau précédents et que la pente est plus abrupte.

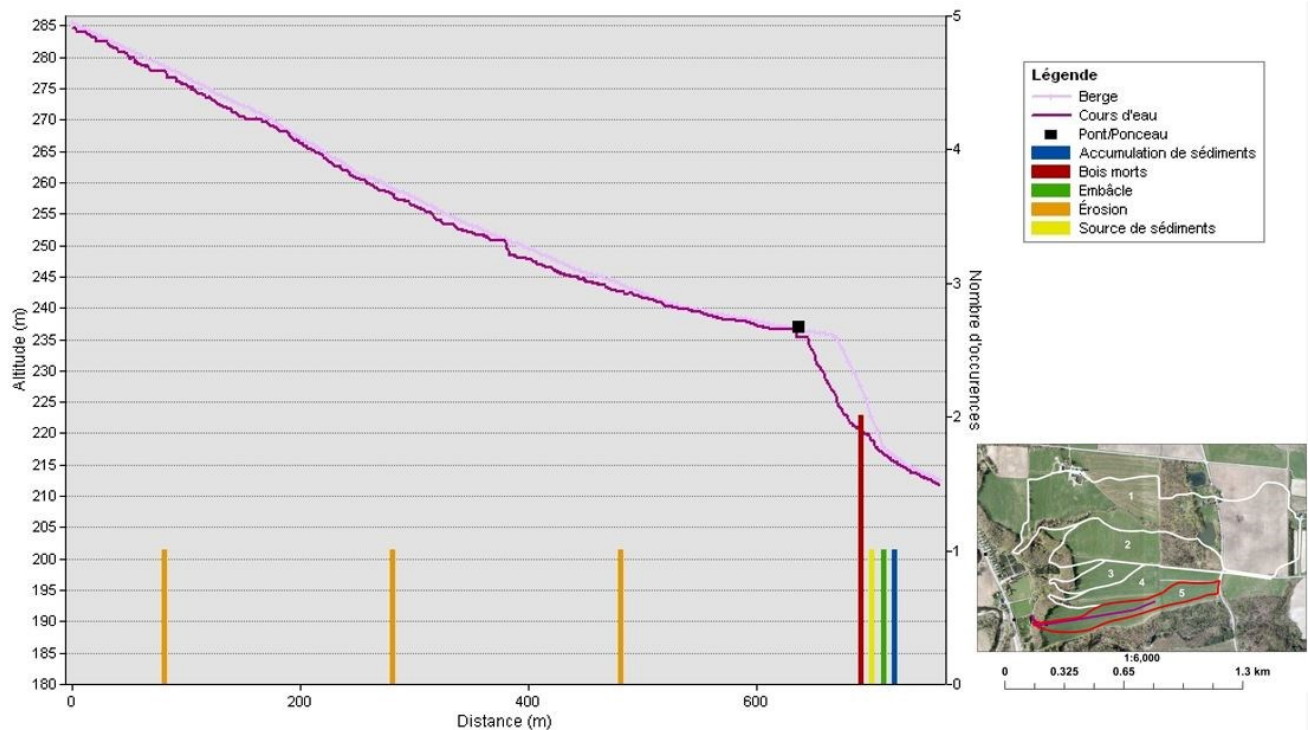


Figure 17 : Profil en long de la berge (mauve clair) et du cours d'eau (mauve foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le bassin versant du cinquième cône alluvial de Compton. La carte en bas à droite localise le bassin versant du cône alluvial (rouge) ainsi que le cours d'eau à l'étude (mauve foncé).



Figure 18 : Ponceau situé dans la zone agricole, près de la forêt, dans le cinquième bassin versant étudié à Compton

4.2.2. Cône du ruisseau Hall

Pour ce qui est du bassin versant du ruisseau Hall, le cours d'eau se trouve en zone forestière sur presque toute sa longueur. En effet, seulement environ 1,5 km du cours d'eau, près du lac Miroir, se trouve en zone agricole. La figure 19 présente le profil en long du cours d'eau et de sa berge pour la partie parcourue sur le terrain. L'inventaire terrain est divisé en cinq segments d'environ 1 km qui sont représentés sur les figures 20 à 23 et la figure 25. Ces figures présentent le profil en long du cours d'eau et de ses berges ainsi que les observations terrain. Notons que sur les figures de profil en long, les observations terrain sont rassemblées par tronçon de 200 mètres.

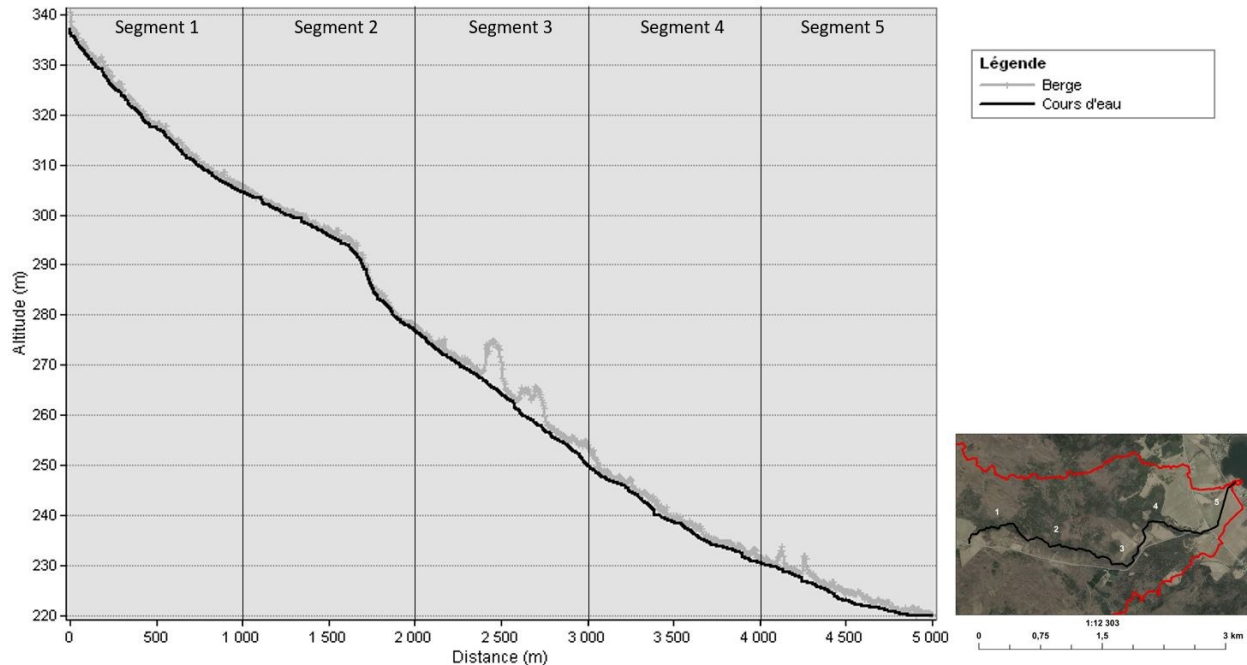


Figure 19 : Profil en long de la berge (gris) et du cours d’eau (noir) du bassin versant du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau hall (rouge) ainsi que le segment à l’étude (noir).

Le premier segment commence au pont au croisement du chemin Lessard et le ruisseau Hall (Figure 20). Ce segment est entièrement en zone forestière et sur la majorité de celui-ci, de grosses roches et du sable forment le lit de la rivière. La pente est relativement régulière pour l’entièreté du segment comme le montre la figure 20. Plusieurs embâcles de bois sont observés notamment dans le tronçon de 200 à 600 mètres. D’ailleurs, deux avulsions, qui semblent avoir été causées par des embâcles, ont été identifiées sur l’ensemble du premier segment lors de l’inventaire terrain. Quelques accumulations de sédiment grossier sont aussi observées notamment dans les deux premiers tronçons. De plus, deux zones de transports sont identifiées dans le tronçon de 800 à 1000 mètres. Ces zones sont caractérisées par un cours d’eau qui est confiné par la roche mère donc, dans cette zone, le cours d’eau ne peut pas faire de la migration latérale et les sédiments y sont seulement transportés.

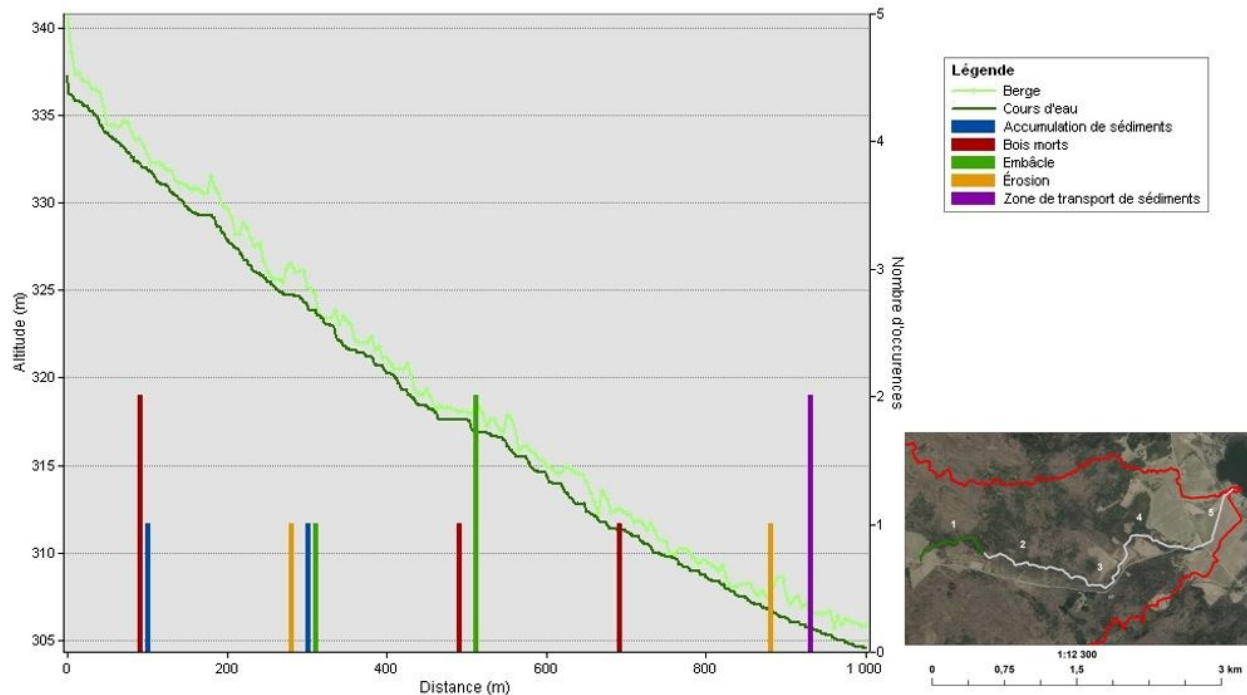


Figure 20 : Profil en long de la berge (vert clair) et du cours d'eau (vert foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le premier segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (vert foncé).

Le deuxième segment (Figure 21), situé en forêt, est caractérisé par un lit composé de grosses roches et de gravier. Les berges ne sont généralement pas très hautes et sont composées d'arbres et d'herbacés. Une accumulation de sédiments est observée dans le premier tronçon à la fin de la zone de confinement identifiée dans le premier segment. Une avulsion a d'ailleurs été observée en aval de cette accumulation lors de l'inventaire terrain. Une rupture de pente est présente à environ 600 mètres sur la figure 21 et cette rupture correspond aussi au début d'une zone de transports caractérisé par un cours d'eau confiné par la roche mère. Les berges de ce tronçon ne sont aussi pas très hautes. Un embâcle de bois et une accumulation de sédiments causée par cet embâcle se retrouvent dans la zone de transport. Aussi, de gros blocs de roche de plus de 1 mètre de diamètre sont présents dans la cascade créée par la rupture de pente.

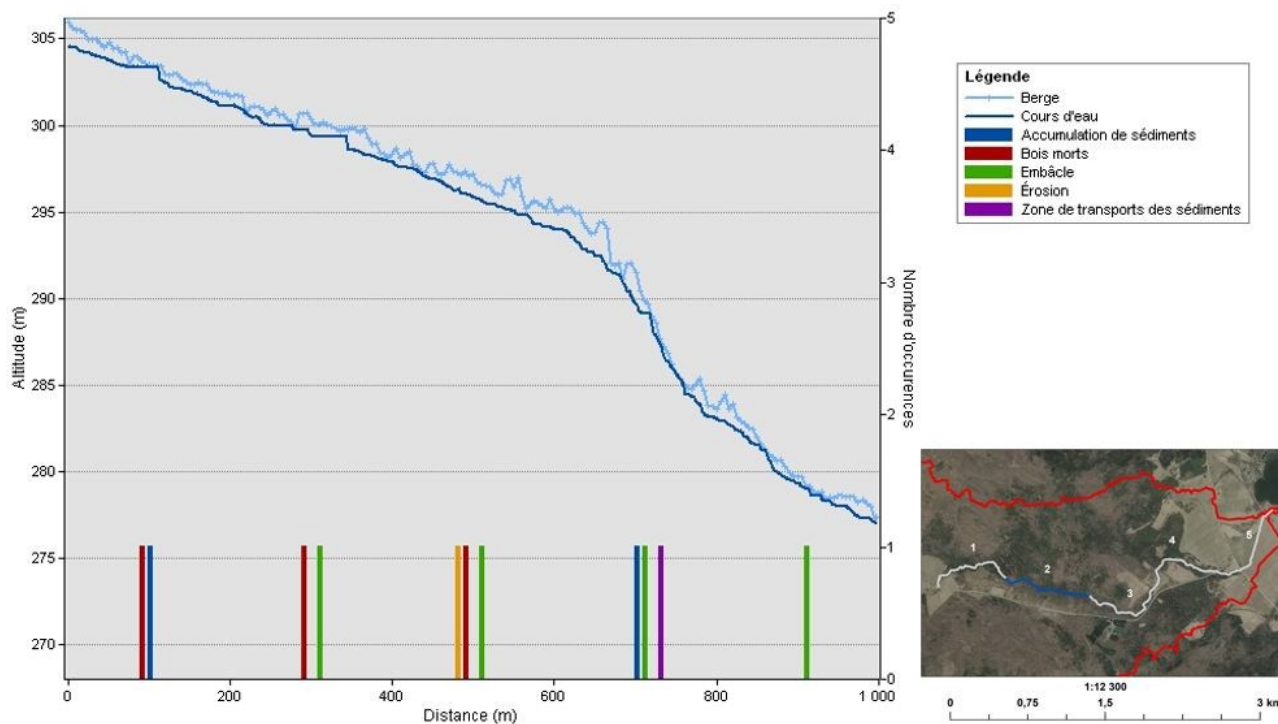


Figure 21 : Profil en long de la berge (bleu clair) et du cours d'eau (bleu foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le deuxième segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (bleu foncé).

En ce qui concerne le troisième segment (Figure 22), la pente est relativement régulière et aucune rupture de pente notable n'est observée. Une des observations notables de ce segment concerne la hauteur des berges du tronçon de 400 à 600 mètres. Comme le montre la figure 22, les berges peuvent atteindre presque 10 mètres de hauteur dans ce tronçon et des signes de glissement de terrain y sont observés. Ces glissements peuvent potentiellement être une source de sédiments et de bois morts pour le cours d'eau. Ensuite, quelques zones de transports sont observées au début et à la fin du segment comme l'indique la figure 22. La dernière zone de transports est causée par un aménagement de nature anthropique le long d'une route. Un enrochement a été fait afin d'empêcher les cours d'eau d'éroder la berge, ce qui aurait pu mettre en péril l'intégrité de la route à proximité. Les berges de chaque côté du cours d'eau ont été enrochées sur environ 100 mètres et celles du côté de la route atteignent plusieurs mètres de hauteur. Des signes d'érosion sont d'ailleurs observés à la suite de l'enrochement. Notons que vers la fin du segment, la pente s'adoucit légèrement et continue à s'adoucir dans les deux derniers segments.

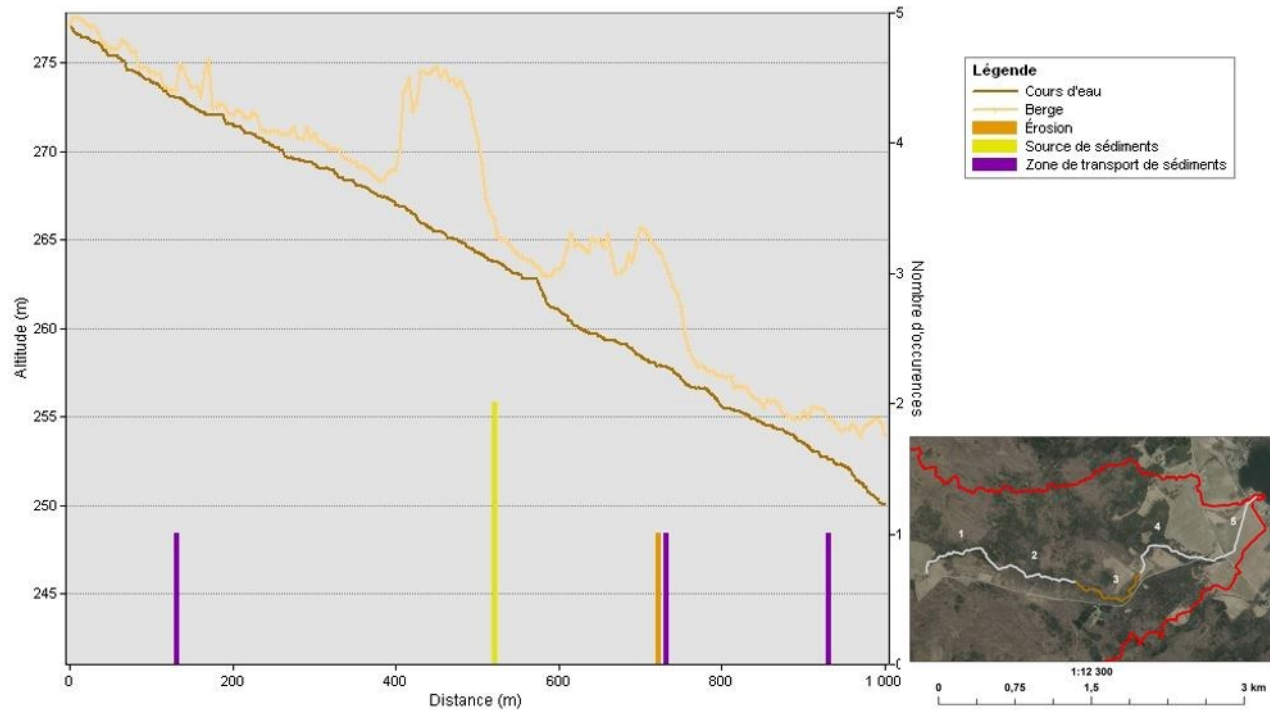


Figure 22 : Profil en long de la berge (orange claire) et du cours d'eau (orange foncée) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le troisième segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (orange foncée).

Au quatrième segment (Figure 23), la pente commence à s'adoucir légèrement vers l'aval, ce qui est observable en comparant les figures 22 et 23. Peu d'éléments d'intérêt sont observés dans ce segment à l'exception d'un tronçon du cours d'eau qui est confiné par la roche mère et quelques signes d'érosion des berges. Les berges ont une hauteur de plus ou moins deux mètres. Un pont qui traverse le cours d'eau y est aménagé au début du segment. Ce pont est en bois et semble avoir été affecté par le cours d'eau. En effet, sous l'un des piliers du pont, des blocs de roche aidant à soutenir le pont semblent avoir été emportés par le cours d'eau, probablement lors d'une crue. À l'approche du deuxième pont (Figure 24), servant aux automobiles, des accumulations de sédiments sont observables et deux d'avulsion sont repérables autour de ces accumulations. D'ailleurs, la transition entre le milieu forestier et agricole se fait approximativement à la hauteur du pont.

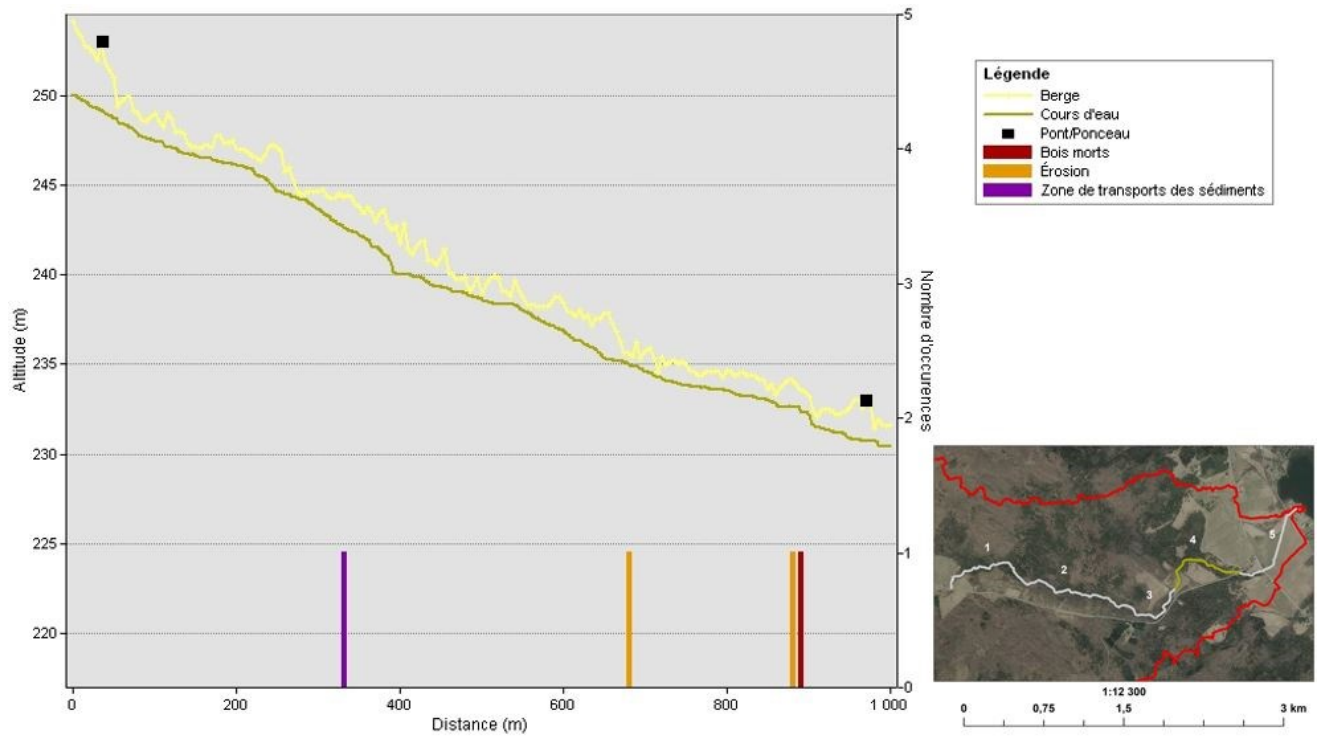


Figure 23 : Profil en long de la berge (jaune clair) et du cours d'eau (jaune foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le quatrième segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin versant du ruisseau Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (jaune foncé).



Figure 24 : Pont croisant le ruisseau Hall et le chemin Lessard à Dudswell (source : Antoine Pruneau, 2021)

Le dernier segment (Figure 25) est situé en zone agricole et termine sa course dans le lac Miroir. Après son passage sous le premier ponceau du segment, le cours devient très linéaire avec des berges occupées par quelques arbres et des herbacés. Le cours d'eau semble être entretenu afin de limiter les obstructions. Les berges atteignent environ 2 mètres de hauteur à certains points et la pente est généralement faible. Deux embâcles de bois sont présents dans les tronçons de 200 à 600 mètres. De légers signes d'érosion latérale y sont aussi observés. Notons que les berges semblent être désorganisées puisque des roches d'une multitude de grosseurs sont disposées de façon aléatoire dans les berges exposées par le cours d'eau. Le dernier pont est utilisé par les utilisateurs de la piste cyclable. En aval de ce pont, près de la zone anthropique, la hauteur des berges diminue de presque moitié avant de se jeter dans le lac.

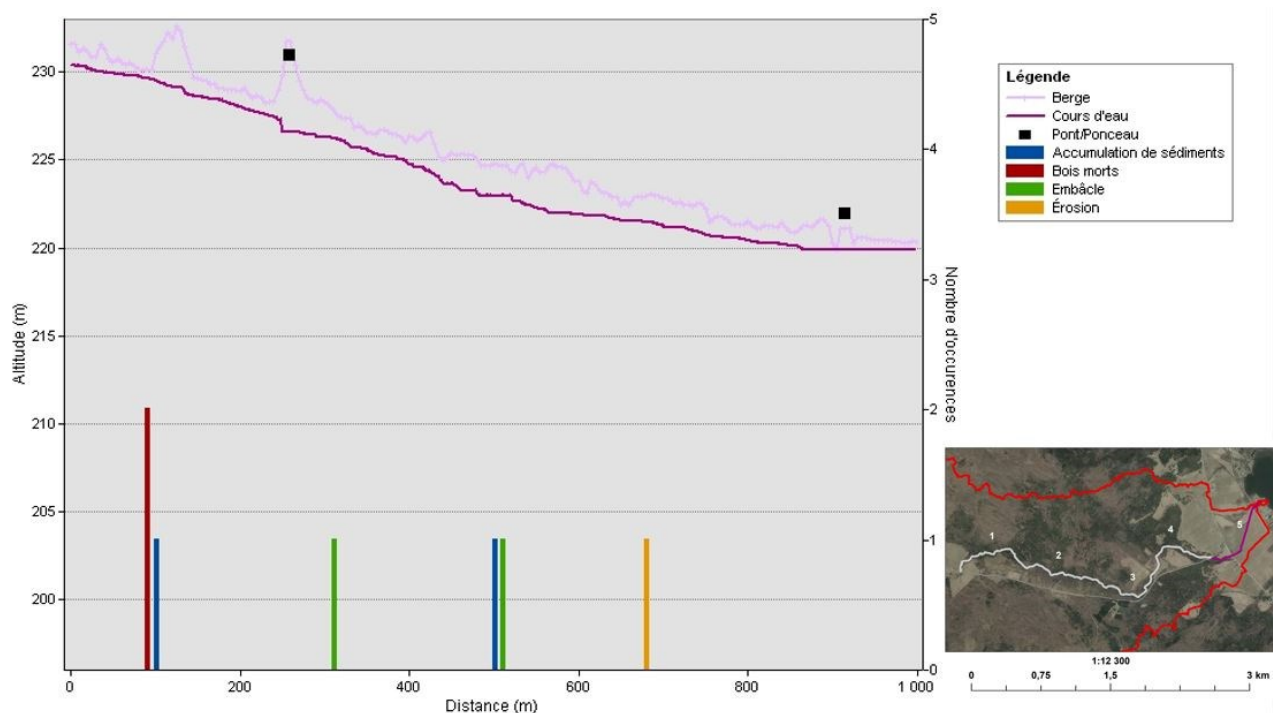


Figure 25 : Profil en long de la berge (mauve clair) et du cours d'eau (mauve foncé) et nombre d'occurrences de certaines observations terrain (diagramme à barres) pour le cinquième segment du ruisseau Hall à Dudswell. La carte en bas à droite localise le bassin Hall (rouge) ainsi que le segment à l'étude (mauve foncé).

Finalement, notons que sur la grande majorité du cours d'eau parcouru, les berges sont en constante érosion et que toute la section forestière peut en elle-même constituer une source de bois morts. Les signes d'érosion et les sources de bois morts identifiés sur les figures 20 à 23 ainsi que la figure 25 sont les observations prononcées de ces phénomènes. De plus, le cours d'eau est de nature

torrentielle et la grosseur des roches transportées semble indiquer un cours d'eau ayant une compétence relativement forte. Le profil en long du cours d'eau parcouru (Figure 18) montre une forme convexe en amont avec une pente plus faible en l'aval.

4.3. Surface d'expansion des cônes alluviaux et corridors potentiels d'avulsion

4.3.1. Cônes de Compton

Les résultats produits à partir des données LiDAR ont permis d'obtenir les surfaces d'expansions des cinq cônes à l'étude comme le montre la figure 26A. La figure 26B présente les corridors potentiels d'avulsion.

En ce qui concerne le cours d'eau du premier bassin versant (Figure 5B), quelques petites avulsions sont observées en amont de la forêt comme il est possible d'observer sur la figure 26A. Le reste du cours d'eau semble rester dans son lit, peu importe la variation topographique imposée. Cependant, à l'approche de la zone occupée par le parc de maisons mobiles, le cours d'eau déborde de son lit, et ce, dans le scénario de 50 cm. La zone 1 de la figure 26A montre la surface d'expansion probable du cône. Plus la variation topographique imposée lors des analyses est grande, plus la zone affectée prend de l'expansion. Dans le scénario à 150 cm, la plupart des maisons mobiles situées au nord semblent être à risque. Ensuite, le cours d'eau du deuxième bassin versant semble moins sortir de son lit en général, mais la forme du cône est mieux définie que le premier comme le montre la zone 2. Il est possible d'observer que le cône semble se terminer dans un autre cours d'eau. Les variations topographiques agrandissent légèrement la surface d'expansion de ce cône. Pour le troisième bassin versant de Compton, la surface d'expansion semble être plus affectée par les variations topographiques (zone 3). Le cône semble se créer à l'endroit où la pente s'adoucit. Au lieu de suivre la direction que le cours d'eau emprunte normalement, ce dernier semble tout simplement continuer sa course vers une habitation située en l'aval du cours d'eau. Il est possible d'apercevoir ces éléments dans la zone 3. Ensuite, le cours d'eau du quatrième bassin versant semble seulement être affecté par des variations topographiques du scénario de 150 cm et dans quelques cas lors de celui de 100 cm. Dans la zone 4, la surface d'expansion semble tout juste contourner une habitation, mais pourrait quand même potentiellement la mettre à risque. Ces écoulements semblent ensuite se diriger vers l'entreprise de cèdre. Dans les deux autres scénarios, soit les variations maximales de 50 et 100 cm, le cours d'eau rejoint tout simplement le cinquième cours d'eau. Le cours d'eau du cinquième bassin versant ne semble pas vraiment avoir de surface d'expansion définie. En effet,

à l'exception de quelques déviations du cours d'eau sur la terre agricole en amont, le cours d'eau semble rester dans son lit dans la zone forestière jusqu'à proximité du pont en aval. Cependant, deux terrains en aval semblent être à risque. En effet, les changements topographiques des scénarios de 100 cm et 150 cm modifient la trajectoire de l'écoulement de l'eau en provenance du cours d'eau 5 vers le nord-ouest. À l'approche du ponceau, le cours d'eau déborde de son lit à quelques reprises. D'ailleurs, les débordements du cours d'eau qui s'écoule dans la zone agricole en amont semblent être partiellement à l'origine des écoulements traversant le terrain de la zone 5.

En ce qui concerne les corridors d'avulsion potentiels, quelques corridors semblent ressortir dans les cônes 2 et 3 (Figure 5B). En effet, les analyses semblent indiquer que dans le cas d'une avulsion, les encadrés 3 et 4 de la figure 26B sont plus à risque. Ces deux zones sont en région forestière et une rupture de pente est présente un peu plus en amont. Ensuite, une partie du parc de maisons mobiles semble être propice aux avulsions comme le montre l'encadré 1 de la figure 26B. En effet, un grand nombre de simulations ont créé des avulsions en direction de cette zone comparativement au reste du site d'étude. Ensuite, les zones 2 et 4 semblent aussi être propices aux avulsions. Les encadrés de la zone 2 sont occupés en partie par l'entreprise Cèdres des Cantons. En effet, un de leurs bâtiments ainsi qu'une partie de leur terrain serait potentiellement à risque. Beaucoup de simulations sont aussi passées par la zone 4, qui est une zone forestière située en amont d'un terrain appartenant à l'une des habitations à proximité. Finalement, la zone 5 semble également à risque d'une avulsion. Cette partie est située autour du cours d'eau se dirigeant vers le ponceau au sud. Cette zone semble à risque de débordement, mais le grand nombre de simulations passant dans cet encadré peuvent potentiellement provenir des débordements du cours d'eau sur les terres agricoles en amont.

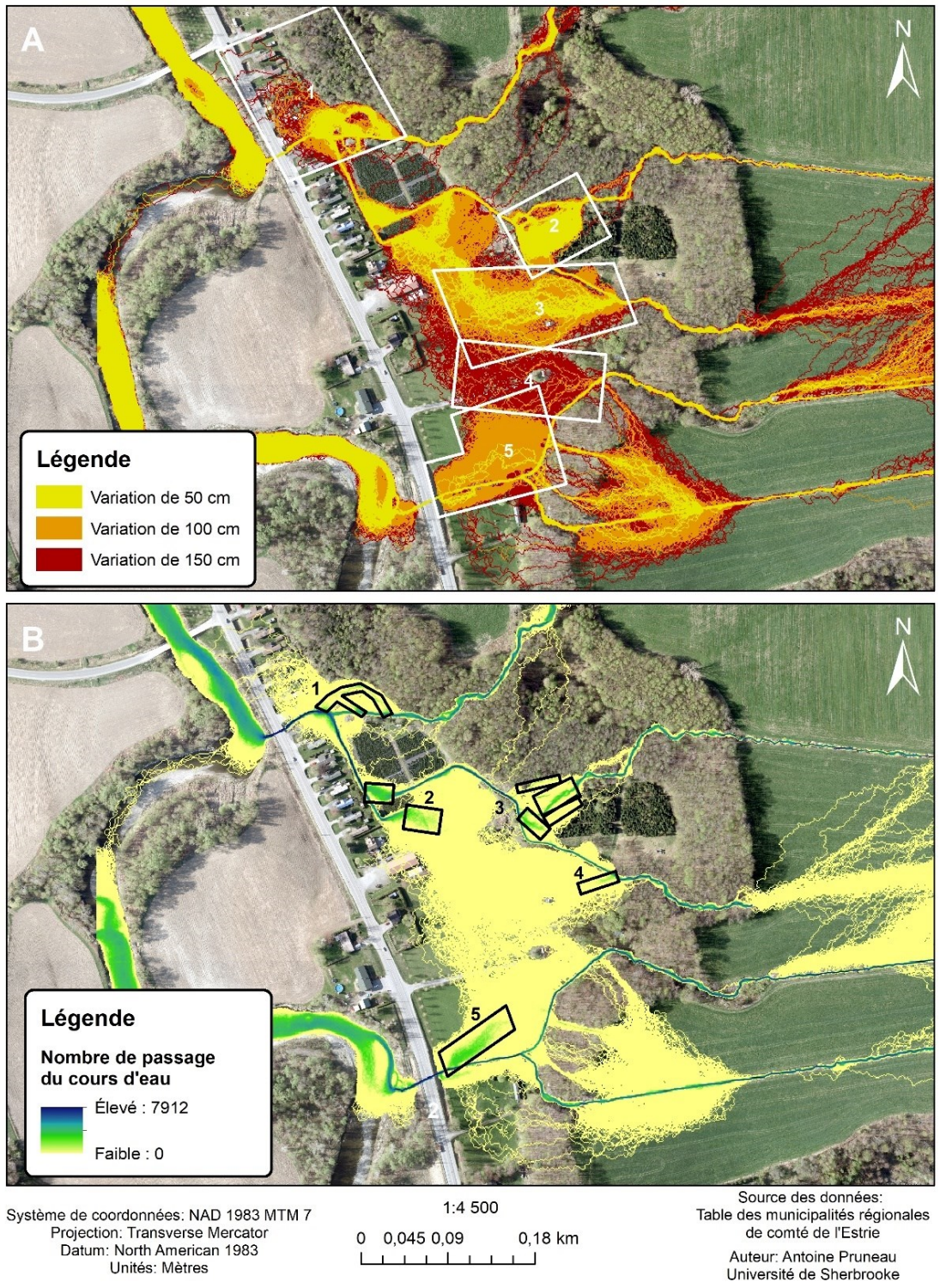


Figure 26 : Surface d'expansion des cônes alluviaux, selon les variations topographiques (A). Les encadrés blancs indiquent les surfaces d'expansion des cinq cônes alluviaux de Compton. La figure B présente une combinaison des scénarios à 50 cm, 100 cm et 150 cm.

4.3.2. Cône du ruisseau Hall

À la suite des analyses, il est possible d'observer un cours d'eau qui semble peu affecté par les variations topographiques maximales de 100 cm, 150 cm et 200 cm. En effet, le cours d'eau sort de son lit à quelques reprises comme dans les zones 1 et 2 de la figure 27A. Aucune surface d'expansion n'est réellement visible à la suite des analyses. Cependant, notons que certaines habitations près du lac Miroir semblent à risque dans le scénario où une augmentation de 2 mètres du niveau du cours d'eau serait observée près du ponceau de la piste cyclable (zone 3). Dans les deux autres cas, les habitations ne semblent pas être sur le chemin du cours d'eau qui se déverse directement dans le lac.

En ce qui concerne les corridors d'avulsions potentiels, présentés à la figure 27B, seulement quelques secteurs forestiers semblent susceptibles à ce phénomène. Dans la zone 1, deux endroits ont subi des avulsions à multiple reprise lors de l'analyse dont l'une d'entre elles est située près d'un pont. Un autre secteur a été observé entre deux des ponts (zone 2), mais une seule avulsion claire dans le scénario de 2 mètres a été aperçue. La zone 3 pourrait potentiellement être à risque. En effet, quelques simulations d'écoulement sortent du lit du ruisseau Hall et inondent un terrain à proximité sans que le risque soit élevé.

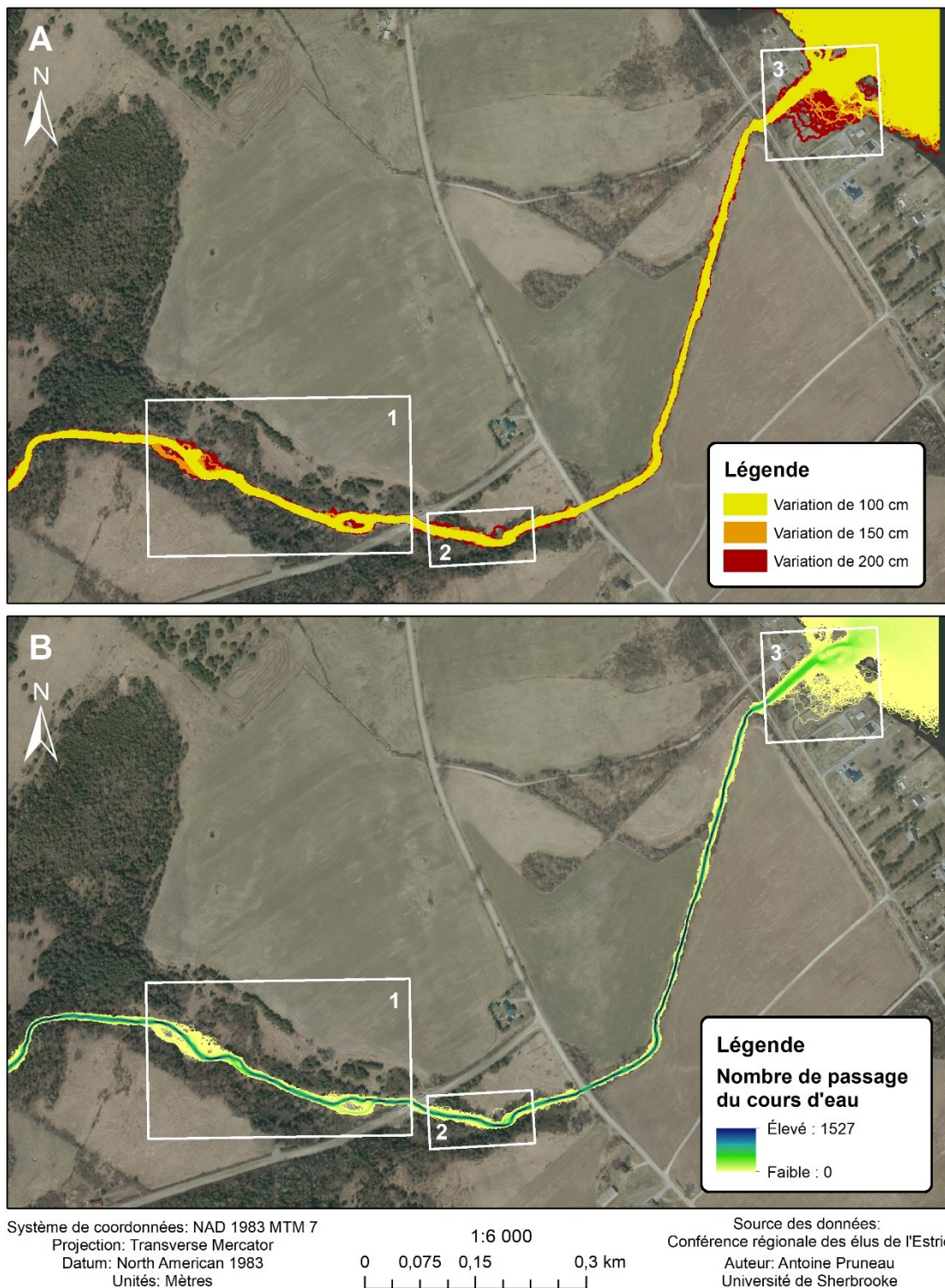
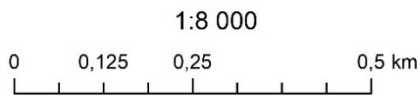
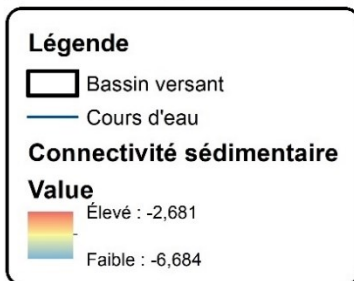
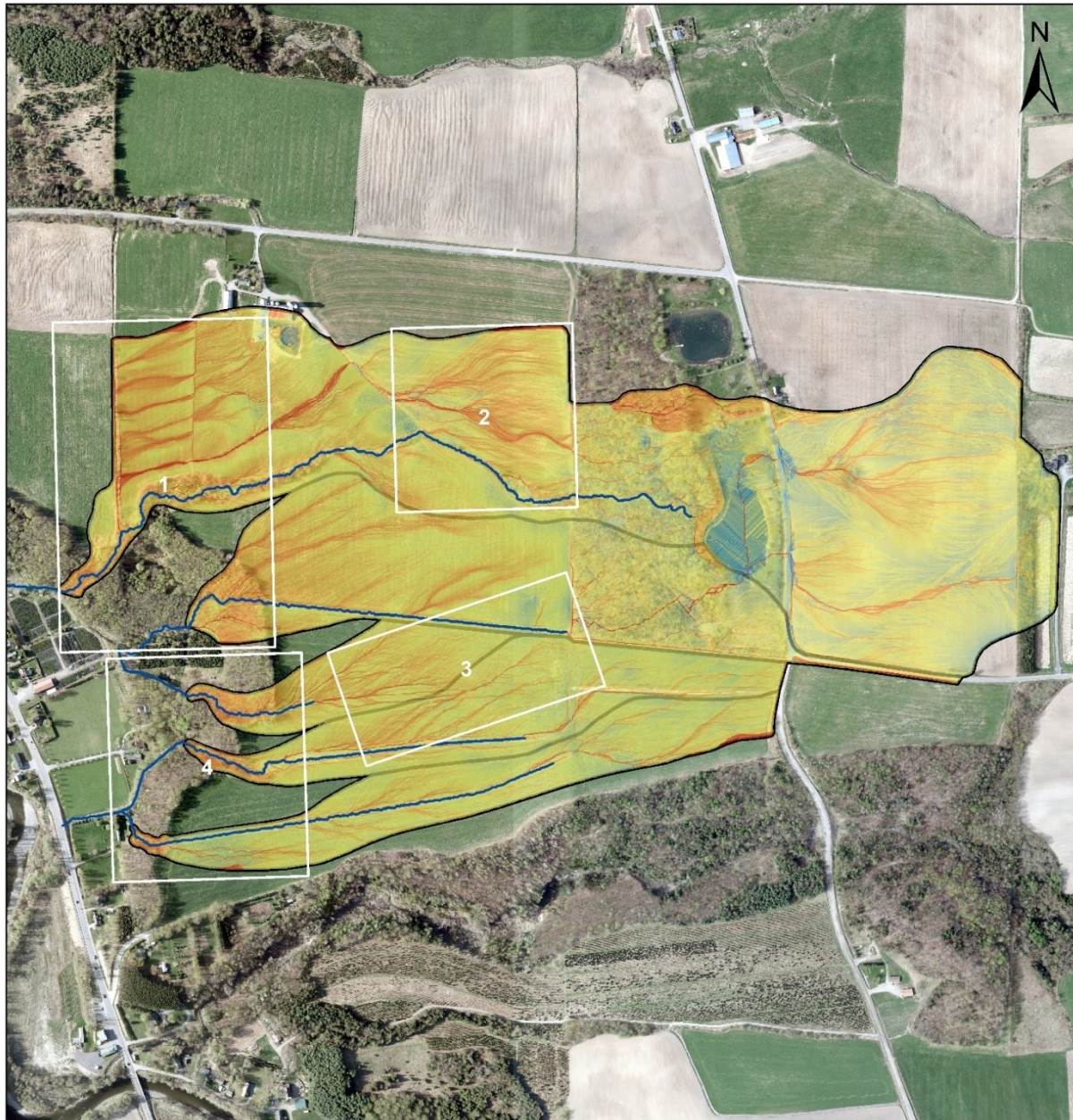


Figure 27 : Résultats des analyses pour la surface d'expansion du cône alluvial du ruisseau Hall selon les variations topographiques de 100 cm (jaune), 150 cm (orange) et 200 cm (rouge). La figure B présente une combinaison des trois scénarios qui représente les corridors d'avulsion potentiels dans les encadrés blancs.

4.4. Connectivité sédimentaire

4.4.1. Cônes de Compton

La connectivité sédimentaire est semblable pour chacun des bassins versants des cônes alluviaux de Compton. En effet, l'amont des bassins versants est généralement moins connecté que les zones en aval. Les zones près de l'apex des cônes ont aussi des valeurs de connectivité relativement élevée comparativement au reste du bassin versant comme le montrent les zones 1 et 2 de la figure 28. La zone forestière la plus en amont semble aussi moins connectée que le reste de la zone d'étude. En général, les zones de plus forte connectivité correspondent aux endroits présentant une forte pente. Notamment, dans les zones où une rupture de pente est observée, comme à la transition entre la zone agricole et forestière, la connectivité augmente. Cette observation peut être faite pour l'ensemble des cinq zones. Dans le cas des bassins versants 3, 4 et 5, la figure 28 montre que les zones de ravinement sont plus fortement connectées. Sur la même figure, il est possible d'apercevoir certains filaments (zone 3), en provenance du deuxième cours d'eau vers les cours d'eau des bassins versants 3 et 4, dont l'indice de connectivité est plus élevé. D'ailleurs, sur l'ensemble des bassins versants étudiés, plusieurs filaments de forte connectivité sont observables (zone 1, zone 2 et zone 3). Ces filaments ne sont pas des cours d'eau documentés, mais ces derniers correspondent à des trajectoires d'écoulement préférentiel. Les filaments situés dans la zone 1 et dans la zone 3 sont localisés dans des champs laissés en foin alors que ceux localisés dans la zone 2 sont situés dans des cultures de maïs. Les berges des cours d'eau ont aussi une forte connectivité sédimentaire. La connectivité sédimentaire moyenne de l'ensemble des bassins versants est de -4,89. La valeur la plus élevée est de -2,68 et la valeur la plus faible est de -6,68, les deux sont retrouvés dans le bassin versant 1.



Source des données:
Table des municipalités régionales
de comté de l'Estrie

Système de coordonnées:
NAD 1983 MTM 7
Projection: Transverse Mercator
Datum: North American 1983
Unités: Mètres

Auteur: Antoine Pruneau
Université de Sherbrooke

Figure 28 : Indice de connectivité sédimentaire pour les bassins versants des cinq cônes alluviaux de Compton. Les encadrés blancs correspondent à des zones d'intérêt.

4.4.2. Cône du ruisseau Hall

Globalement, le bassin versant du ruisseau Hall a une connectivité sédimentaire relativement hétérogène, mais certaines zones plus homogènes sont identifiables sur la figure 28. Tout d'abord, la zone à l'ouest de la figure 29A a une connectivité sédimentaire faible alors que pour la région au sud, l'indice est relativement fort comparativement à l'ensemble du bassin versant. Il est possible d'observer que les zones à proximité du ruisseau Hall sont aussi plus fortement connectées, comme les zones 1 et 2 de la figure 29B, ainsi que les zones de forte pente. La zone 1 est caractérisée par des zones où des berges très hautes présentent des signes de glissement de terrain. La zone 3 a aussi une valeur de connectivité sédimentaire élevée et est située en zone agricole dont le réseau de drainage a été augmenté. Un cours d'eau agricole rejoint d'ailleurs le ruisseau Hall dans cette zone. Ces filaments correspondent aux trajectoires d'écoulement préférentiel. La majorité des parcelles agricoles dans cette zone sont des champs laissés en foin et quelques parcelles forestières y sont situées. La valeur de connectivité sédimentaire la plus faible est -7,37 pour l'ensemble du bassin versant alors que la valeur la plus élevée est de -1,63. L'indice de connectivité sédimentaire moyenne était de -5,40 avec un écart-type de 0,48.

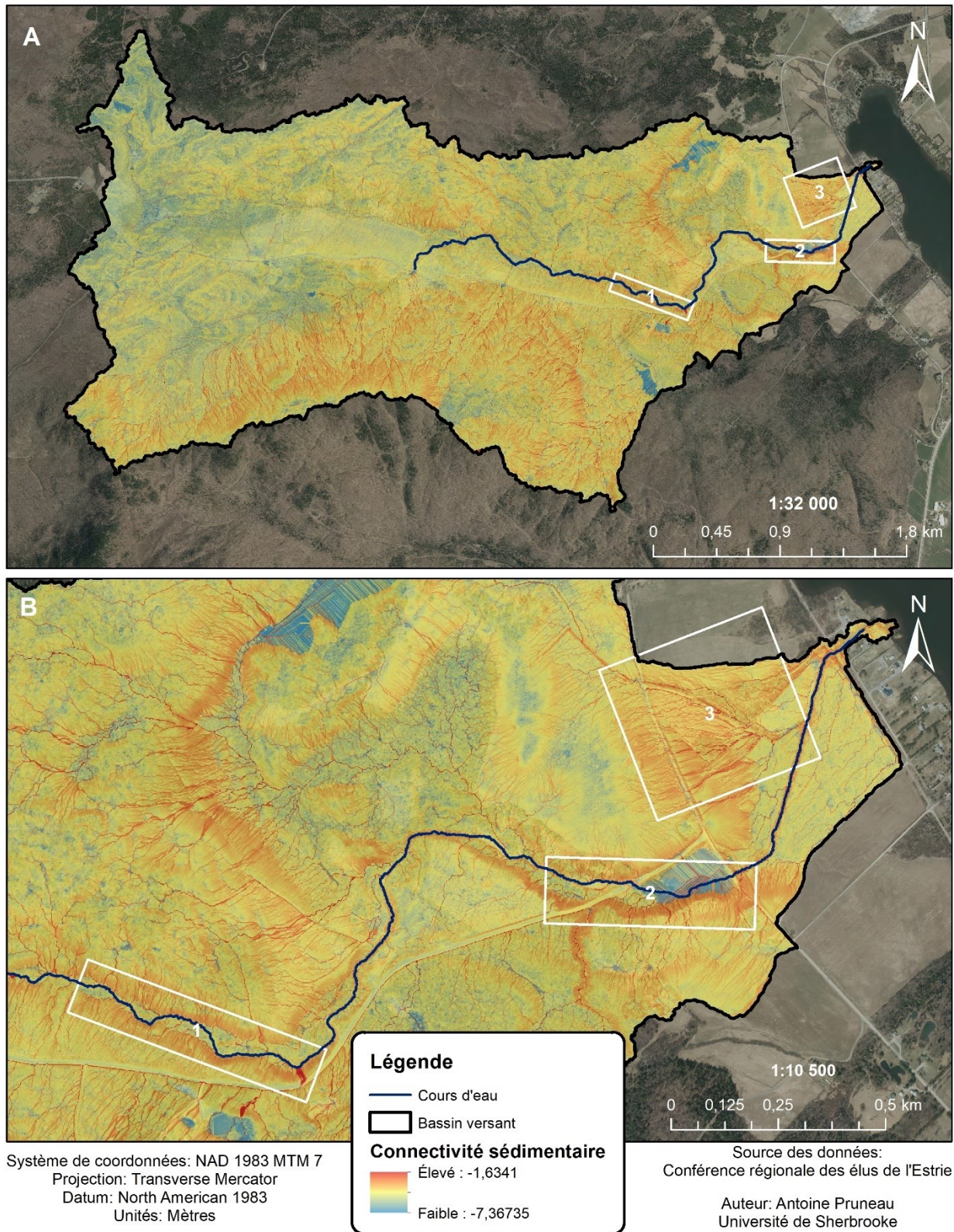


Figure 29 : Indice de connectivité sédimentaire du bassin versant du ruisseau Hall (A). Trois zones (encadrés blancs) d'intérêt sont identifiées en aval du bassin versant (B).

5. Discussion

Cette section porte sur l'interprétation des résultats en lien avec chacun des objectifs de l'essai. Elle permet de rassembler les informations des différentes parties des résultats et d'en faire ressortir les éléments importants pour le site de Compton et de Dudswell. L'objectif 1 consiste à inventorier les sources de sédiments et de bois morts, l'objectif 2 consiste à faire l'inventaire des ponts et ponceaux et l'objectif 3 consiste en l'identification de la surface d'expansion et des corridors potentiels d'avulsion. Les objectifs 4 et 5 consistent respectivement en l'analyse des sources de sédiments ainsi que de bois morts pour déterminer le potentiel d'aggradation ainsi que l'analyse de l'apport des cours d'eau en sédiments vers les cônes alluviaux étudiés. La section discute ensuite des limites de l'étude et des recommandations concernant la suite du projet.

5.1. Cônes alluviaux de Compton

Les analyses des bassins versants à l'étude de Compton suggèrent la présence de cônes alluviaux pouvant mettre à risque des infrastructures. La figure 30 présente une synthèse des observations et des analyses effectuées. En ce qui concerne les objectifs 1, 4 et 5, pour les cinq cônes alluviaux de Compton, les sources de sédiments et de bois morts sont d'origine diverse selon les différents bassins versants. Pour les bassins versants 1 et 2, une petite partie des sédiments semble provenir de l'érosion naturelle des berges. En effet, des signes d'érosion des berges sont observés un peu partout le long des deux cours d'eau en amont des cônes. Pour le premier cours d'eau, une source potentielle de sédiments est située un peu en amont du parc de maisons mobiles et du cône alluvial. Cette zone est caractérisée par des berges de quelques mètres de hauteur qui présentent des signes de glissements de terrain et peuvent contribuer à l'aggradation et l'apport en sédiments fins et grossiers de façon ponctuelle, dans le premier cône. Aussi, des zones d'écoulement préférentiel ayant une forte connectivité sédimentaire rejoignent le cours d'eau cependant, leur apport est potentiellement moindre puisque cette zone est constituée de champs de foin et donc, qu'il y a peu de sols nus. En effet, les sols de ce type ont un faible apport en sédiments fins dans les cours d'eau (AGRCQ, 2017). Ensuite, la principale source de bois morts provient des zones boisées dans lesquelles la majorité du cours d'eau est situé. Aucune autre source majeure de bois morts n'a été identifiée. En ce qui concerne le deuxième cours d'eau, les sédiments proviennent en partie de l'érosion des berges du cône et de l'érosion régressive présente à l'entrée de la forêt en amont de l'apex du cône. Le cours d'eau semble se creuser et cela pourrait être la principale source de sédiments fins et grossiers dans ce cas-ci. Les sources de bois morts sont

composées des arbustes situés le long du cours d'eau en zone agricole et des arbres morts dans la partie forestière. Un autre élément à considérer pour bien cibler les sources des sédiments dans ce bassin versant est le type de culture. Les parcelles agricoles situées au nord du cours d'eau du bassin versant 2 servent actuellement pour la culture du maïs. Les cultures de maïs sont à grand interligne, c'est-à-dire qu'il y a de grands espacements entre les rangs de maïs. Selon l'AGRCQ (2017), ce type de culture est l'une des plus propices à l'érosion, augmentant de ce fait l'apport en sédiments dans les cours d'eau à proximité. Plusieurs corridors ayant une forte connectivité sédimentaire traversent d'ailleurs les champs de maïs des bassins versants 1 et 2. Cependant, le reste des bassins versants ont une connectivité sédimentaire moyenne. Ensuite, du ravinement est présent dans les bassins versants 3, 4, 5 et potentiellement dans le bassin versant 2. À l'entrée de la forêt, les berges sont beaucoup plus hautes que le lit du cours d'eau et des signes de glissement de terrain sont visibles dans la zone de ravinement. Les processus de ravinement débutent lorsque l'écoulement de l'eau d'une région est concentré vers un même point d'une rupture de pente (Brooks et al., 2012). Dans le cas de ces trois bassins versants, le réseau de drainage force l'écoulement de l'eau vers un même point et vers une rupture de pente située à la limite de la forêt. De plus, certaines occupations du sol augmentant le ruissellement peuvent contribuer à la création de ce genre de formation (Brooks et al., 2012). L'inventaire terrain a permis de constater la présence d'un réseau hydrographique linéaire sur les terres en amont de la rupture de pente, pour les bassins versants 3, 4 et 5. Ce facteur facilite notamment le ruissellement et la vitesse par lequel ce processus s'effectue (AGRCQ, 2017). D'ailleurs, l'érosion dans les ravins peut être accélérée par la vitesse et le volume d'eau, entre autres. Comme les ravins sont propices aux glissements de terrain, c'est-à-dire qu'une partie des berges se détache et tombe sous la force de la gravité (Brooks et al., 2012), il est possible de poser comme hypothèse que pour les cours d'eau des bassins versants 3, 4 et 5, la principale source de sédiments fins et grossiers provient des zones de ravinement. Les mouvements massifs de sols peuvent survenir lors d'événements torrentiels. La végétation permet de limiter ce genre de mouvement dans les endroits de forte pente. En revanche, les ravins des bassins versants 3, 4 et 5 sont dénudés, augmentant donc le risque de glissement de terrain. Notons que des cônes peuvent se former lorsqu'un ravin rencontre une plaine alluviale et que les cours d'eau étudiés de Compton se retrouvent dans ce type d'environnement (Brooks et al., 2012). De plus, selon les analyses de connectivité sédimentaire, les zones de ravinement font partie des secteurs les plus fortement connectés de leur bassin versant respectif. Les sources de bois morts pour les cours d'eau

3, 4 et 5 proviennent majoritairement des arbustes qui poussent sur leurs berges et la bande riveraine en zone agricole ainsi que de la forêt pour la section plus en aval du cours d'eau. Finalement, pour l'ensemble des cinq bassins versants, la contribution des cours d'eau à la formation des cônes alluviaux provient majoritairement du fait qu'ils ont été linéarisés et que cela favorise le ruissellement ainsi que l'incision (AGRCQ, 2017). La linéarisation a probablement affecté la dynamique des cônes de Compton. Les sources de sédiments disponibles à proximité, soient par l'incision, l'érosion et le ravinement, et la forme convexe du cours d'eau favorise aussi la formation de cônes alluviaux pour chacun des cours d'eau étudiés à Compton (National Research Council, 1996).

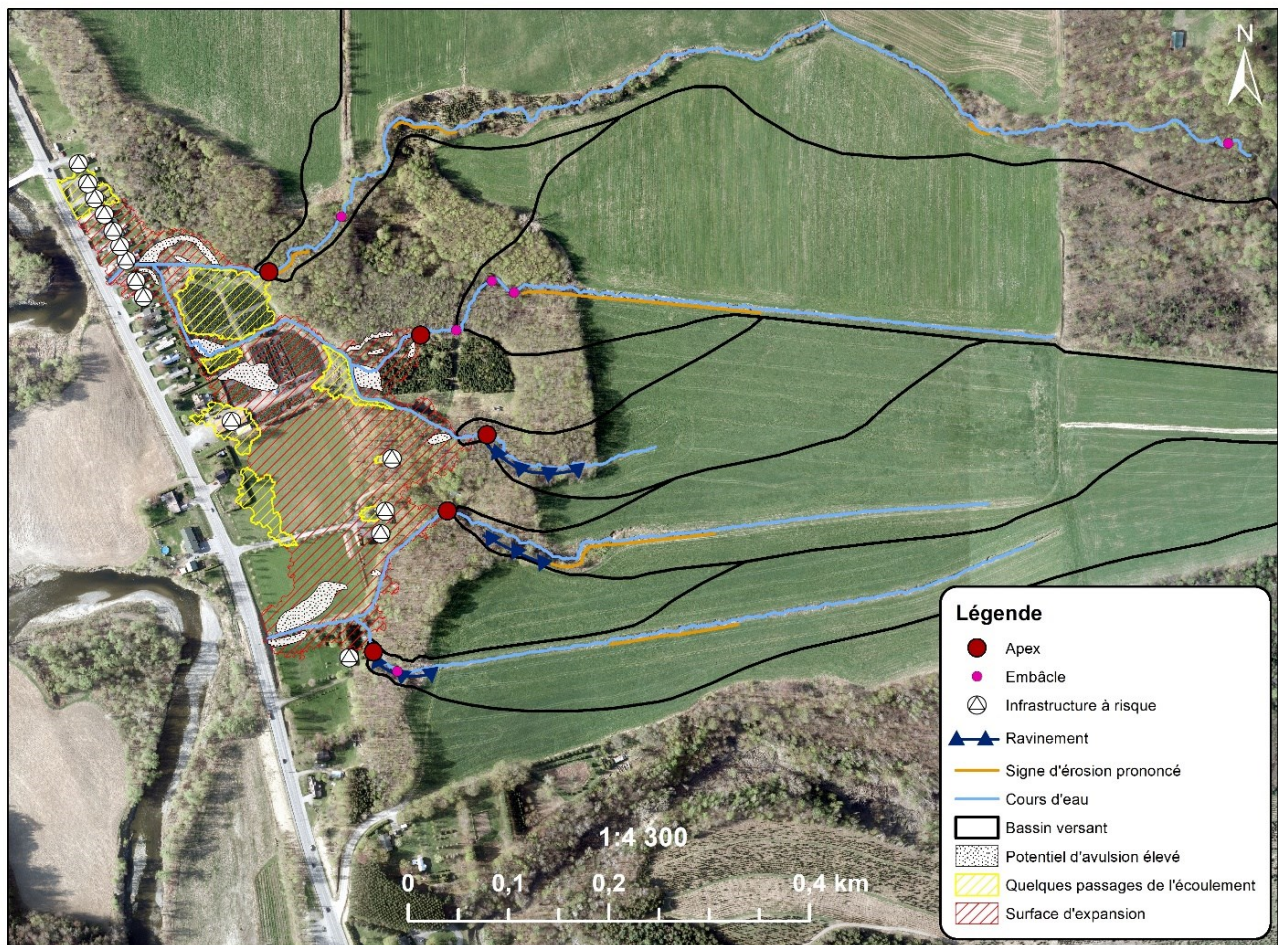


Figure 30 : Synthèse des observations et des analyses effectuées pour les cinq cônes alluviaux de Compton.

En ce qui concerne l'objectif 2, aucun signe n'a été observé lors de l'inventaire terrain indiquant un problème au niveau de l'influence des ponceaux présents sur la dynamique des cours d'eau.

Cependant, les analyses de surfaces d'expansions indiquent qu'il y a potentiellement du refoulement au ponceau au sud de la zone d'étude, mais il est aussi possible que les écoulements passant par cette zone proviennent de débordement en amont du cours d'eau. En effet, des débordements en aval de la zone de ravinement, lors des simulations à des scénarios de 100 et 150 cm, semblent en partie composer les écoulements visibles à cet endroit. Dans le cas où le ponceau causerait du refoulement, cela indiquerait potentiellement que le ponceau est trop petit pour le volume d'eau (Buffin-Bélanger et Héту, 2008). Des études plus approfondies des ponceaux seraient cependant nécessaires afin de comprendre les impacts possibles de ces infrastructures sur la dynamique des cours d'eau et des cônes alluviaux.

Les analyses de la surface d'expansion et des corridors d'avulsion, soit l'objectif 3, ont permis de déterminer que des cônes alluviaux sont bien présents pour les cinq bassins versants étudiés à Compton. Le premier cours d'eau est problématique pour le parc de maisons mobiles. En effet, les berges en aval sont relativement basses et font en sorte qu'une variation topographique de 50 cm et moins pourrait causer une avulsion en direction des maisons mobiles situées au nord. Cette zone semble aussi à risque puisqu'une source de sédiments est retrouvée légèrement en amont de l'apex du cône et que le cours d'eau entre dans une région plus plane en provenance d'une région de forte pente, diminuant la capacité de transports des sédiments et augmentant le risque d'aggradation. L'aggradation est d'ailleurs un facteur qui rend susceptible un secteur aux avulsions (Slingerland et Smith, 2004). La surface d'expansion du deuxième cône se trouve entièrement en zone forestière et selon les analyses, ne pose presque aucun risque pour les infrastructures en aval. Cependant, aucun chenal bien défini n'a été observé en aval de l'apex du cône. La dispersion des sédiments dans le cône est assez visible sur le terrain et de ce fait, l'écoulement de l'eau semble se faire sur la majorité de la surface d'expansion du cône. Les corridors d'avulsion identifiés sont donc probablement empruntés par le cours d'eau relativement fréquemment dans ce cône sans être les chenaux principaux. C'est probablement pour cette raison que plusieurs corridors d'avulsion sont présents dans ce cône. En revanche, le cours d'eau qui intercepte l'écoulement dans le cône déborde à quelques reprises pour inonder une grande partie du terrain de l'entreprise de production de cèdres. La surface du troisième cône est relativement grande et les risques de débordement semblent relativement élevés pour les trois scénarios analysés. La surface du cône débute environ à la fin de la zone de ravinement où les berges sont peu élevées pour le reste du cours d'eau. La pente s'adoucit aussi environ à cet endroit, donc le potentiel d'aggradation est plus élevé dans cette

zone surtout en considérant que la zone de ravinement est tout juste en amont. Lors des débordements du cours d'eau, l'écoulement se dirige vers une maison située dans la plaine alluviale et cette dernière est probablement à risque. Puis l'écoulement se dirige vers l'entreprise de production de cèdres, qui est aussi à risque de ce côté, et rejoint éventuellement le cours d'eau qui se jette dans la rivière Coaticook. Le quatrième cône alluvial débute également à la fin de la zone de ravinement où la pente s'adoucit. En revanche, contrairement au troisième cône, les berges sont légèrement plus hautes. La hauteur des berges en aval de la zone de ravinement pourrait partiellement expliquer la raison pour laquelle les débordements surviennent seulement lors du scénario de 150 cm. Le potentiel d'aggradation est relativement élevé en raison de l'apport potentiel en sédiment fin et grossier du ravin. De plus, une maison semble sur la trajectoire de l'écoulement ainsi que l'entreprise de cèdres. En ce qui concerne le cinquième bassin versant de Compton, la surface du cône semble en partie créée par les débordements du cours d'eau dans la zone agricole qui crée de nouveaux chenaux d'écoulement. En effet, une partie des débordements du chenal situé entre le cours d'eau 4 et 5 semble s'écouler directement vis-à-vis les points de débordement en aval de la zone forestière. D'autres débordements sont visibles juste avant le ponceau qui se jette dans la rivière Coaticook. Ces derniers surviennent dans une zone où les berges ne sont pas hautes, mais semblent ne pas affecter d'infrastructures. Ces débordements peuvent potentiellement provenir du cours d'eau qui est sorti de son lit plus en amont ou encore d'un refoulement causé par le ponceau.

5.2. Cône alluvial du ruisseau Hall

En ce qui concerne les objectifs 1, 4 et 5, les principales sources de sédiments proviennent en majorité de l'érosion naturelle des berges et du lit du ruisseau Hall. Une grande quantité de bois morts et d'embâcles de bois ont été retrouvés le long du cours d'eau. Cela est normal considérant l'environnement dans lequel la majorité du cours d'eau se situe, soit une zone forestière. La majorité du bois provient de la mortalité des arbres et à quelques endroits, du mouvement latéral du cours d'eau qui déracine les arbres près des berges et les fait tomber. L'enrochement situé dans le quatrième segment peut aussi potentiellement être problématique en ce qui concerne la dynamique sédimentaire du cours d'eau (Figure 31). En effet, Demers et al. (2017) affirme qu'un enrochement peut augmenter l'intensité de l'érosion en aval de cette installation notamment due à l'augmentation de la vitesse en aval de la zone enrochée. Lors de l'inventaire terrain, des signes d'érosion prononcée ont notamment été observés en aval. Selon les analyses de connectivité, cette

zone a une connectivité moyennement forte (Figure 32). De plus, tout juste en amont de l'enrochement, une zone ayant des berges hautes et présentant des signes de glissement de terrain est présente. Cette zone, ayant une forte connectivité sédimentaire, peut potentiellement apporter beaucoup de sédiments dans le cours d'eau lorsqu'un glissement pelliculaire survient (Brooks et al., 2012). La combinaison de la zone de transport causée par l'enrochement, la source de sédiments en amont et l'érosion potentiellement plus intense en aval pourrait être problématique pour l'apport en sédiments et augmenter le risque d'avulsion et d'aggradation en aval. Cependant, notons que la zone enrochée est fortement connectée et que l'enrochement permet de réduire l'érosion et du même coup, réduire l'apport en sédiments fins et grossiers de cette zone (Demers et al., 2017).



Figure 31 : Enrochement situé dans le segment 4 du ruisseau Hall à Dudswell (source : Antoine Pruneau, 2021)

Au niveau de l'objectif 2, les ponts et ponceaux semblent avoir peu d'influence sur la dynamique du cours d'eau. En effet, ces derniers ne semblent pas obstruer le passage de l'eau. En revanche, de l'aggradation est visible en amont de l'un des ponts et sous ce dernier. Cela pourrait potentiellement indiquer un refoulement de l'eau lors des crues et événements torrentiels causant une accumulation de sédiments. Le potentiel refoulement de l'eau pourrait être lié à un espace trop petit en dessous du pont pour le volume d'eau transporté lors des crues (Buffin-Bélangier et Héту, 2008). Notons qu'une étude portant sur l'influence des ponts et ponceaux de Dudswell devrait être effectuée afin d'analyser les impacts potentiels de ceux-ci sur la dynamique du ruisseau Hall.

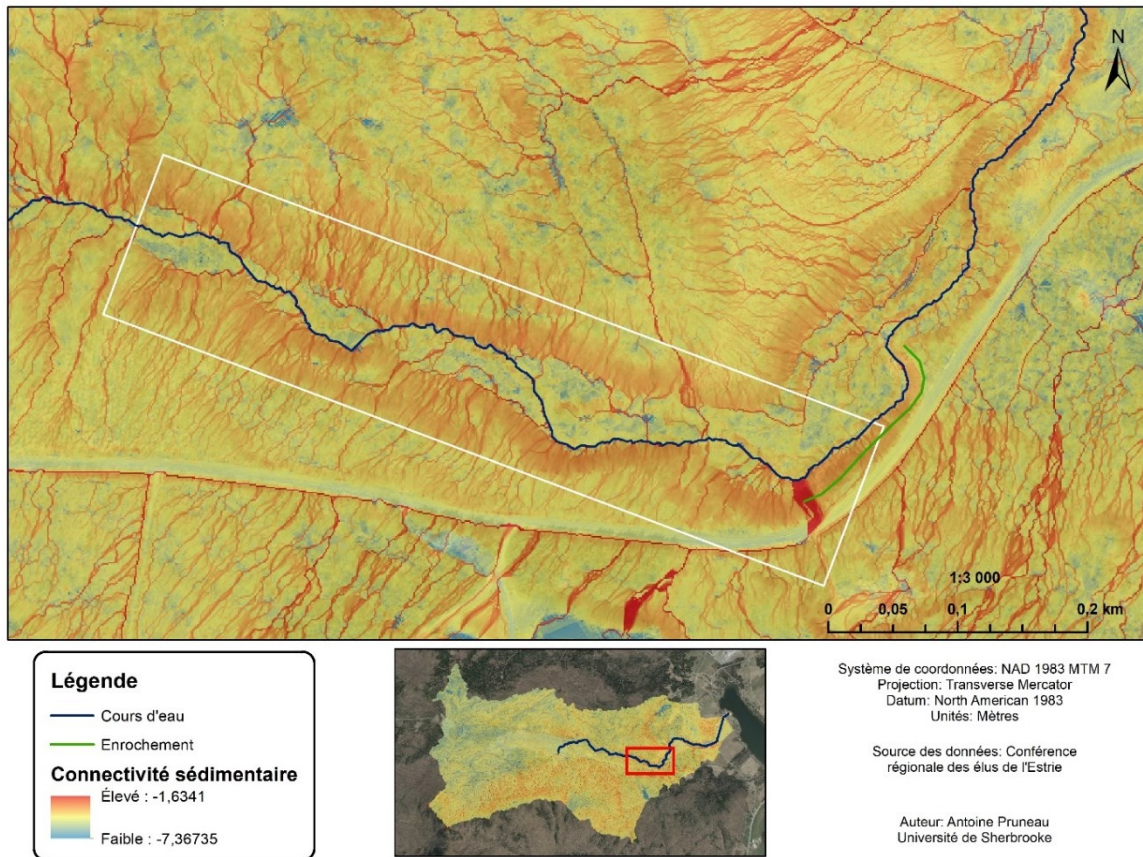


Figure 32 : Emplacement de l’enrochement (vert) et la connectivité sédimentaire dans le bassin versant du ruisseau Hall. L’encadré blanc représente une zone de forte connectivité.

Ensuite, en ce qui concerne l’objectif 3, le cours d’eau en zone agricole a été linéarisé entre 1960 et 1988 et ne semble pas avoir subi de modification depuis cette période. Sur la photo de 1960, des signes potentiels d’avulsion sont observés et peuvent indiquer que le cours d’eau a été linéarisé pour ces raisons. En effet, la linéarisation permet notamment de limiter le mouvement de la trajectoire du cours d’eau. Les avulsions visibles sur les photographies aériennes de 1960 pourraient avoir été causées par un volume d’eau et des débits trop élevés pour le cours. Les travaux de linéarisation et potentiellement de dragage pourraient avoir débuté à la suite à ces événements afin d’avoir plus de contrôle sur le cours d’eau. D’ailleurs, les berges désorganisées, soit des berges composées de différent type de sédiments autant grossiers que fins ainsi que de gros cailloux, qui étaient visibles dans la zone agricole, peuvent indiquer la présence d’un cône alluvial. Les sédiments ne semblaient pas avoir de structure et semblaient avoir été déposés par un phénomène naturel, tel qu’une inondation. En effet, lors de la formation et des différents processus survenant sur un cône alluvial, les sédiments sont déposés un peu partout sur la surface du cône (National

Research Council, 1996). Cependant, les analyses EXZECO suggèrent qu'il ne semble pas y avoir de cône alluvial en aval du ruisseau Hall. Aucune surface d'expansion et corridors potentiels d'avulsion n'est observée. L'ensemble de ces informations peut indiquer que la zone près du lac Miroir est potentiellement un cône alluvial inactif et que ce dernier présente peu de risque dans son état actuel. Deux sections du cours d'eau ont en revanche montré un potentiel d'avulsion. Des signes d'aggradation de sédiments grossiers ont été observés au centre du cours d'eau à ces deux endroits et le cours d'eau est d'ailleurs séparé en deux à cet endroit. Ces deux sections indiquent qu'il y a un potentiel d'aggradation dans cette zone et qu'une source de sédiments est présente en amont (AGRCQ, 2017). L'aggradation pourrait potentiellement provenir d'un refoulement de l'eau à proximité des ponts (Buffin-Bélanger et Héту, 2008). En général, le cours d'eau semble susceptible aux avulsions, surtout en amont, en raison d'une multitude d'embâcles de bois observés le long du chenal et du caractère torrentiel du cours d'eau. L'inventaire a permis de cibler quelques zones dont le cours d'eau était séparé, généralement près d'un embâcle. Cependant, ces avulsions sont survenues dans des zones boisées et les risques semblent moindres en aval.

5.3. Limite des analyses

Tout d'abord, l'inventaire terrain a seulement été effectué le long des principaux chenaux des bassins versants à l'étude. Un inventaire terrain pourrait être effectué pour l'ensemble des bassins versants et permettrait de s'assurer de cibler l'ensemble des sources importantes de sédiments et de bois morts. Aussi, particulièrement dans le cas du ruisseau Hall, un inventaire terrain en amont du pont croisant le ruisseau Hall sur le chemin Lessard pourrait être effectué. Les tributaires du cours d'eau pourraient aussi être étudiés afin d'inventorier l'ensemble des sources de sédiments disponibles. De plus, les graphiques de profils en long des cours d'eau ont permis de visualiser la hauteur des berges par rapport à leur cours d'eau respectif. Cependant, la méthodologie adoptée crée un certain niveau d'incertitude. En effet, les berges ont été placées manuellement à l'aide des photographies aériennes et du MNT ombré, mais parfois, ces deux données ne permettaient pas de localiser précisément la position de la berge causant une imprécision de quelques mètres à certains endroits.

Aussi, certaines limites sont associées aux photographies aériennes. En effet, pour Compton, les photos ont seulement été géoréférencées, et non orthorectifiées, en raison du rapport entre le temps de l'opération et la qualité des résultats. Cependant, notamment lors de l'identification des cours

d'eau, des petits décalages de quelques mètres peuvent avoir été créés entre les années en raison de la méthode employée. De plus, dans les deux cas, l'identification pouvait seulement être effectuée dans les régions dénudées de végétation. La qualité des photographies aériennes a aussi limité l'identification des cours d'eau et de l'occupation du sol, notamment pour 1945.

La précision du LiDAR de 2018 a aussi limité les analyses pouvant être effectuées dans le cadre du projet. En effet, le nombre de points par mètre carré est plus petit que celui de 2015. C'est pour cette raison que les analyses ont été faites avec le LiDAR acquis en 2015 pour le secteur de Compton. Des données plus précises pour 2018 auraient permis de comparer et d'observer l'évolution dans le temps des surfaces d'expansions, des corridors d'avulsion ainsi que de la connectivité sédimentaire. De plus, des analyses d'incision et d'aggradation auraient pu être effectuées avec deux jeux de données ayant la même précision. Une précision plus élevée permet notamment d'obtenir des résultats plus fidèles à la réalité et de mieux évaluer les risques associés aux cônes alluviaux de Compton. Notons que depuis les relevés LiDAR de 2015 et 2018, une digue a été construite modifiant donc significativement la dynamique des cours d'eau de Compton. Il est donc important de noter que les résultats obtenus ne correspondent pas nécessairement à l'état actuel des surfaces d'expansions et corridors d'avulsion actuelle des cônes alluviaux de Compton. Dans le cas de Dudswell, les résultats sont un peu moins précis que ceux de Compton en raison du nombre de points par mètre carré qui est plus faible.

La méthode EXZECO a aussi quelques limites. Bien que le MNT ait une résolution de 1 mètre, des irrégularités dans ces données pourraient affecter les résultats notamment lors de l'étape de remplissage des cuvettes. En effet, à la suite de ce prétraitement, des surfaces planes qui n'existent pas pourraient être créées et affecter la trajectoire de l'écoulement. Aussi, les variations topographiques sont générées aléatoirement ce qui crée un certain niveau d'incertitude. En effet, deux simulations avec le même nombre d'itérations n'auront pas le même résultat. Bien que les analyses EXZECO permettent d'obtenir les surfaces d'expansions des cônes, la méthode permet seulement de calculer la trajectoire d'écoulement de l'eau sans prendre en compte une multitude de facteurs. En effet, les débits et les volumes d'eau, entre autres, ne sont pas pris en compte lors des simulations d'écoulement (Pons et al., 2020). Finalement, une sélection de trois scénarios de variations topographiques a été effectuée pour les deux sites d'étude. Cependant, dans le cas des cours d'eau de Compton, les variations topographiques potentielles, c'est-à-dire l'aggradation et

les accumulations de bois potentiels, varient en fonction du cours d'eau. Donc, les variations imposées n'ont pas été ajustées pour chacun des cas spécifiques limitant alors l'interprétation des résultats et l'évaluation des risques propres à chacun des cônes alluviaux.

Dans le cadre des analyses de connectivité sédimentaire, seulement une analyse de base a été effectuée. Les sédiments des zones fortement connectées ne sont donc pas nécessairement susceptibles de se retrouver dans les cours d'eau. De plus, plusieurs éléments pouvant affecter la connectivité sédimentaire n'ont pas été pris en compte tel que l'occupation du sol.

Enfin, plusieurs analyses complémentaires devront être effectuées afin de bien caractériser les cônes alluviaux et leurs dynamiques. En effet, des modélisations hydrauliques et hydrologiques sont importantes afin de déterminer les charges sédimentaires transportées dans les cours d'eau. Les analyses et inventaires effectués dans le cadre du projet permettent l'identification des sources de sédiments sans les quantifier. De plus, les modélisations hydrologiques, telles que le modèle SWAT, permettent notamment d'évaluer les débits et l'impact de changement d'occupation sur les dynamiques des cours d'eau (Edivaldo Afonso de Oliveira et al., 2021).

5.4. Recommandations

5.4.1. Suites des analyses

À la suite des analyses, quelques recommandations peuvent être effectuées. En ce qui concerne la suite des analyses de surfaces d'expansions et de corridors d'avulsion potentiels, plusieurs analyses complémentaires pourraient être effectuées avec la méthode EXZECO. Tout d'abord, les analyses ont été effectuées avec des simulations de variations topographiques sur l'ensemble du MNT utilisé. Cependant, la chaîne d'opération de la méthode EXZECO a été modifiée légèrement par Pons et al. (2020) afin de mieux simuler les écoulements. Les auteurs ont ajouté une fonction permettant d'adapter la hauteur de la variation topographique en fonction de la surface drainée par chaque pixel. Cette méthode permet de simuler notamment des variations plus élevées lorsque la surface drainée du pixel est plus grande. En effet, ces variations de la méthode permettraient d'obtenir un aperçu plus représentatif de la réalité. La nature des cours d'eau à l'étude fait que ces derniers et les zones à proximité sont plus susceptibles de connaître une variation topographique significative qui va affecter la direction de l'écoulement des eaux que les zones plus éloignées. Dans le cadre du projet, les analyses des cinq cours d'eau ont été faites simultanément. La méthode employée rend difficile l'analyse de chacun des cônes séparément puisque plusieurs simulations

de l'écoulement se rejoignent en aval. Il est donc parfois difficile de bien identifier la surface d'expansion de chacun des cônes de Compton et de bien définir les risques de chacun des cours d'eau. Cependant, cette méthode permet d'observer relativement facilement les corridors d'avulsion potentiels pour l'ensemble de la zone d'étude. Finalement, les ponts et ponceaux ont été retirés des MNT en traçant approximativement l'emplacement et la largeur de ces derniers à l'aide des orthophotographies et des MNT pour les deux sites d'étude. Dans les deux cas, des mesures plus précises notamment au niveau de la largeur auraient légèrement impacté les analyses sans pour autant être problématiques et causé des erreurs en ce qui concerne les surfaces d'expansion des cônes alluviaux. Il est cependant important de noter cette incertitude au niveau des analyses.

Ensuite, des analyses de connectivité sédimentaire plus approfondies pourraient être effectuées. Des analyses évaluant la connectivité sédimentaire selon les différentes occupations du sol sont possibles dans SedInConnect. En effet, en modifiant certains paramètres dans l'application, il est possible d'obtenir ce genre d'information (Persichillo et al., 2018). Il serait aussi intéressant d'évaluer la connectivité sédimentaire en ajoutant comme cible les cours d'eau des zones d'étude afin d'avoir un meilleur aperçu des régions fortement connectées directement aux cours d'eau (Cavalli et al., 2013). Ces éléments permettraient notamment de mieux cibler les interventions et la surveillance des sources de sédiments pouvant avoir un impact sur la dynamique des cônes.

5.4.2. Mises à jour des données et suivi terrain

Des analyses effectuées avec des données LiDAR plus récentes permettraient de bonifier les résultats et d'avoir une meilleure idée de l'évolution des cônes durant les dernières années. D'ailleurs, des données LiDAR ont été acquises par drone en fin 2020 et en 2021 pour le site de Compton. Ces données pourraient être utilisées pour effectuer des analyses en date de 2021. De plus, idéalement les données auraient au moins 4 points par mètre carré afin de pouvoir faire des analyses comparatives. Il serait aussi intéressant d'effectuer la même opération avec des données du site de Dudswell. Depuis la couverture LiDAR de 2015 et 2018, une digue a notamment été construite à Compton. Cet aménagement pourrait potentiellement avoir un gros impact sur la dynamique et la propagation de l'eau dans cette zone. Cette dernière a notamment été construite afin de protéger certaines infrastructures en aval, notamment l'entreprise de cèdres. Aussi, il serait intéressant d'appliquer la méthode EXZECO à chacun des cinq cours d'eau de Compton de façon

distincte. Cela permettrait d'isoler la surface d'expansion de chacun des cônes et de mieux comprendre l'impact de chacun d'entre eux.

Faire un suivi de l'évolution et des événements pouvant affecter les cônes est aussi important afin de bien évaluer les risques à travers le temps. Pour l'ensemble des bassins versants, en se basant sur les analyses de surface d'expansion et de corridors d'avulsion, un suivi de l'aggradation et des accumulations de bois morts dans les cours d'eau semble particulièrement important. En effet, les analyses suggèrent qu'une accumulation de sédiments au fond de lit de seulement 50 cm et moins pourrait faire déborder la plupart des cours d'eau. Dans tous les cas, la surveillance de l'aggradation, des accumulations de bois morts et des zones de ravinement est primordiale pour les cours d'eau. En ayant une idée du rythme de l'aggradation, il est possible de mieux prédire le risque d'avulsion (de Haas et al., 2019). Pour le bassin versant 5, bien que le débordement en zone agricole ne créerait probablement pas un nouveau chenal permanent, un écoulement relativement intense pourrait causer des dommages notamment sur les maisons installées en aval. Il est donc particulièrement important de faire un suivi de l'état du cours d'eau dans la zone agricole pour ce dernier. Pour ce qui est du ruisseau Hall, un suivi de l'état du cours d'eau linéarisé dans la partie agricole serait aussi important. En effet, les cours d'eau linéarisés nécessitent un entretien constant afin de maintenir le cours d'eau dans un état stable et sécuritaire. Aussi, afin que le cours d'eau retrouve un état d'équilibre, un corridor de liberté pourrait aussi être laissé au cours d'eau (AGRCQ, 2017). Dans ce cas-ci, cela semble un élément important considérant que des signes d'avulsion ont été observés sur les photographies aériennes historiques. Une surveillance des zones de glissement de terrain sur les berges du ruisseau Hall sera aussi importante afin d'évaluer les risques de glissement et au besoin, de prendre des précautions appropriées afin de réduire l'impact d'un potentiel apport important en sédiments fins et grossiers vers l'aval.

5.4.3. Intégration des connaissances générées

Les données générées ont permis de mieux comprendre la dynamique des cours d'eau à l'étude. Une sensibilisation des citoyens touchés par la problématique pourrait être effectuée. Cette sensibilisation permettrait notamment de les informer sur les dynamiques des cônes alluviaux. Les surfaces d'expansions, les corridors d'avulsion ainsi que les sources de sédiments identifiés pourraient aussi servir afin de guider des stratégies d'aménagement dans les zones étudiées. Bien

que des analyses complémentaires seraient nécessaires, les données peuvent aider à la planification et à la prise de décision, notamment en ce qui concerne les mesures de gestion des risques.

6. Conclusion

En conclusion, l'objectif principal du projet était de caractériser la dynamique de cônes alluviaux situés à Compton et à Dudswell par l'approche hydrogéomorphologique. À l'aide d'inventaire terrain, d'analyse de surface d'expansion et de corridors d'avulsion ainsi que d'analyse de connectivité sédimentaire, la méthodologie utilisée a permis de caractériser les cônes alluviaux à l'étude. Pour les cônes de Compton, les sources principales de sédiments, autant fins que grossiers, proviennent des processus d'incision et de ravinement des cours d'eau. Les analyses de surfaces d'expansion ont permis de cibler des territoires à risques tels que le parc de maisons mobiles, quelques habitations et une entreprise de production de cèdre. À Dudswell, les analyses suggèrent que le cône était actif dans les années 1960 alors qu'aujourd'hui, il est inactif. Bien que des sources de sédiments sont présentes, le ruisseau Hall a peu de risque de subir une avulsion.

L'essai s'inscrit dans le cadre d'un projet de plus grande envergure. Le projet a permis de caractériser en partie la dynamique des cônes alluviaux notamment par la compréhension de la sensibilité morphodynamique et la récurrence des dynamiques. En revanche, plusieurs analyses complémentaires devront être effectuées afin de comprendre la dynamique sédimentaire, hydrologique et hydraulique. Des modélisations hydrologiques et hydrauliques seront effectuées afin de mieux comprendre la dynamique des cours d'eau étudiés. L'ensemble de ces éléments sera ensuite étudié afin d'évaluer des mesures de gestion ou d'atténuation des risques associés aux cônes alluviaux étudiés. Néanmoins, l'essai a permis de faire un portrait global des caractéristiques des cinq cônes de Compton et celui de Dudswell. Les surfaces d'expansion, les corridors d'avulsions potentiels, les sources de sédiments et de bois morts, ainsi que les ponts et ponceaux, ont été identifiés pour les deux sites d'étude et une interprétation a été effectuée en combinant les différentes informations récoltées.

Références

- AGRCQ (2017) Guide sur la gestion des cours d'eau au Québec, Granby, Québec, 386 p.
- Blair, T. C. et McPherson, J. G. (2009) *Geomorphology of Desert Environments*, Springer Netherlands, Dordrecht, Pays-Bas, p. 413-467
- Blanpied, J., Carozza, J.-M. et Antoine, J.-M. (2018) La connectivité sédimentaire dans la haute chaîne pyrénéenne par l'analyse de la crue de juin 2013 : le rôle des formations superficielles, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 24, n°4, p. 389-402.
- Borselli, L., Cassi, P. et Torri, D. (2008) Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment, *CATENA*, vol. 75, p. 268-277.
- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F. et Magner, J. A. (2012) *Hydrology and the management of watersheds*, Engineering professional collection (Fourth edition), Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, 545 p.
- Buffin-Bélanger, T. et Héту, B. (2008) Les Risques D'inondation sur les cônes alluviaux dans l'est du Québec, *Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion*, Presse de l'Université Laval, Québec, 8 p.
- Cammeraat, E. L. H. (2004) Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 104, n°2, p. 317-332.
- Cavalli, M. et Marchi, L. (2008) Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR, *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 8, n°2, p. 323-333.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F. et Marchi, L. (2013) Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, vol. 188, p. 31-41.

Cerema (2020) Modélisation du ruissellement sur les bassins versants : la méthode ExZEco du Cerema pour identifier les zones d'écoulement, [En ligne], <https://www.cerema.fr/fr/actualites/modelisation-du-ruissellement-bassins-versants-methode>, page consultée le 3 juillet 2021.

Chanson H. (2004) *Hydraulics of Open Channel Flow (Second Edition)*, Butterworth-Heinemann, Oxford, Royaume-Unis, 585 p.

Choné, G. (2021) Communication personnelle, Professionnel de recherche, Université Concordia, Montréal, Courriel.

Clarke, L. E. (2015) Experimental alluvial fans : Advances in understanding of fan dynamics and processes, *Geomorphology*, vol. 244, p. 135-145.

COGESAF (2020) *Projet d'actions dans les bassins versants des cônes alluviaux de Compton, phase I : Analyse de priorisation des cônes alluviaux*. Sherbrooke, Québec, 16 p.

Coon, W. F. (1998) Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks, *Water Supply Paper*, n°2441. U.S. Geological Survey, Denver, Colorado, États-Unis, 145 p.

Crema, S. et Cavalli, M. (2018) SedInConnect : a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity, *Computer and Geosciences*, 111, p. 39-45.

Croke, J., Mockler, S., Fogarty, P. et Takken, I. (2005) Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity, *Geomorphology*, vol. 68, n°3, p. 257-268.

Crosta, G. B. et Frattini, P. (2003) Controls on modern alluvial fan processes in the central Alps, northern Italy, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29, n°3, p. 267-293.

de Haas, T., Densmore, A. L., Hond, T. den et Cox, N. J. (2019) Fan-Surface Evidence for Debris-Flow Avulsion Controls and Probabilities, Saline Valley, California. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 124, n°5, p. 1118-1138.

de Haas, T., Ventra, D., Carbonneau, P. E. et Kleinhans, M. G. (2014) Debris-flow dominance of alluvial fans masked by runoff reworking and weathering. *Geomorphology*, vol. 217, p. 165-181.

Demers S., Massé S. et Buffin-Bélanger T. (2017) Cartographie des aléas fluviaux de la rivière Coaticook : diagnostic, méthodologie et recommandations, Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, Université du Québec à Rimouski, Remis à la MRC de Coaticook et au Ministère de la Sécurité publique du Québec, 45 p.

Deng, L. et Cai, C. S. (2010) Bridge Scour : Prediction, Modeling, Monitoring, and Countermeasures—Review. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 15, n°2, p. 125-134.

Edivaldo Afonso de Oliveira, S., Madson Tavares, S., Thomás Rocha, F., Lorena Conceição, P. de A., Cleber, A. dos S., Aline Maria, M. de L., Vicente, de P. R. da S., Francisco, de A. S. de S. et Dênis Jose, C. G. (2021) Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model, *International Journal of Sediment Research*, 16 p.

Fischenich, J.C. (2003) Effects of riprap on riverine and riparian ecosystems, ERDC/EL TR-03-4, Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi, États-Unis, 63 p.

Frankel, K. L. et Dolan, J. F. (2007) Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 112, n°F2, 14 p.

Fuller, J.E. (2012) Evaluation of Avulsion Potential on Active Alluvial Fans in Central and Western Arizona, Arizona Geological Survey, Contributed Report 12-D, 83 p.

GARMIN (2021) GPSMAP® 64s, Caractéristiques techniques, [En ligne], <https://buy.garmin.com/fr-CA/CA/p/140022#specs>, page consultée le 2 juin 2021.

Gouvernement du Canada (2016) Pollution de l'eau : érosion et sédimentation, [En ligne], <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/pollution-causes-effets/erosion-sédimentation.html#dragage>, page consultée le 12 août 2021.

Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador (2018) Guidelines for Applying to Alter a Body of Water, Water Resources Management Division Water Rights, Investigations, and Modelling Section, 164 p.

Haselberger, S., Dilly, L., Baartman, J. et Pöppel, R. (2018) Investigating soil erosion and hillslope-channel connectivity hotspots in a medium-sized agricultural catchment, Conference Abstracts, 20th EGU General Assembly, Vienne, Autriche, n° 10074.

Kain, C. L., Rigby, E. H. et Mazengarb, C. (2018) A combined morphometric, sedimentary, GIS and modelling analysis of flooding and debris flow hazard on a composite alluvial fan, Caveside, Tasmania. *Sedimentary Geology*, vol. 364, p. 286-301.

Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick (2012) Directives techniques de la modification des cours d'eau et des terres humides, Direction du développement durable, planification et évaluation des impacts, Version 4, 137 p.

Moody, J. A., Smith, J. D. et Ragan, B. W. (2005) Critical shear stress for erosion of cohesive soils subjected to temperatures typical of wildfires, *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, vol. 110, n°F1, 13 p.

National Research Council (1996) Alluvial Fan Flooding, Washington, DC: The National Academies Press, 182 p.

Notebaert, B., Verstraeten, G., Govers, G. et Poesen, J. (2008) Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 34, n°2, p. 217-231.

Ouranos (2015) Vers l'adaptation, Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec, Édition 2015, Montréal, Québec, 415 p.

Persichillo, M. G., Bordoni, M., Cavalli, M., Crema, S. et Meisina, C. (2018) The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides, *CATENA*, vol. 160, p. 261-274.

Pons, F., Bader, B., Moulin, C., Panafieu, B. et Verrhiest-Leblanc, G. (2020) Modélisation du ruissellement, application de la méthode Exzeco sur 8 départements de l'Arc méditerranéen, Colloque SHF, Lyon, France, 10 p.

Pons F., Delgado J-L., Guero P., Berthier E. (2010), Exzeco : a GIS and DEM based method for pre-determination of flood risk related to direct runoff and flash floods, 9th International Conference on Hydroinformatics HIC 2010, Tianjin, Chine, 9 p.

Reid, D. et Church, M. (2015) Geomorphic and Ecological Consequences of Riprap Placement in River Systems, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, vol. 51, 18 p.

Reitz, M. D. et Jerolmack, D. J. (2012) Experimental alluvial fan evolution: Channel dynamics, slope controls, and shoreline growth, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, vol. 117, n°F2, 19 p.

Reitz, M. D., Jerolmack, D. J. et Swenson, J. B. (2010) Flooding and flow path selection on alluvial fans and deltas, Geophysical Research Letters, vol. 37, n°6, 5 p.

Rivard, G. (2011) Guide de gestion des eaux pluviales, Ministère du Développement Durable Environnement et Lutte contre les Changements Climatiques du Québec, Québec, Canada, 386 p.

Scorpio, V., Santangelo, N. et Santo, A. (2016) Multiscale map analysis in alluvial fan flood-prone areas, Journal of Maps, vol. 12, n°2, p. 382-393.

Shi, B., Wang, Y. P., Yang, Y., Li, M., Li, P., Ni, W. et Gao, J. (2015) Determination of Critical Shear Stresses for Erosion and Deposition Based on In Situ Measurements of Currents and Waves over an Intertidal Mudflat, Journal of Coastal Research, vol. 31, p. 1344-1356.

Slingerland, R. et Smith, N. D. (2004) River Avulsions and Their Deposits, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, vol. 32, n°1, p. 257-285.

Stock, J. D., Schmidt, K. M. et Miller, D. M. (2008) Controls on alluvial fan long-profiles, GSA Bulletin, vol. 120, n°5-6, p. 619-640.

Su, Z., Xiong, D., Dong, Y., Li, J., Yang, D., Zhang, J. et He, G. (2014) Simulated headward erosion of bank gullies in the Dry-hot Valley Region of southwest China, Geomorphology, vol. 204, p. 532-541.

Tomczyk, A. M., Ewertowski, M. W., Stawska, M. et Rachlewicz, G. (2019) Detailed alluvial fan geomorphology in a high-arctic periglacial environment, Svalbard : application of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys, *Journal of Maps*, vol. 15, n°2, p. 460-473.

Van Rompaey, A. J. J. V., Verstraeten, G., Oost, K. V., Govers, G. et Poesen, J. (2001) Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 26, n°11, p. 1221-1236.

Ventra, D. et Clarke, L. E. (2018) Geology and geomorphology of alluvial and fluvial fans: current progress and research perspectives, Geological Society, London, Special Publications, vol. 440, n°1, p. 1-21.

Whitaker, A. C. et Potts, D. F. (2007) Analysis of flow competence in an alluvial gravel bed stream, Dupuyer Creek, Montana. *Water Resources Research*, vol. 43, n°7, 16 p.

Zhang, G., Liu, Y., Han, Y. et Zhang, X. C. (2009) Sediment Transport and Soil Detachment on Steep Slopes: I. Transport Capacity Estimation. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 73, n°4, p. 1291-1297.

Zingaro, M., Refice, A., Giachetta, E., D'Addabbo, A., Lovergine, F., De Pasquale, V., Pepe, G., Brandolini, P., Cevasco, A. et Capolongo, D. (2019) Sediment mobility and connectivity in a catchment: A new mapping approach. *Science of The Total Environment*, vol. 672, p. 763-775.

Annexe 1 – Contexte géologique de Compton

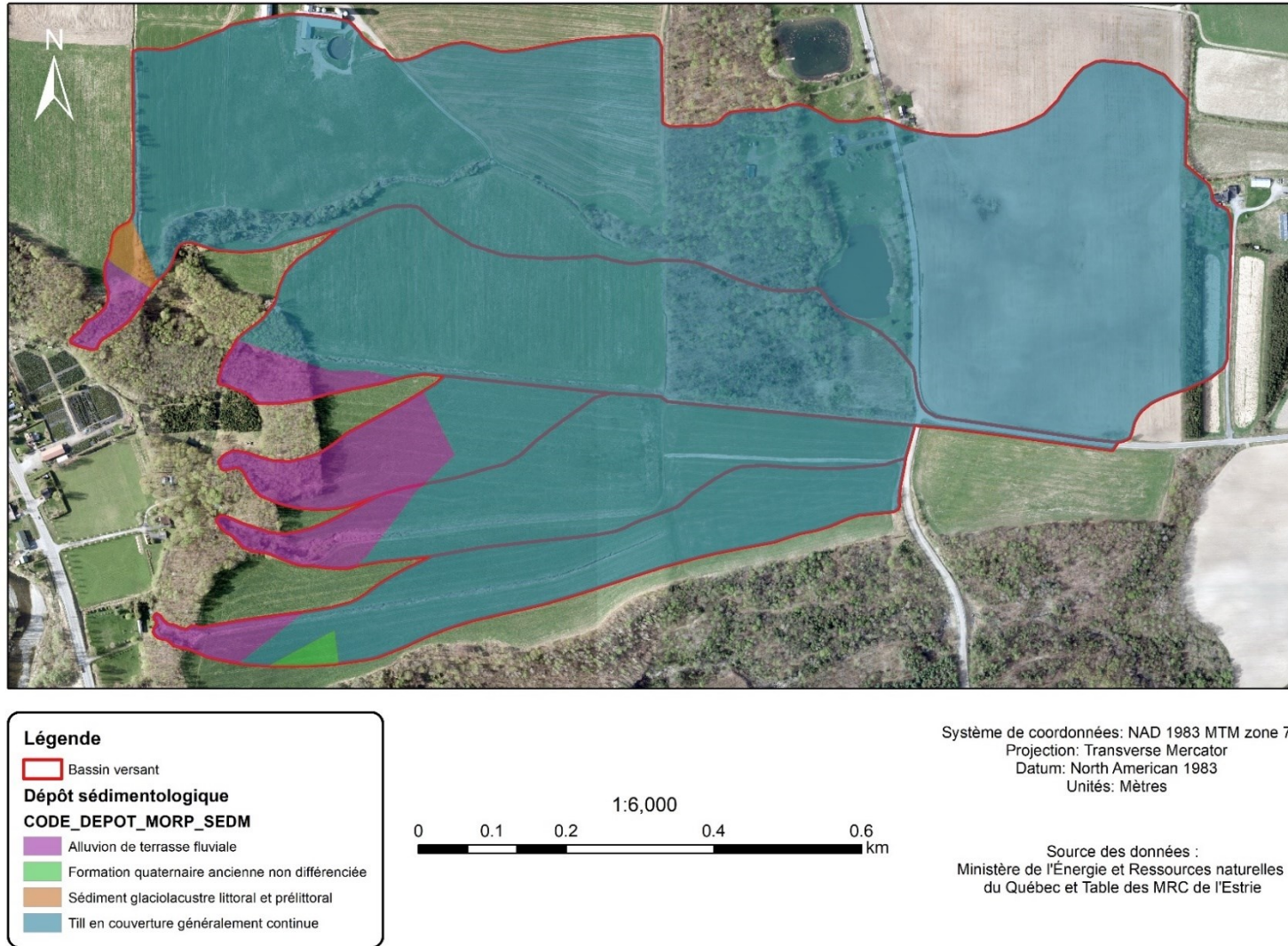


Figure 33 : Contexte géologique des bassins versants du site de Compton

Annexe 2 – Contexte géologique du ruisseau Hall

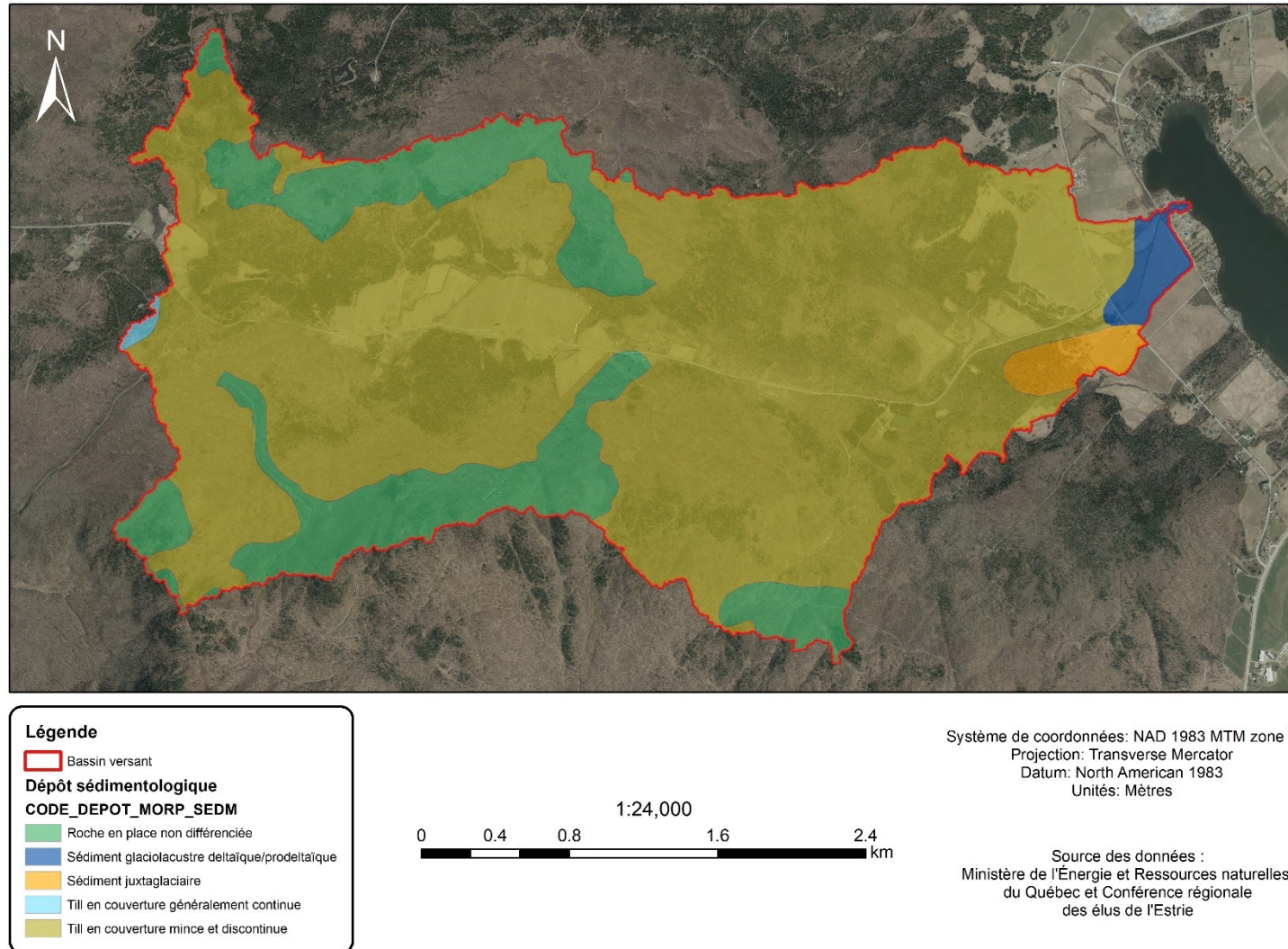


Figure 34 : Contexte géologique du bassin versant du ruisseau Hall à Dudswell

Annexe 3 – Fiche de caractérisation

Points GPS	Cône	Érosion	Incision	Aggradation	Source sédiments	Bois mort	Type végétation	Informations supplémentaires
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Figure 35 : Exemple de la fiche de caractérisation utilisée pour la campagne terrain