



Université du Québec
à Rimouski

Analyse de la connectivité sédimentaire dans deux petits cours d'eau montagnards gaspésiens

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **FÉLIX LACHAPELLE**

Juin 2025

Composition du jury :

Simon Bélanger, président du jury, Université du Québec à Rimouski

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

Francis Gauthier, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

**Guillaume Piton, examinateur externe, Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**

Dépôt initial le 7 avril 2025

Dépôt final le 18 juin 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

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

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier ma mère qui, bien qu'elle ne comprenne pas trop ce que je fais, est la personne qui a tout rendu possible. Tu dis souvent que tu as été « chanceuse » dans la vie, mais en réalité on est plusieurs à être chanceux de t'avoir. Je l'écris ici parce que une fois imprimé, ça va être plus difficile pour toi de le nier. Merci maman, pour tout.

Merci à mes directeurs de recherche, avec qui j'ai eu énormément de plaisir à travailler. D'abord Thomas, merci d'être un si bon mentor autant en termes de géomorphologie que d'œnologie. Tu m'as fait découvrir le monde des rivières et des Gamay, même si je suis encore un peu mêlé entre les régions du Beaujolais et que je comprends pas trop c'est quoi un vin qui « pinote », je vais au moins avoir appris à faire un Wolman et à identifier un niveau plein bord ! Merci pour ton écoute et ta compréhension, de m'avoir fait confiance et de m'avoir offert tout plein d'opportunités. Merci à Francis, tu fronçais parfois un peu des sourcils quand je parlais de connectivité, mais ton enthousiasme a toujours été au rendez-vous lors de nos rencontres. Tes idées ont vraiment porté le projet vers quelque chose d'intéressant. Merci pour la ride d'hélicoptère qui a certainement été un highlight de ces dernières années !

Merci à Guillaume Piton et Simon Bélanger qui ont fait partie du comité d'évaluation du mémoire et qui ont apporté des éclairages hyper pertinents en vue de la publication de l'article.

Merci aux collègues qui sont immanquablement devenues des ami·es. Autant en géo qu'au labo, votre nombre est trop grand et je suis terrifié à l'idée d'omettre un nom, alors je m'adresse à vous tous pour dire un énorme merci d'avoir rendu cette expérience assez plaisante pour me donner envie de continuer. Et vous savez que ce n'est pas peu dire !

Merci aux mousquetons, Julien, Simon et Karim d'être là, quelque part. On se voit des fois et on sait que peu importe la distance et le temps qui passe, ça va être correct. Mais on pourrait quand même s'appeler plus souvent !

Finalement, merci à Aly. Merci d'être là, de me comprendre plus que n'importe qui d'autre, de me ramener sur terre quand il le faut. Merci de me permettre de m'évader, de rêver et surtout de me rappeler que toute ça c'est rien qu'un jeu.

RÉSUMÉ

La connectivité est utilisée dans plusieurs domaines pour décrire le degré de liaison entre les parties d'un système. En géomorphologie, elle constitue la continuité entre des éléments discrets du paysage et s'avère cruciale pour décrire les flux au sein de ce dernier. En hydrogéomorphologie, l'intérêt récent pour la connectivité a donné naissance à un grand nombre de définitions, cadres conceptuels et outils d'analyse. Ce mémoire vise à explorer ces outils et à valoriser les connaissances existantes en proposant une analyse de la connectivité sédimentaire à visée pratique. L'approche méthodologique adoptée repose sur deux prémisses : d'une part les méthodes doivent être adaptées aux objectifs de l'étude, et d'autre part, les contrôles de la connectivité varient géographiquement. Ces idées ont guidé les choix méthodologiques et l'analyse subséquente. Deux petits cours d'eau montagnards, choisis pour leurs échelles et contextes différents, ont été étudiés non pas pour une comparaison directe, mais pour observer comment la connectivité varie d'un site à l'autre. Un indice de connectivité largement utilisé a été adapté pour tenir compte des sédiments grossiers à l'échelle du bassin-versant. Ensuite, une cartographie morphologique combinant données terrains et données en accès libres a permis d'identifier les contrôles de la connectivité dans le corridor fluvial. Les résultats soulignent que la configuration du paysage exerce un contrôle important sur la connectivité. Dans le plus petit bassin (7,7 km²), le fort confinement favorise la connectivité latérale et l'apport de sédiments des versant au corridor, cependant, la forte concentration de bois mort dans le chenal est un frein à la connectivité longitudinale. Dans le plus gros bassin-versant (18,8 km²), le confinement est plus variable et la connectivité est plus hétérogène d'un tronçon à l'autre. Les contrôles de la connectivité y sont plus localisés mais ont une signature plus forte sur la morphologie dans le corridor. Le mémoire illustre comment des outils existants peuvent se compléter pour identifier les contrôles de la connectivité qui offrant ainsi des pistes concrètes pour guider les interventions et l'aménagement des cours d'eau.

Mots clés : hydrogéomorphologie, connectivité, sédiments, indice de connectivité, glissements

ABSTRACT

Connectivity is used in many fields to describe the degree of linkage between parts of a system. In geomorphology, it constitutes the continuity between discrete elements of the landscape, and is crucial for describing the flows within. In hydrogeomorphology, recent interest in connectivity has given rise to a large number of definitions, conceptual frameworks and analysis tools. This thesis aims to explore these tools and build on existing knowledge by proposing a practical analysis of sediment connectivity. The methodological approach adopted is based on two premises: on the one hand, methods must be adapted to the objectives of the study, and on the other, connectivity controls vary geographically. These ideas guided the methodological choices and subsequent analysis. Two small mountain streams, chosen for their different scales and contexts, were studied not for direct comparison, but to observe how connectivity varies from site to site. A widely used connectivity index was adapted to account for coarse sediments at watershed scale. Next, morphological mapping combining field and open-access data was used to identify connectivity controls in the river corridor. The results highlight that configuration exerts a significant control on connectivity. In the smallest catchment, high confinement favors lateral connectivity and sediment supply from hillslopes to the stream, but the high concentration of instream wood in the channel hinders longitudinal connectivity. In the larger catchment, confinement is variable and connectivity is more heterogeneous from one reach to the next. Connectivity controls are more localized but have a stronger signature on morphology in the corridor. The thesis illustrates how existing tools can complement each other to identify connectivity controls, thus offering concrete insights to guide interventions and river management.

Keywords: hydrogeomorphology, connectivity, sediments, index of connectivity, landslides

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ	ix
ABSTRACT.....	xi
TABLE DES MATIÈRES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES FIGURES	xvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 Cadre Théorique.....	5
1.1 Qu'est-ce que la connectivité ?.....	5
1.2 Comment mesurer la connectivité ?	10
1.3 Problématique.....	16
1.4 Objectifs	17
1.5 Choix méthodologiques.....	18
CHAPITRE 2 AU-DELÀ DE L'INDEX : L'ANALYSE DE LA CONNECTIVITÉ SÉDIMENTAIRE GROSSIÈRE À L'AIDE D'UN ASSEMBLAGE DE MÉTHODES.....	21
Beyond the index: analyzing coarse sediment connectivity using a mixed methods approach.....	23
2.1 INTRODUCTION	23
2.2 STUDY SITES	26
2.3 METHODOLOGY	29
2.3.1 Index of sediment connectivity	29
2.3.2 Slope stability model	30
2.3.3 Assessment of sediment connectivity.....	33
2.4 RESULTS	34

2.4.1 Index of connectivity comparison.....	34
2.4.2 Connectivity in a 1 st order stream (Coulée à Layoute)	36
2.4.3 Connectivity in a 3 rd order stream (Portes de l’Enfer).....	40
2.5 DISCUSSION.....	45
2.5.1 Connectivity controlled by scale.....	45
2.5.2 Building on the index of connectivity.....	48
2.5.3 Informing decision using connectivity.....	51
2.6 CONCLUSION	52
CONCLUSION GÉNÉRALE	55
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	59
ANNEXES	75
ANNEXE I – SURFACE DEPOSIT MAPS FOR A) COULÉE À LAYOUTE AND B) PORTES DE L’ENFER	75
ANNEXE II – MAPPING OF IC VALUES IN PDE FOR THREE METHODS: A) IC _{RI} , B) IC _{FS} AND C) IC _{FS} [*] . EACH RASTER HAS ITS OWN COLOR SCALE ACCORDING TO JENKS NATURAL BREAKS	76
ANNEXE III – DISTRIBUTIONS OF VALUES FOR THREE METHODS OF IC COMPUTATION IN PDE WITH COLOR MAPPED ACCORDING TO JENKS NATURAL BREAKS CLASSIFICATION.	77
ANNEXE IV – COMPARISON OF IC _{FS} [*] FOR RESOLUTIONS OF 1, 3 AND 5M.....	78

LISTE DES TABLEAUX

Table 1. Calibrated values entered in the slope stability model.	32
Table 2. Factors controlling (dis)connectivity in studied catchments.	46

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Paysage alpin situé près de Bella Coola, Colombie-Britannique, Canada.	2
Figure 2. Exemples de formes exerçant un contrôle sur la connectivité. 1) Dépôt de débordement; 2) cône alluvial; 3) terrasses; 4) embâcle de bois; 5) bouchon sédimentaire; 6) plaine alluviale; 7) barrage; 8) digue.....	6
Figure 3. Scénarios potentiels à la suite d’une perturbation de la connectivité dans le système fluvial (Bracken et al., 2015).....	7
Figure 4. Interactions entre des événements de faible magnitude permettant l’accumulation de sédiments et des événements plus importants favorisant la connectivité. La connectivité est forte pendant l’événement (A) puisque la disponibilité est élevée alors que l’événement (B) peu de temps après n’est pas en mesure de connecter un grand volume de sédiments. Après une succession d’événements de faible magnitude, la connectivité en (C) est élevée, adapté de Bracken et al. (2015).....	8
Figure 5. Cadre conceptuel intégrant les composantes structurelles et fonctionnelles de la connectivité (adapté de Heckmann et al., 2018).....	9
Figure 6. Analyse morphologique de la connectivité (adapté de Hooke, 2003).....	11
Figure 7. a) fonctionnement de l'indice de connectivité (adapté de Borselli et al., 2008). D_{up} correspond à la composante amont et D_{dn} à la composante aval. b) Résultat de l'IC dans les bassins versants du Gadria et du Strimm, en Italie (adapté de Cavalli et al., 2013).	13
Figure 8. Érosion d'une berge et déplacement de blocs importants dans le ruisseau des Portes de l'Enfer.	19
Figure 9. Locations of the studied catchments in a) eastern Canada and more specifically in b) Gaspésie, Québec; c) the Coulee à Layoute; d) the Portes de l'Enfer; e) slopes in the Coulee à Layoute and f) slopes in Portes de l'Enfer.....	27
Figure 10. Mapping of IC values in LAY for three methods: a) ICRI, b) ICFS and c) IC^*_{FS} . Each raster has its own color scale according to Jenks natural breaks (see figure 11 for details on IC value distributions).....	35

Figure 11. Distributions of values for three methods of IC computation with color mapped according to Jenks natural breaks classification.....	36
Figure 12. Structural connectivity map for the LAY using IC_{FS}^* method of computation.	37
Figure 13. Photographs in LAY showing a) debris flows initiated by small failure upslope (courtesy of Yan Boulet), b) flood deposit on the forest floor, c) large wood jam blocking connectivity, d) logstep, e) vertical rock wall supplying sediment directly to the channel and f) eroded debris flow deposit (note person standing on top for scale).....	38
Figure 14. Mapping of the studied portion of LAY with a) near channel landforms and locations of figure 13 photographs, b) in-channel wood structures, c) functionally connected sediment supply, d) stream power, e) near channel IC_{FS}^* and f) ratio between valley floor IC_{FS}^* and hillslope IC_{FS}^*	39
Figure 15. Structural connectivity map for PDE using IC_{FS}^* method of computation.	41
Figure 16. Photographs in PDE showing a) landslide scars, b) ancient avulsion channel in the alluvial reach, c) step-pool morphology in a high energy, confined reach, d) rills on the surface of a landslide scar, e) bank erosion and f) hillslope deposit disconnected from the channel by vegetation.	42
Figure 17. Mapping of the studied portion of PDE with a) near channel landforms and locations of figure 16 photographs, b) sediment stores, c) functionally connected sediment supply, d) stream power, e) near channel IC_{FS}^* and f) ratio between valley floor IC_{FS}^* and hillslope IC_{FS}^*	43
Figure 18. Evolution of PDE seen through historical aerial photography, 1950 and 1963 show the stream prior to mining activities, 1975 was taken during the active mining years and 1992 is a decade after the mine closed.	47

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'évolution des paysages, thématique centrale à la géomorphologie, offre des questions de nature académique et pratiques. Notre compréhension du paysage a évolué depuis l'uniformitarisme de Hutton (1795) et de Lyell (1830-1833), de l'équilibre dynamique de Gilbert (1877) et des cycles d'érosion de Davis (1899). Le 20^e siècle a vu la géomorphologie se spécialiser en sous-disciplines, avec notamment les travaux de Horton, de Strahler et de Schumm en milieu fluvial qui se penchent sur l'organisation des réseaux de drainages et du système fluvial. Ces fondements ont évolué davantage jusqu'à aujourd'hui, de sorte que la discipline a atteint une maturité lui permettant d'informer des décisions en matière d'aménagement (Dubois et Provencher, 2010 ; Buffin-Bélanger et al., 2024). La cartographie hydrogéomorphologique (HGM), la restauration axée sur les processus et la considération de l'espace de mobilité dans la cartographie des aléas sont des exemples par lesquels les connaissances HGM ont percolé vers la gestion des cours d'eau. Cependant, l'incertitude associée à la complexité de l'évolution du paysage et la difficulté d'émettre des prédictions freinent l'utilisation des compétences des géomorphologues dans un cadre pratique (Fryirs, 2017). En effet, les sources de sédiments, les interactions formes-processus à plusieurs échelles spatiales et temporelles participent à la formation de paysages complexes (figure 1). La connectivité se place comme un cadre intéressant pour aborder la complexité des paysages.

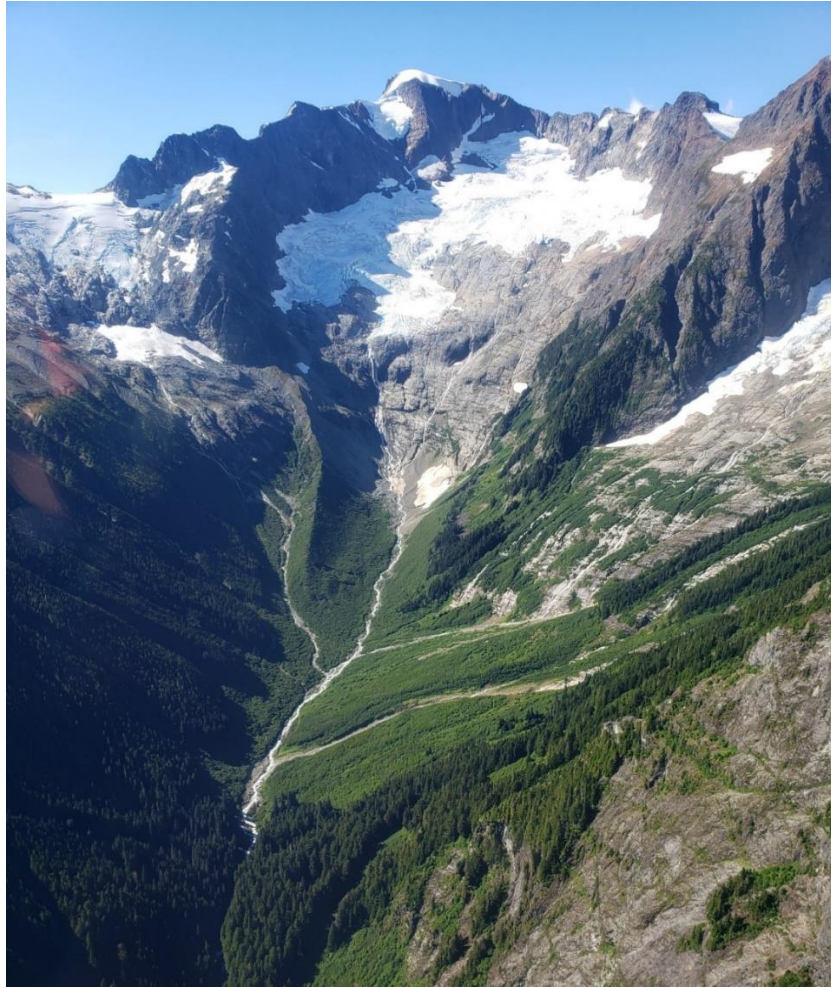


Figure 1. Paysage alpin situé près de Bella Coola, Colombie-Britannique, Canada.

De nombreuses définitions existent pour la connectivité, qui, au sens large, correspond au degré de liaison entre les composantes d'un système. Le concept est utilisé dans plusieurs domaines dont l'écologie, les neurosciences, la sociologie et les sciences de la Terre (Turnbull et al., 2018) et sert d'outil pour faire le pont entre disciplines (Tetzlaff et al., 2007; Werner et McNamara, 2007). En géomorphologie, Brunsden et Thornes (1979) ont fait une première mention de la connectivité pour tenter d'expliquer comment la liaison entre les composantes du paysage influence sa sensibilité. Harvey (1997, 2000, 2001, 2002) a ensuite établi les bases de la connectivité entre les versants et la rivière, concept qu'il nomme couplage mais qui renvoie à la même idée. On entend ici le degré par lequel la matière peut

se déplacer entre des composantes du paysage (Wohl, 2017), les composantes faisant références aux unités de paysage telles que les versants ou aux tronçons d'un cours d'eau par exemple. Par la suite paraissent un grand nombre de publications avec la rivière comme objet d'étude (voir Wohl, 2017 et Wohl et al., 2019). La connectivité est alors mobilisée dans une optique écologique (e.g. Ward et Stanford, 1995; Bennett, 2003), sociologique (e.g. Hillman et al., 2012; Kondolf et Pinto, 2017), de l'écoulement des eaux (e.g. Pringle, 2001; Bracken et Croke, 2007), de formation et évolution des paysages fluviaux (Baartman et al., 2013) puis pour décrire les mouvements de sédiments (e.g. Bracken et al., 2015; Najafi et al., 2021). La connectivité sédimentaire fait référence ici à l'efficacité du transit sédimentaire au sein du système fluvial et au transfert entre les parties d'un bassin-versant, telles que les versants et le corridor fluvial.

La connectivité sédimentaire permet d'améliorer notre compréhension du système fluvial pour des visées théoriques et appliquées. D'abord, elle expose les relations non-linéaires liées aux changements morphologiques d'un bassin-versant (Baartman et al., 2013). La connectivité apparaît donc comme une des pièces manquantes pour répondre à des questions surtout académiques comme celles du transport (Bagnold, 1966) et du flux sédimentaire (Walling, 1983). Ensuite, une considération pratique est liée à la transmission des perturbations vers l'aval dans un cours d'eau (Brierley et al., 2006). En effet, plus le système est connecté, plus les manifestations d'une perturbation seront perceptibles loin de la source. La rétention de matière est aussi liée au degré de connectivité et est cruciale au fonctionnement des rivières. La rétention de l'eau et des nutriments favorise la production primaire (Schiemer et al., 2001) et la séquestration du carbone (Bilby, 1981; Wohl et al., 2018) alors que la rétention naturelle de sédiments favorise un équilibre morphologique entre l'érosion et l'accumulation de sédiments (Lane, 1955). Une coupure artificielle de la connectivité comme un barrage hydroélectrique est cependant susceptible de déstabiliser les fonctions de la rivière par un surplus de rétention (Kondolf, 1997; Vörösmarty et al., 2003). La gestion des cours d'eau bénéficierait de cadres d'analyse basés sur la connectivité puisqu'elle facilite le choix de sites et oriente les décisions d'intervention (Kondolf et al., 2006; Jansson et al., 2007, Lisenby et al., 2020).

Ce mémoire explore les questions émanant de l'intérêt du concept de connectivité pour expliquer l'évolution des paysages fluviaux ainsi que les méthodes mises de l'avant pour le formaliser dans l'analyse de cette évolution. L'intérêt marqué de la communauté scientifique envers la connectivité a donné naissance à une gamme d'outils (p. ex. Borselli et al., 2008; Cavalli et al., 2013; Czuba et Foufoula-Georgiou, 2015) et de cadres conceptuels (p. ex. Hooke, 2003; Bracken et al., 2015; Heckmann et al., 2018). Le projet a donc été conçu en s'appuyant sur plusieurs outils dont l'effet combiné dépasse la simple addition de leurs contributions individuelles. Le premier chapitre du mémoire déploie le cadre théorique nécessaire pour bien saisir la portée du travail. La connectivité y sera définie dans le contexte de l'hydrogéomorphologie et plusieurs approches pour la mesurer seront présentées. Ce chapitre expose aussi la problématique et décrit les objectifs de l'étude. Le deuxième chapitre est un article présentant une modification d'un outil largement utilisé pour mesurer la connectivité à l'échelle du bassin-versant et l'intégration de cet outil dans un cadre méthodologique plus large. L'article offre une contribution académique sur les techniques de mesure de la connectivité, ainsi qu'un exemple opérationnel illustré par deux études de cas.

CHAPITRE 1

CADRE THEORIQUE

1.1 Qu'est-ce que la connectivité ?

Bien qu'une définition universelle de la connectivité ait été énoncée à l'introduction de ce mémoire, il importe d'apporter quelques précisions relatives à la discipline de l'hydrogéomorphologie. D'abord, deux grands angles apparaissent : les connectivités hydrologique et sédimentaire. Si les deux sont étroitement liés, la connectivité hydrologique s'intéresse spécifiquement au flux d'eau ou de matière mobilisée par l'eau. La connectivité sédimentaire est, sans surprise, axée sur l'efficacité du transit sédimentaire mais par des mécanismes variables (Bracken et al., 2015) comme les processus gravitaires et hydrogéologiques qui sont particulièrement importants dans le recrutement de sédiments sur les versants (Dunne, 1990). La connectivité n'étant elle-même ni bonne ni mauvaise, on voit apparaître le terme (dé)connectivité (Brierley et al., 2006) qui est plus neutre et fait référence à son caractère transitoire. En effet, l'efficacité des contrôles de la connectivité varie selon la fréquence et la magnitude des événements et ils sont comparables à des portes pouvant être ouvertes ou fermées (Fryirs et al., 2007).

Les contrôles de la connectivité varient spatialement (figure 2), notamment par la répartition de formes nommées *buffers*, *barriers* et *blankets* par Fryirs et al. (2007), traduits ici comme buffers, barrières et drapages. Les buffers agissent sur la connectivité latérale en freinant les échanges de sédiments entrant et sortant du corridor fluvial.. Ces formes comme les cônes alluviaux, les terrasses et les plaines alluviales perdurent longtemps avant d'être remaniées. Les barrières freinent le flux de sédiment longitudinalement dans le système pendant des

périodes variables. Le resserrement d'une vallée peut être pratiquement permanent alors qu'un barrage de castor est plus éphémère. Les drapages sont aussi plus temporaires, agissant sur la connectivité verticale. On peut penser ici à des dépôts de débordement ou au pavement du lit. Le remaniement d'une de ces formes peut modifier la connectivité du système de plusieurs façons (figure 3). La vidange d'un lac proglaciaire, par exemple, pourrait augmenter temporairement la connectivité par la puissance de la crue. En formant une avulsion ou en arrachant le couvert végétal de la plaine alluviale, le même événement pourrait mettre au jour une grande quantité de sédiment et ainsi augmenter la connectivité à long terme.

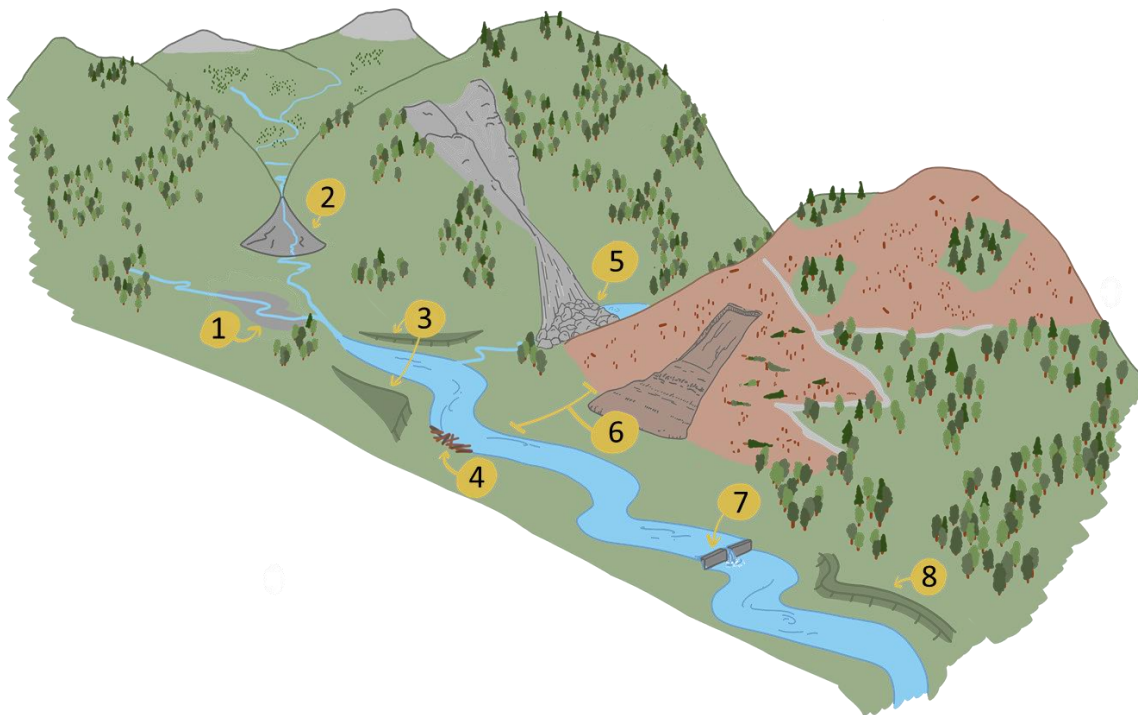


Figure 2. Exemples de formes exerçant un contrôle sur la connectivité. 1) Dépôt de débordement; 2) cône alluvial; 3) terrasses; 4) embâcle de bois; 5) bouchon sédimentaire; 6) plaine alluviale; 7) barrage; 8) digue.

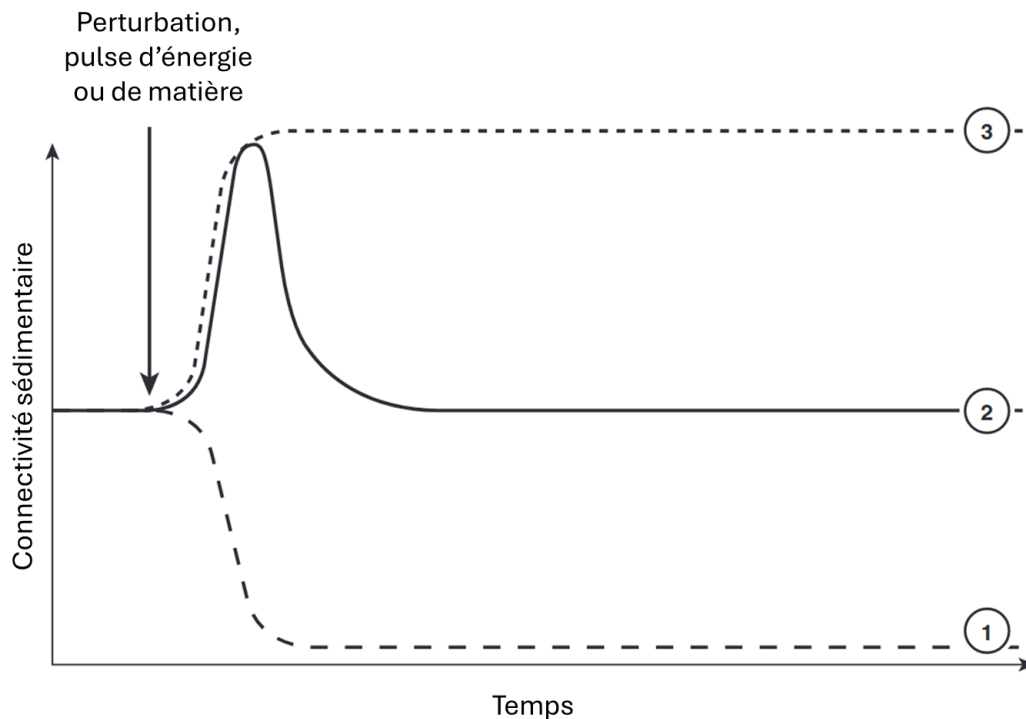


Figure 3. Scénarios potentiels à la suite d'une perturbation de la connectivité dans le système fluvial (traduit de Bracken et al., 2015). Le scénario 1) montre un événement qui augmente l'énergie nécessaire au transport de sédiments, réduisant ainsi la connectivité dans le système. Le scénario 2) forme un pulse qui augmente (ou réduit) momentanément la connectivité. Le scénario 3) est un changement qui perdure dans le système et qui augmente sa connectivité.

Si la fréquence et la magnitude des crues sont déterminantes dans la construction et la destruction de formes fluviales (Wolman et Miller, 1960), elles influencent aussi la variabilité temporelle de la connectivité sédimentaire. D'abord, la fréquence et la magnitude exercent un contrôle sur le régime sédimentaire en formant des pulses (figure 4). Les événements fréquents et de faible magnitude comme le ruissellement et le ravinement sur un versant mobilisent des sédiments sur une courte distance. Une accumulation de ces petits événements augmente la disponibilité en sédiments qui, lors d'événements de plus forte magnitude, seront connectés latéralement et/ou longitudinalement (Harvey, 2002; Bracken et al., 2015). Ensuite, bien que restreint par les conditions de bases (géologiques, tectoniques, niveau de base), le régime hydrologique et sédimentaire est sensible aux perturbations climatiques (Harvey, 2002). Le réchauffement global, les cycles climatiques décennaux (El Niño,

oscillation atlantique) et millénaires (glaciations et déglaciations), par exemple, exercent un contrôle sur la fréquence et la magnitude des crues et ainsi sur le transit sédimentaire (Olsen et al., 1999; Arnell et Gosling, 2013).

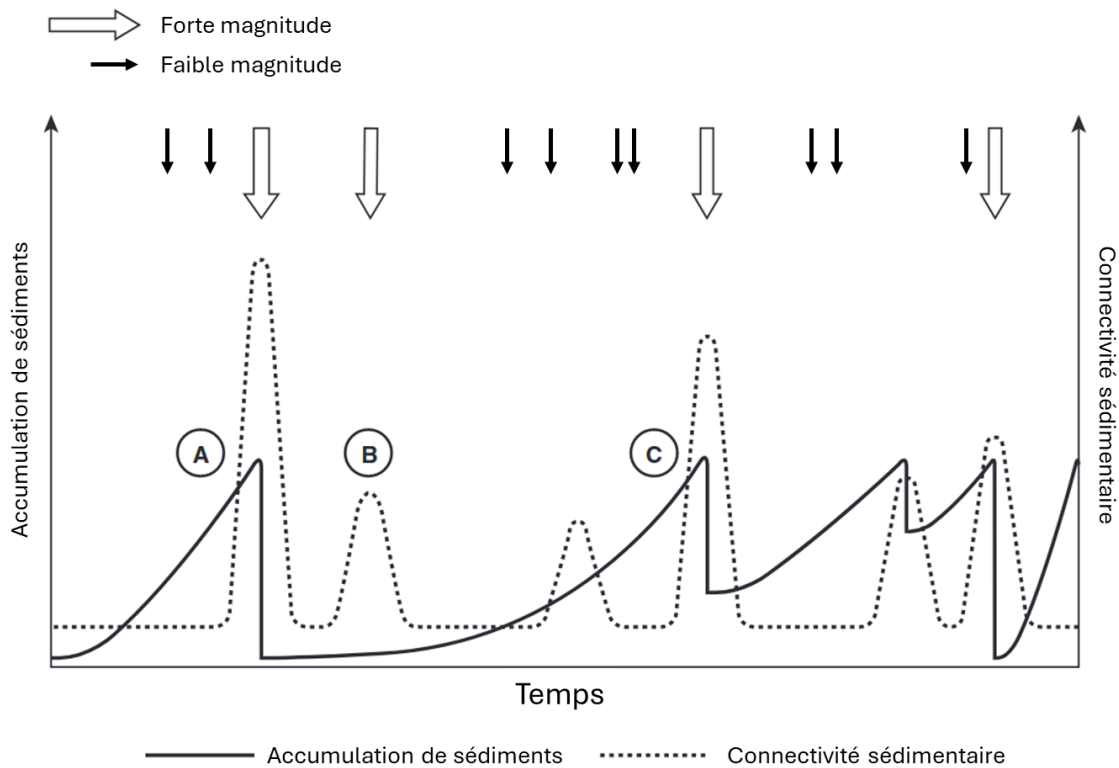


Figure 4. Interactions entre des événements de faible magnitude permettant l'accumulation de sédiments et des événements plus importants favorisant la connectivité. La connectivité est forte pendant l'événement (A) puisque la disponibilité est élevée alors que l'événement (B) peu de temps après n'est pas en mesure de connecter un grand volume de sédiments. Après une succession d'événements de faible magnitude, la connectivité en (C) est élevée, adapté de Bracken et al. (2015).

Une distinction peut être faite entre les connectivités structurelle et fonctionnelle (figure 5). La connectivité structurelle est liée à la configuration spatiale du bassin-versant et la distance entre la source de sédiments et la rivière (Wainwright et al., 2011; Czuba et Foufoula-Georgiou; Cossart et Fressard, 2017; Heckmann et al., 2018). Ainsi, les buffers, barrières et drapages définis sont des éléments structurants de la (dé)connectivité du système. L'inclinaison d'une pente, sa végétation ainsi que sa position par rapport au cours d'eau sont

aussi comprises dans la connectivité structurelle. Celle-ci a davantage été étudiée et est plus consensuellement définie dans la littérature que sa contrepartie fonctionnelle (Najafi et al., 2021). La connectivité fonctionnelle décrit davantage l'activité hydro-sédimentaire effective du système. Par exemple, on peut considérer que les caractéristiques des précipitations, les conditions antécédentes et les processus résultants (ruissellement, glissements, coulées de débris) définissent la connectivité fonctionnelle (Wainwright et al., 2011; Turnbull et Wainwright, 2019). Elle s'intéresse aussi aux sources fournissant activement des sédiments au cours d'eau (Messenzehl et al., 2014; Heckmann et al., 2018). Selon cette définition, une partie d'un versant abrupte pourrait être fonctionnellement connectée à la suite d'un glissement alors qu'une surface adjacente sur le même versant serait seulement structurellement connectée si elle ne fournit pas activement des sédiments au cours d'eau. La dimension temporelle est importante ici puisque la stabilisation par la végétation joue un rôle au niveau de la connectivité fonctionnelle. La connectivité structurelle est ainsi davantage un potentiel apport en sédiments, que Najafi et al. (2021) nomment *accessibles* alors que ceux qui sont fonctionnellement connectés sont *disponibles*.

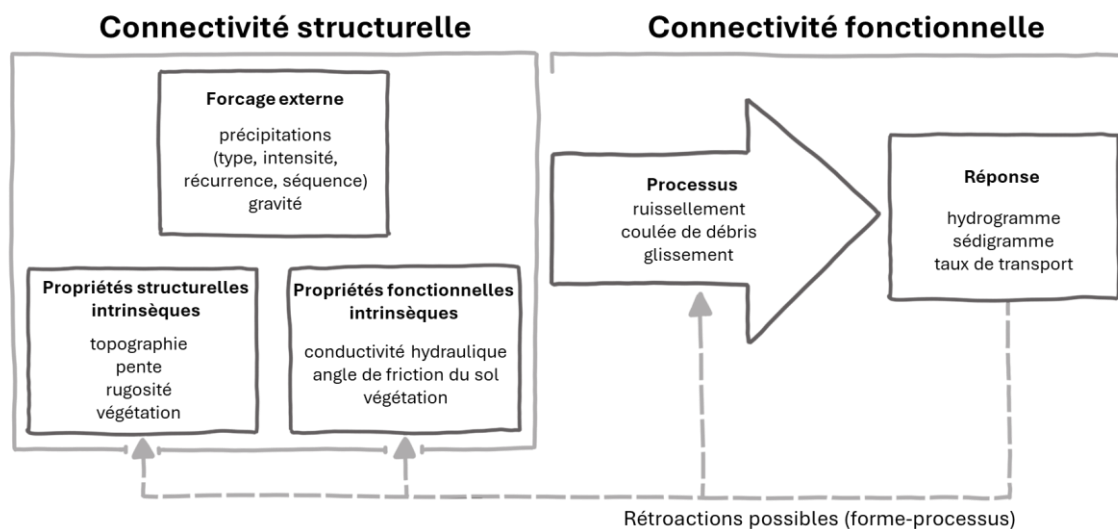


Figure 5. Cadre conceptuel intégrant les composantes structurelles et fonctionnelles de la connectivité (adapté de Heckmann et al., 2018).

1.2 Comment mesurer la connectivité ?

Les méthodes pour quantifier la connectivité ont fortement évoluées au cours des 30 dernières années. Un recensement complet de ces techniques n'est pas l'objectif ici et on peut plutôt se référer à Heckmann et al. (2018), Hooke et Souza (2021) ainsi qu'à Najafi et al. (2021). Il importe toutefois de détailler deux grands types d'approches pour mieux cadrer le mémoire dans le contexte scientifique actuel.

D'abord, les approches cartographiques et morphologiques proposent des analyses axées sur les formes créées par la (dé)connectivité et sur leurs effets sur celle-ci. Le cadre conceptuel proposé par Hooke (2003), par exemple, s'appuie sur l'idée que la morphologie et la sédimentologie sont indicateurs de la connectivité. En identifiant les sources, les stockages et les zones de transfert sédimentaire, on peut évaluer la fonction d'un tronçon par rapport aux autres et ainsi décrire la connectivité (figure 6). Le caractère qualitatif et l'effort d'échantillonnage nécessaire pour identifier l'ensemble des sources de sédiments rendent ce type de méthodes peu adaptées à des grandes aires d'étude (Najafi et al., 2021). Hardy et al. (2010) ont toutefois montré que les idées de Hooke (2003) peuvent être jumelées au traçage géochimique de sédiments. Leur méthode a permis d'identifier des zones d'accumulation et des sources de sédiments dans la rivière Romaine, dont le bassin-versant occupe 14 500 km² (Hardy et al., 2010). En établissant la présence de liens sédimentaires, il a été possible d'estimer la connectivité longitudinale et d'identifier des zones déconnectées. Dans le même ordre d'idées, Messenzehl et al. (2014) ont utilisé une approche morphologique basée sur des photographies aériennes et un modèle numérique d'élévation (MNE) issu d'un LiDAR pour identifier les contrôles morphologiques de la connectivité dans un bassin-versant dans les Alpes suisses. Leur méthode a permis d'identifier le rôle de l'héritage glaciaires sur la connectivité contemporaine. Messenzehl et al. (2014) ont aussi utilisé une méthode plus quantitative pour déterminer si la cartographie morphologique est toujours pertinente dans un contexte où les modèles et indices plus quantitatifs sont de plus en plus présents. Leurs conclusions indiquent que bien que la cartographie morphologique soit qualitative et

descriptive, elle apporte plus de subtilité qu'une approche quantitative morphométrique basée sur un indice de connectivité.

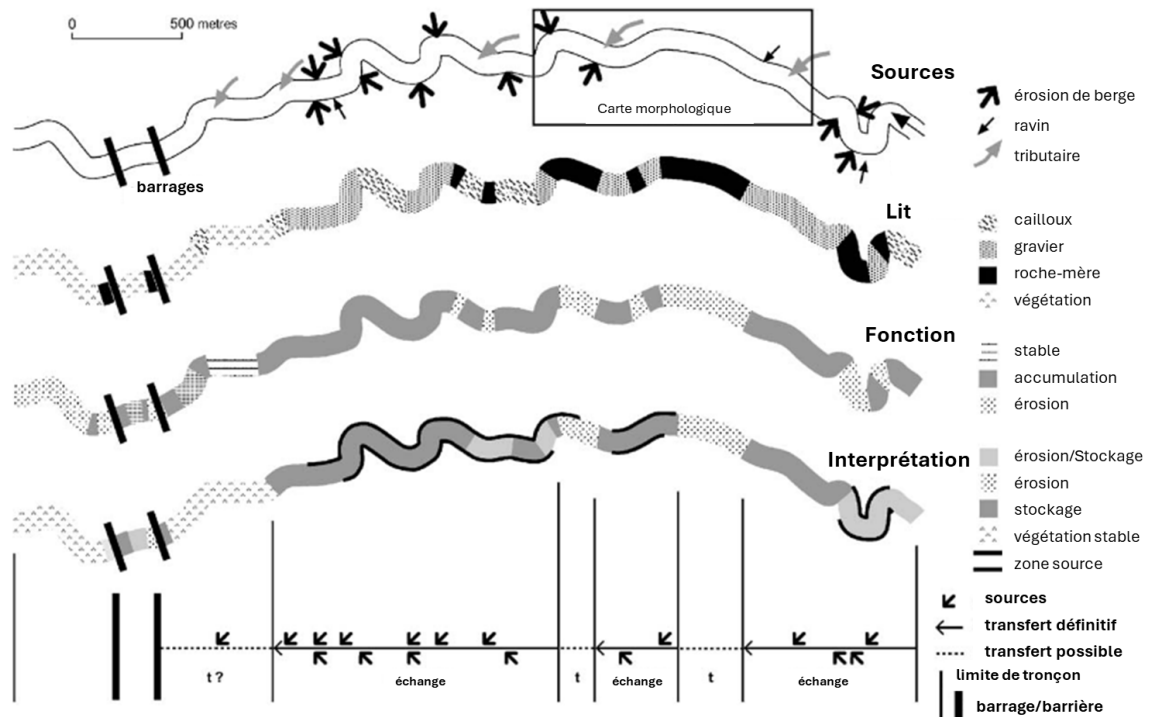


Figure 6. Analyse morphologique de la connectivité (traduit de Hooke, 2003).

Le deuxième grand type de méthodes pertinent ici concerne les indices de connectivité (IC). En théorie, ils consistent en une mesure composée de plusieurs variables connues pour leur influence sur la connectivité (Heckmann et al., 2018). Toutefois, la mesure de toutes ces variables est peu réalisable et des proxy sont utilisés pour représenter les processus étudiés. Ces proxy varient d'une étude à l'autre et un grand nombre d'indices a ainsi été formulé. Najafi et al. (2021) ont montré que 55% des études qui se sont penchées sur la connectivité ont utilisé des indices. Le *sediment delivery ratio* (SDR), par exemple, est une évaluation de la production sédimentaire d'un bassin-versant utilisée comme indicateur de la connectivité. Si la méthode est critiquée pour le peu d'informations offertes sur l'érosion, le transport ou l'accumulation (Hoffmann, 2015), l'idée du SDR a été mise à jour avec des méthodes plus

modernes, mettant à profit la disponibilité de données spatiales à haute résolution (Heckmann et Vericat, 2018).

La méthodologie proposée par Borselli et al. (2008) apparaît comme une contribution phare aux indices puisqu'elle segmente la connectivité en deux composantes : la contribution (énergie et matière) de l'amont, puis la distance entre une source de sédiments et le cours d'eau. Ainsi, l'indice peut être vu comme le ratio entre deux forces avec d'un côté le moteur du transit sédimentaire et de l'autre un frein à celui-ci. La figure 7a montre la structure générale de l'indice alors que la méthode pour le calculer est détaillée dans le prochain chapitre. La méthode utilise simplement un modèle numérique d'élévation (MNE) et des données tabulées sur l'érosivité du sol (USLE-RUSLE, Renard, 1997) et leur indice ($IC_{Borselli}$) permet ainsi de cartographier la connectivité potentielle sur l'ensemble du bassin-versant (Borselli et al., 2008). Plus spécifiquement, la connectivité est calculée en fonction des trajectoires d'écoulement issues du MNE et puis pondérée avec l'érosivité du sol. Le peu de données requises et la simplicité de la méthode l'ont rendue populaire (e.g. Sougnez et al., 2011; Hooke et Sandercock, 2012; Vigiak et al., 2012). Toutefois, Borselli et al. (2008) mentionnent que l'indice devrait être adapté à chaque étude : « elle [la pondération] doit être dérivée à partir des caractéristiques de surface qui influencent les processus d'écoulement et de flux sédimentaire dans un bassin-versant ou sur un versant ». Cette pondération, nommée impédance, permet donc d'ajuster l'indice lorsque les processus contrôlant la connectivité sont différents et a donné place à une gamme d'indices dérivés de l' $IC_{Borselli}$, un exemple notable étant celui proposé par Cavalli et al. (2013, figure 7b).

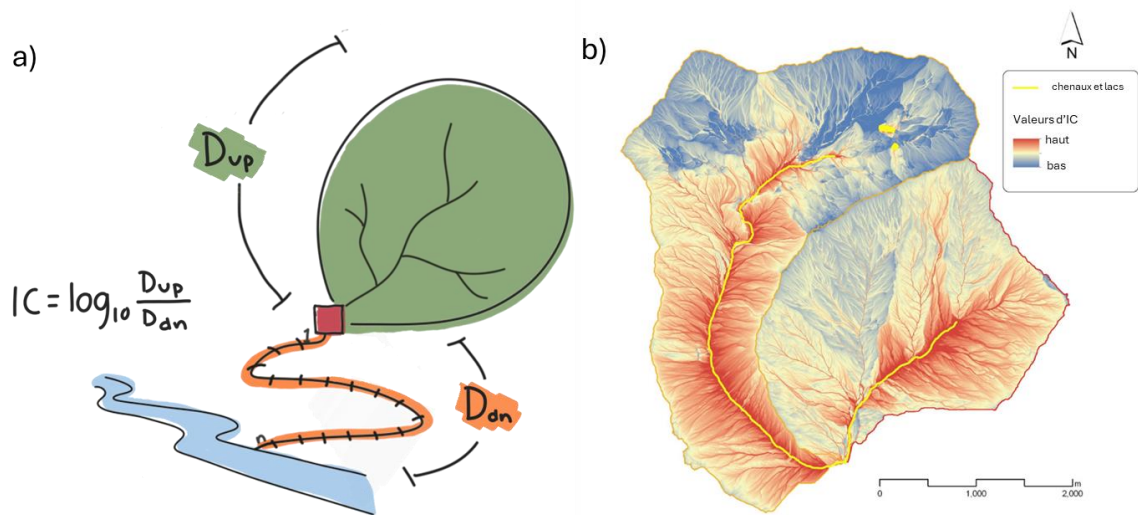


Figure 7. a) fonctionnement de l'indice de connectivité (adapté de Borselli et al., 2008). D_{up} correspond à la composante amont et D_{dn} à la composante aval. b) Résultat de l'IC dans les bassins versants du Gatria et du Strimm, en Italie (traduit de Cavalli et al., 2013).

Trois modifications importantes ont été apportées à l'IC_{Borselli} par Cavalli et al. (2013) pour l'adapter à un contexte alpin. D'abord, la modification de l'algorithme de direction des flux (*flow direction*) pour celui de Tarboton (1997) offre une représentation plus réaliste des chenaux d'écoulement, particulièrement en montagne (Willgoose, 2005; Tarolli et Dalla Fontana, 2009). Ensuite, l'ajout d'une valeur plafond à la pente dans le but de réduire la surestimation de la connectivité sur les escarpements. Finalement, une proposition de l'impédance basée sur la rugosité de surface. Cette rugosité est calculée à partir du MNE et réduit davantage les données nécessaires en intrant, contribuant à la popularité de l'IC_{Cavalli} (e.g. D'Haen et al., 2013; López-Vicente et al., 2015, 2017; Cantreul et al., 2018). Les options en libre accès pour le calcul de l'IC (Crema et Cavalli, 2018; Martini et al., 2022a) rendent l'outil accessible et permettent de personnaliser davantage l'indice.

Parmi les dérivés de l'IC on trouve la méthode de Gay et al. (2016) qui ajoute un paramètre permettant de tenir compte de l'assise géologique. Leur IC révisé permet ainsi de mieux représenter la connectivité sur les sols agricoles aux pentes faibles, où la mobilisation de

sédiment est davantage liée à la saturation en eau du sol. Dans le même ordre d'idées, Kalantari et al. (2017) ont utilisé un IC pondéré par l'écoulement de surface calculé avec des données de précipitations, ajoutant une dimension de la connectivité fonctionnelle à leur méthode. L'application de leur indice en Suède a permis d'identifier des routes à risque d'érosion et, en utilisant des données hydrologiques projetées, confère une fonction de prédiction à l'IC. Au Brésil, Zanandrea et al. (2020) ont montré que l'impédance peut être représentée par le coefficient de Manning. Leur coefficient permet d'utiliser l'IC dans des régions où l'absence de MNE à haute résolution limite le calcul de la rugosité de surface. Jautzy et al. (2021) ont proposé qu'en Gaspésie (est du Canada), la connectivité hydrosédimentaire est mieux représentée par la végétation que par la rugosité de surface. Ils ont ainsi pu montrer l'évolution de l'IC sur 50 ans en utilisant une base de données sur des perturbations forestières historiques comme valeur d'impédance. Les IC basés sur ceux de Borselli (2008) et Cavalli (2013), bien qu'ils soient populaires, ont d'importantes limites. Tel que le mentionnent Messenzehl et al. (2014), l'IC ne tient pas compte de la fréquence et de la magnitude des événements connectant le système, et à une plus fine échelle, l'IC manque de subtilité. Les sources de sédiments ne sont pas considérées non plus, mais une carte de celles-ci peut être superposée à l'IC pour une meilleure représentation de la connectivité (Cavalli et al., 2013). Une telle carte est aussi pertinente lorsqu'on s'intéresse à une taille granulométrique particulière. Par exemple, des objectifs de recherche orientés vers la qualité de l'eau pourraient davantage observer la connectivité de sédiments fins, alors que les sources de sédiments grossiers sont plus morphogènes et pertinentes à l'étude de la mobilité d'un cours d'eau.

Bien que les IC mentionnés ici adressent différents éléments de la connectivité, ils ne considèrent que la connectivité structurelle et donnent donc un portrait partiel de la dynamique (Wohl et al., 2019). La connectivité fonctionnelle est parfois quantifiée en mesurant directement le transport sédimentaire et les changements morphologiques (e.g. Poepl et al., 2012; Heckmann et Vericat, 2018; Calle et al., 2020; Blåfield et al., 2024). Ces analyses ont une définition de la connectivité fonctionnelle axée sur l'échange effectif de sédiments entre une source et la rivière. L'estimation de la composante fonctionnelle est aussi

faite grâce à des modèles mathématiques ou empiriques (e.g. Cossart et al., 2018; Poepl et al., 2019; Baartman et al., 2020). Ici, la définition repose davantage sur les processus qui donne lieu à la connectivité. L'avantage des modèles est qu'il est possible d'évaluer la connectivité selon plusieurs scénarios. En introduisant les résultats d'un modèle au sein d'un indice de connectivité, il est possible de préserver les avantages de celui-ci et d'en augmenter le pouvoir prédictif (Heckmann et al., 2018).

La combinaison du modèle de stabilité de pente SHALSTAB (Dietrich et Montgomery, 1998) à l'IC a permis à Lucia et al. (2015) d'évaluer les zones préférentielles de recrutement de bois dans un cours d'eau. Le modèle est basé sur la théorie de la pente infinie dont la prémisse est qu'un glissement translationnel agit comme une feuille qui se déplace sur un plan de glissement (Skempton et DeLory, 1957). Cette approche ancrée dans la mécanique des sols permet de simplifier l'analyse des glissements superficiels en assumant une homogénéité dans les propriétés du sol et en observant l'effet de l'angle de pente sur la stabilité. Plusieurs modèles prédictifs ont tiré avantage de l'approche et permettent de calculer un facteur de stabilité (FS) des pentes basé sur la topographie et sur l'hydrologie (Montgomery et Dietrich, 1994; Pack et al., 1998; Rosso et al., 2006; Medina et al., 2021). Certains de ces modèles sont peu demandant en termes de calcul et il devient possible d'intégrer une composante stochastique aux paramètres plus influents comme la cohésion et l'angle de friction du sol (Medina et al., 2021). En utilisant une distribution statistique pour les paramètres du sol on réduit davantage le nombre de données nécessaires, ce qui permet au modèle d'être en phase avec l'idéologie *low-cost* de l'indice de connectivité. Si Lucia et al. (2015) ont fait une analyse davantage structurelle de la connectivité avec un IC appuyé sur le modèle SHALSTAB, leur méthode ouvre la porte à des considérations plus fonctionnelles. En effet, elle permet d'un côté d'analyser des processus différents en fonction du modèle, et d'un autre côté d'en modifier les intrants pour simuler une gamme d'événements hydrologiques. Une considération pour des processus et des événements plus compétents permettraient d'adapter l'analyse de la connectivité à des sédiments de taille plus grossière.

1.3 Problématique

La gestion des cours d'eau fait face à un défi croissant : concilier les connaissances théoriques sur la connectivité fluviale avec les besoins opérationnels des gestionnaires (Rogers, 2006; Smetanová et al., 2018). Les outils disponibles, tels que les indices de connectivité et les approches morphologiques, offrent une gamme de solutions prometteuses et évoluent pour mieux répondre aux demandes des acteurs concernés. Cependant les connaissances sur la connectivité restent largement théoriques et percolent peu vers les acteurs concernés. C'est du moins ce qu'ont montré Smetanová et al. (2018) en interrogeant des parties prenantes dans la gestion des cours en Europe. Celles-ci mentionnent un intérêt d'intégrer la connectivité dans leur pratique, mais que plusieurs défis persistent, notamment au niveau du pouvoir prédictif des outils de leur intégration avec des méthodes déjà appliquées ainsi que de la communication entre scientifiques et gestionnaires.

Plus près d'ici, un survol des colloques de l'association des gestionnaires régionaux des cours d'eau au Québec (AGRCQ) montre une hausse de la participation du nombre de chercheurs et chercheuses, notamment en sciences naturelles (Maltais et al., 2024). On peut interpréter ceci comme une amélioration du transfert de connaissances de la théorie à la pratique. D'ailleurs, l'édition 2024 de ce colloque annuel portait sur le thème de la connectivité aquatique (AGRCQ, 2024). Les projecteurs ont surtout été rivés sur la connectivité écologique avec des visées de conservation alors qu'une présentation portait sur la restauration de la connectivité hydraulique sur un cône alluvial. Bien que ce colloque constitue une preuve du progrès de la connectivité dans les pratiques de gestion, on note l'absence de considérations pour les sédiments. Pourtant, les sédiments sont importants pour la qualité de l'eau et les habitats (Wood et Armitage, 1997; Owens et al., 2005) ainsi que pour la gestion des risques fluviaux (Lane et al., 2007; Nones, 2019), qui eux sont au cœur des préoccupations.

L'intégration de la connectivité sédimentaire dans des méthodes déjà opérationnelles, comme l'approche hydrogéomorphologique (HGM) pourrait combler cette lacune. L'alliance d'une

telle méthode basée sur des observations géomorphologiques qualitatives et d'un indice de connectivité plus quantitatif est prometteuse. Cette approche plus holistique est aussi en mesure d'orienter l'analyse vers des sédiments fins ou grossiers, une précision importante puisque leur rôle diffère. En effet, un gestionnaire intéressé par les frayères à saumons est davantage préoccupé par les sédiments fins qu'une ingénieure chargée de concevoir un pont dans une rivière graveleuse. Finalement, cet agencement de méthodes permettrait d'adresser les écueils liés aux résultats de l'IC mentionnés plus tôt en offrant une interprétation ancrée dans la configuration du site d'étude (Brierley et al., 2006).

1.4 Objectifs

Ce mémoire vise donc à valoriser des outils existants permettant de mesurer la connectivité, particulièrement pour les sédiments grossiers. Ceux-ci sont omniprésents en milieu montagnard, mais peu d'études s'intéressent explicitement à cette classe de taille. L'objectif principal est donc d'intégrer des outils de modélisation et de cartographie morphologique existants pour évaluer la connectivité à l'échelle du bassin-versant et du corridor fluvial. Celui-ci peut être vu comme un *collage* (voir Freeman, 2020) dans lequel les éléments méthodologiques apportent des éclairages différents sur la connectivité. L'approche du collage met aussi de l'avant la spontanéité, de sorte que les méthodes utilisées évoluent et ne sont pas complètement fixées en amont du projet.

Cette approche est doublement appropriée ici. D'abord, la nature exploratoire du projet de maîtrise implique que les méthodes sont portées à changer au fil du projet. Ensuite, la complexité et la variabilité intersites de la connectivité nécessite d'adapter la méthode utilisée. Parmi ces méthodes, l'IC est retenu pour sa simplicité et pour son potentiel à être ajusté à différents contextes. Malgré sa popularité dans la littérature scientifique, peu d'applications pratiques en sont faites, ce qui peut être attribué à un manque de méthodes standardisées pour analyser l'indice. L'IC offre d'ailleurs une vue incomplète de la

connectivité et il est pertinent de l'utiliser en parallèle à d'autres méthodes pour nuancer les résultats. Dans cet ordre d'idées, trois objectifs spécifiques seront abordés :

1. Adapter l'IC pour tenir compte des sources de sédiments grossiers;
2. Explorer de nouvelles applications de l'IC au-delà de l'interprétation visuelle;
3. Proposer une méthode de caractérisation de la connectivité.

Les résultats contribueront aux connaissances théoriques en lien à la connectivité sédimentaire. Additionnellement, le mémoire offrira une contribution au niveau de l'utilisation de la connectivité en mettant de l'avant des outils dont la mise en place est réaliste et nécessite relativement peu de ressources.

1.5 Choix méthodologiques

Les méthodes sélectionnées dans le projet ont évolué et se sont dessinées au rythme du projet lui-même. Si les sédiments sont rapidement apparus comme un intérêt et un objet d'étude, la connectivité est arrivée plus tard. La caractérisation hydrogéomorphologique s'est rapidement manifestée comme une méthode permettant une flexibilité au niveau de la collecte de données et de l'analyse. Une fiche de caractérisation a été assemblée pour noter des observations sur le terrain, mais a rapidement été laissée de côté au profit d'observations spontanées en marchant les cours d'eau sur plusieurs kilomètres. C'est d'ailleurs dans cet ordre d'idée que l'indice de connectivité a été sélectionné comme outil. L'objectif étant d'étendre l'identification de sources sédimentaires non seulement au niveau du chenal parcouru, mais sur l'ensemble du bassin-versant.

Deux autres avenues ont été explorées et dont les résultats ne sont pas présentés dans ce mémoire. D'abord, des traceurs sédimentaires (180 Pit-Tags) ont été installés et des relevés photogrammétriques ont été effectués durant l'été 2023 dans le but d'en faire le suivi. Une collecte de données l'été suivant a montré un déplacement d'un grand nombre d'individus,

dont des blocs d'environ 40 cm (figure 8). Bien que ces résultats préliminaires soient prometteurs, l'analyse de ces données n'a pas été complétée. Bien que l'ajout de ces données aurait bonifié l'analyse de la connectivité, les résultats déjà produits étaient suffisant pour atteindre les objectifs de la maîtrise. Ensuite, des analyses statistiques de l'indice de connectivité ont été explorées dans le but de trouver une relation entre les valeurs de l'IC et la morphologie du cours d'eau. Des corrélations-croisées ont donc été faites pour voir le lien entre l'indice et des variables comme la puissance spécifique, la présence de bois mort, de sources de sédiments, le confinement et la géométrie du chenal. Bien que l'approche fût intéressante, les résultats se sont avérés peu concluants.



Figure 8. Érosion d'une berge et déplacement de blocs dans le ruisseau des Portes de l'Enfer.

CHAPITRE 2

AU-DELÀ DE L'INDEX : L'ANALYSE DE LA CONNECTIVITÉ SÉDIMENTAIRE GROSSIÈRE À L'AIDE D'UN ASSEMBLAGE DE MÉTHODES

L'étude de l'évolution des paysages est une tâche complexe. Pour cette raison, la connectivité gagne en popularité chez les hydrogéomorphologues, aux dépens des équations plus classiques de prédiction de taux de transport sédimentaire. La connectivité étant maintenant reconnue comme un cadre d'analyse prometteur à l'étude des paysages, on observe un nombre croissant de méthodes pour la décrire. Ainsi, l'indice de connectivité d'abord proposé par Borselli et al. (2008) a été repris et adapté dans un grand nombre d'études. Les indices qui en découlent continuent de gagner en popularité, donnant l'impression que les résultats de l'indice sont une finalité en soi. Cette vision peut s'avérer problématique, car l'indice, centré sur la connectivité structurelle, offre un portrait partiel du phénomène. Dans cet article, nous proposons de combiner une variation de l'indice de connectivité à une approche de cartographie morphologique pour produire une analyse plus complète de la connectivité. L'approche est illustrée dans deux petits bassins-versants montagnards sélectionnés pour leurs configurations et tailles différentes. L'indice de connectivité modifié présente des valeurs et une répartition spatiale différente par rapport à l'indice plus communément utilisé et peut être utilisé dans le but d'identifier de potentiels corridors de glissements connectés. Aussi, l'étude illustre l'importance de la configuration dans l'analyse de la connectivité et montre comment une gamme d'outils peuvent offrir des pistes concrètes pour la gestion des cours d'eau. L'identification des formes agissant sur la connectivité, notamment, permet de cibler des contrôles du transit sédimentaire et d'attribuer des fonctions de transport, de source et d'accumulation temporaire des sédiments.

L'article a été réfléchi et rédigé par Félix Lachapelle. Les professeurs Thomas Buffin-Bélanger et Francis Gauthier, en tant que co-auteurs ont contribué aux réflexions et aux différentes étapes de révision de l'article. Les résultats préliminaires ont été présentés au colloque du CEN en février 2024 et au Congrès de l'ACFAS en mai 2024 alors que l'article sera soumis à la revue *Earth Surfaces, Processes and Landforms* à l'automne 2025. Bien que le comité d'évaluation du mémoire ait conclu qu'il convenait aux exigences du programme de maîtrise, plusieurs commentaires ont été apportés qui pourraient grandement bonifier la qualité de l'article. Certains commentaires ont été directement intégrés au mémoire, mais la version publiée de l'article tiendra compte de l'ensemble des commentaires.

BEYOND THE INDEX: ANALYZING COARSE SEDIMENT CONNECTIVITY USING A MIXED METHODS APPROACH

2.1 INTRODUCTION

Sediment connectivity has gained significant attention in the last two decades (Najafi et al., 2021) and is now recognized as a fundamental component of geomorphic systems (e.g. Brierley et al., 2006; Bracken et al., 2015; Wohl, 2017). For instance, it has been used to approach questions regarding landscape evolution and catchment-scale sediment fluxes (Baartman et al., 2013; Fryirs, 2013; Coulthard & Van de Wiel, 2017). A variety of tools and methods have also been developed to move beyond a theoretical assessment and to integrate connectivity into practical applications (Hooke & Souza, 2021). Despite significant progress in this area, further efforts are needed to integrate connectivity into stakeholder management practices. Specifically, improvements are required in predicting the impacts of new projects and advancing risk assessment maps with visualization of sediment transport pathways (Smetanová et al., 2018).

A wide variety of quantitative tools based on networks (Heckmann & Schwanghart, 2013; Czuba & Fofoula-Georgiou, 2015; Schmitt et al., 2016; Cossart & Fressard, 2017; Tangi et al., 2019) and indices (Walling & Zhang, 2004; Marchi & Dalla Fontana, 2005; Borselli et al., 2008; Cavalli et al., 2013) are available, allowing researchers to select an approach according to specific research objectives (Turley et al., 2021). For example, Cossart & Fressard (2017) proposed the Network Structural Connectivity Index (NSC) as quantitative tool oriented to studying the sediment cascade as a whole. By comparison, Czuba & Fofoula-Georgiou (2015) developed the Cluster Persistence Index (CPI) in order to identify hotspots of geomorphic change. The predictive capabilities of these modeling tools make them valuable in managing risks related to sediment, floods and water quality. They are also advantageous for the scale and resolution at which they can be applied.

The index of sediment connectivity (IC) introduced by Borselli et al. (2008) can operate at catchment scale and target every pixel, providing a spatially continuous insight on connectivity. One key component of IC is the impedance parameter (W) acting as a weighing factor. The definition of W is central and can vary depending on the context and objectives of a specific research (e.g. Kalantari et al., 2017; Ortiz-Rodrigues et al., 2017; Zanandrea et al., 2020; Jautzy et al., 2021;). Cavalli et al. (2013) calculated W from surface roughness derived from a high-resolution DEM (1m). This definition of impedance places friction at the center of the equation and allows for the association of runoff processes with the IC. This index provides more information on the connectivity of fine sediments, as larger particles would be less easily mobilized by surface runoff. Here, we suggest a definition of W associated with more competent hillslope processes, enabling IC to provide information on coarse sediments connectivity. Although while the simplicity of IC makes it stand out for its ease of implementation, it also implies omitting important controls of connectivity. Indeed, a recurrent limitation of modeling tools is the level of simplification required to transfer the method between sites, which introduces the need to interpret the results based on the configuration of the studied site (Brierley et al., 2006).

Qualitative frameworks used for connectivity assessment are generally realized throughout morphological and landform mappings (Harvey, 1997; Hooke, 2003; Fryirs et al., 2007a; Al-Farraj & Harvey, 2010; Croke et al., 2013). Describing these forms, explaining their occurrence and predicting a site's trajectory involves interpretation (Brierley et al., 2021). The interpretation process requires the ability to capture nuances that are inherent to site configuration and to circumscribe key elements such as proportionally active sediment sources or fundamental disconnections. These elements can then be used to give more accurate meanings to the results of quantitative methods (Brierley et al., 2006).

One such framework is detailed by Brierley et al. (2006) and uses landscape *compartments* and the *linkages* between them to describe connectivity at multiple scales. Compartments include hillslopes, tributaries, reaches and floodplains and the linkages are longitudinal, lateral and vertical. By assessing how compartments fit together in a catchment, one is able

to identify sensitive area and interpret future trajectories following a disturbance. This framework therefore appears like a good tool to integrate catchment-scale configuration in a connectivity assessment. Hooke (2003) described a morphological mapping approach to sediment connectivity targeting the river corridor. By identifying sediment sources, zones of deposition and sediment size, it is possible to interpret reach functions. These vary between source, storage, transport or exchange reaches. While the identification of such reaches offers insights at a manageable scale, a downside of this approach is that it is mainly oriented towards longitudinal connectivity and omits hillslope and hillslope channel connectivity. Another qualitative approach regarding sediment connectivity by Fryirs et al. (2007) looks at landforms inhibiting sediment transport. They named these forms *buffers*, *barriers*, and *blankets*. Identification of these landforms gives no information on potential or active sediment sources, but instead provides insight on sediment (dis)connectivity laterally for buffers, longitudinally for barriers and vertically for blankets. These nodes of (dis)connectivity are key features acting as controls of sediment connectivity.

By documenting connectivity in two small catchments, this paper aims to 1) propose a version of IC oriented towards sediment supplied from landslides and 2) show how a *collage* of existing methodologies (see Freeman, 2020) can be used to offer practical insights on coarse sediment connectivity.

Given the wide range of existing methodologies to assess elements of hydrogeomorphological connectivity, we propose assembling four complementary methods into something resembling a methodological collage. First, a variation of the index of sediment connectivity (Borselli et al., 2008; Cavalli et al., 2013) is used to spatialize potential sediment supplies at the landscape scale. Through a new definition of W , we propose a version of the IC adapted to the study of coarse sediment connectivity sourced from slope failures. This W is derived from a mechanical slope stability model, where the resulting factor of safety (FS) converted to impedance. Second, the landscape connectivity framework from (Brierley et al., 2006) is used to define compartments and linkages. Here, compartments are hillslopes, tributaries and stream reaches and the analysis of linkages is done both *within* and

between those compartments (see Brierley et al. (2006) for additional details). This creates a canvas onto what elements are added to build a connectivity portrait for the landscape at the scale of the river corridor. Third, the morphological mapping framework introduced by Hooke (2003) is used to refine connectivity observation and to spatialize controls of connectivity in the corridor. The framework also allows segmentation of reaches according to their efficiency to transport sediment. Fourth, buffers, barriers and blankets (Fryirs et al., 2007) are identified to highlight nodes where disconnectivity occurs. These disconnectors are crucial because they not only influence connectivity within the current site configuration, but their evolution over time—especially following disturbances—can significantly affect the system's connectivity (Fryirs, 2013).

2.2 STUDY SITES

Two small catchments located in the north of the Gaspé peninsula, in Québec, Canada, were selected for the study (figure 9). The peninsula is part of the Chic-Chocs mountain range which constitutes the northeastern portion of the Appalachian chain. The bedrock has been eroded by a succession of glaciations and features plateaus, cirques, and U-shaped valleys (Hétu and Gray, 1985). The surface deposits in the region are largely composed of tills from the last deglaciation, colluvial deposits, and weathered materials (Veillette and Cloutier, 1993). The hydrological regime in both catchments is snowmelt dominated with secondary peaks in river discharges due to isolated rain events. Torrential floods have a recurrence interval of 4-6 years (Boulet et al., 2022). The sites were not selected for direct comparison between them but rather to investigate connectivity for contrasting stream orders.

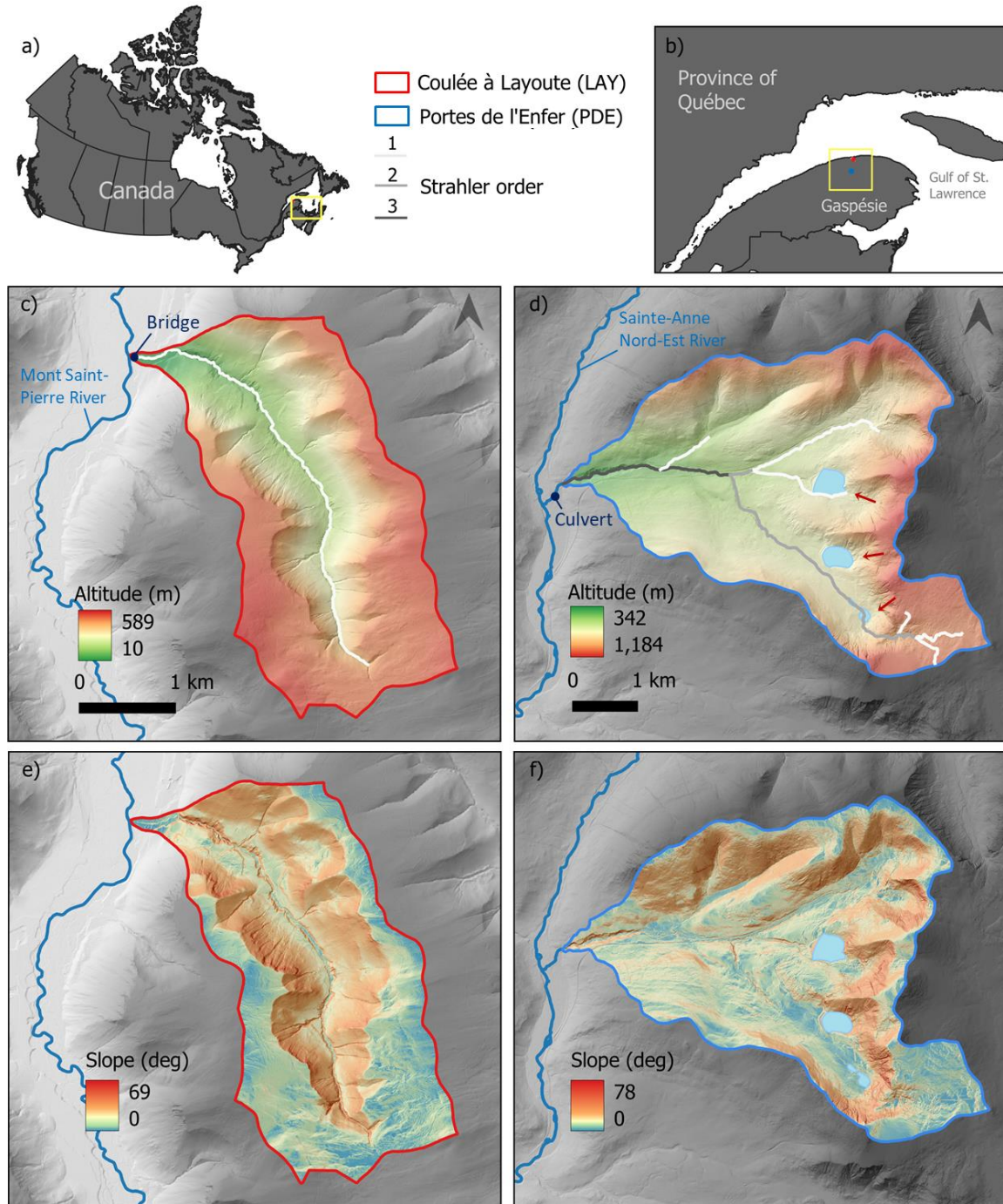


Figure 9. Locations of the studied catchments in a) eastern Canada and more specifically in b) Gaspésie, Québec; c) the Coulée à Layoute; d) the Portes de l'Enfer; e) slopes in the Coulée à Layoute and f) slopes in Portes de l'Enfer.

The Coulée à Layoute (LAY) is a 1st order stream with a catchment area of 7,7 km², which is a hanging glacial valley of the Mont Saint-Pierre river (figure 9c). With a mean altitude of 392 m, the catchment reaches a maximum elevation of 588 m and is nestled within the plateaus of Mont Saint-Pierre. These plateaus are located in the lower Gaspé platform, a large geological formation mostly made of schist and greywacke (Hétu & Gray, 1985). Winter temperatures average -14,8 °C while summer averages on 20,3 °C and total precipitations reach around 1050 mm, with about 35% falling as snow (CMIP6 climate model 1991-2020, Ouranos, 2025). The catchment features dense forest cover in the entrenched section, where slopes can reach 50°, however, significant logging were observed on the surrounding plateaus. An alluvial fan is formed at the confluence between LAY and the Mont Saint-Pierre river. Frequent dredging at a bridge on this fan indicates that LAY transports significant volumes of sediment.

The Portes de l'Enfer (PDE) is a 3rd order stream with a drainage area of 18,8 km² (figure 9d). With a mean altitude of 817 m, the catchment reaches a maximum elevation of 1184 m. It is located in the upper Gaspé platform, specifically the McGerrigle plateau, which is a batholith composed of granite and syenite (Hétu & Gray, 1985). Winter temperatures average -18,1 °C while summer averages on 18,0 °C and total precipitations reach around 1150 mm, with about 40% falling as snow (CMIP6 climate model 1991-2020, Ouranos 2025). Glacial cirques and depression lakes (red arrows on figure 9d) are visible at the head of the catchment, which reaches an altitude of 1084 m. Two of these lakes were dammed in the 1970s to increase the volume of water needed to sustain copper mining activities, which even though they operated only ten years left an important imprint in the landscape. Logging activity is limited in this area and forest cover is a mix of old growth and younger patches linked to spruce budworm epidemics (MRNF, 2024). The stream also forms an alluvial fan at its confluence with the Sainte-Anne Nord-Est river. A culvert on the fan (figure 9d) has been replaced 3 times in the last 20 years and the abundance and mobility of bars downstream of the confluence suggest that PDE is an important source of sediment for this river.

2.3 METHODOLOGY

This study builds upon existing tools to assess coarse sediment connectivity in small mountain catchments. First, the IC was calculated using the method in Cavalli et al. (2013) and is hereafter named IC_{RI}. We also propose a variation of this index aiming to consider sediments sourced from landslides. The modified index, hereafter named IC_{FS} uses a factor of safety computed using a slope stability model to account for sediment supplied from mass movements. Second, a morphological mapping approach based on landscape interpretation is used to identify elements controlling sediment connectivity and to better interpret IC_{FS} maps at the river corridor scale.

2.3.1 Index of sediment connectivity

The index of connectivity is based on the idea that the degree of connectivity in a watershed can be estimated by comparing the forces contributing to sediment input with those opposing it:

$$(1) \quad IC = \log_{10}\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right)$$

Where D_{up} is the upslope component contributing to connectivity and D_{dn} is the downslope component, which acts as a resistance.

D_{up} is as follows:

$$(2) \quad D_{up} = \bar{W} \cdot \bar{S} \cdot \sqrt{A}$$

Where $\bar{W}$ is the mean impedance of the upslope contributing area, $\bar{S}$ is the mean slope and A is the contributing area. Impedance is a weight given to each cell and initially used a variable limiting connectivity.

D_{dn} is as follows :

$$(3) \quad D_{dn} = \sum \left(\frac{d_i}{W_i \cdot S_i} \right)$$

Where d_i is the distance of flow to the i^{th} cell increasing downstream along the flow direction, W_i is impedance at the i^{th} cell and S_i is the slope at the i^{th} cell.

The IC was calculated in R (Version 4.2.2, source R) using the code developed by Martini et al. (2022a), which allows both computation of ‘standard’ IC using the Cavalli et al. (2013) equation and a custom IC with a user defined impedance raster W . In this study, W is calculated from a slope factor of safety (FS) computed using a model based on infinite slope theory (Skempton & DeLory, 1957).

2.3.2 Slope stability model

The SINMAP model (Pack *et al.*, 1998) computes FS from a DEM and a few soil mechanical parameters.

$$(4) \quad FS = \frac{C + \cos S \times \left[1 - w \times g \times \left(\frac{\rho_w}{\rho} \right) \right] \times \tan \varphi}{\sin S}$$

Where C is the combination of soil and root cohesion made dimensionless (see Pack et al., 1998), S is the slope in degrees, w is relative water level in the soil ranging from 0 to 1 (fully saturated), g is the gravitational constant, ρ_w and ρ are the bulk density of water and soil, respectively, and φ is the soil friction angle.

The model operates by calculating the slope and soil water level for each cell based on the DEM and assumes uniform soil parameters across the entire area. In the original version of the model, saturation is calculated for each cell based on a moisture index that incorporates values of transmissivity, hydrological recharge, and topography. This index is expressed as a ratio between the height of water in the soil and the soil thickness. We used a simplification and assumed a uniform saturation over the catchment when calculating FS. The analyses were performed on a scenario where the soil water level is high. The rationale behind this decision is that lateral connectivity of coarse sediments occurs during significant hydrological events, and that these events cause an important saturation of the soil. As water content can be unevenly distributed in soil (Montgomery et al., 1997) and steep slopes are

less prone to be fully saturated (Dunne, 1978), a ratio of 75% saturation was used as input to run the model.

Soil properties are notoriously challenging to obtain, largely due to their significant spatial variability (e.g. Lacasse and Nadim, 1996; Tofani et al., 2017). In this study, no field data was available for soil geotechnical properties so values had to be estimated. Surface deposits were classified (see supplementary material I) following the guidelines in the Surface Deposit Identification Guide using Lidar data (Dupuis et al., 2017). This classification served as the foundation for spatializing soil parameters. Given that the model is particularly sensitive to cohesion and friction angle (Medina et al., 2021), these two parameters were assigned statistical (normal) distributions, while bulk soil density was kept constant at $1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Based on work done by Simoni et al. (2008), Medina et al. (2021) showed that this approach efficiently captures variability in key parameters while minimizing computational demands. Their method involved iteratively determining values and ranges for soil properties, calibrated using a landslide inventory.

A similar approach was adopted here, with parameters initially sourced from the literature (Geotechdata, 2025) and subsequently calibrated by comparing model results to landslide scars identified in aerial and satellite imagery, as no formal landslide inventory exists for the study area. Table 1 shows resulting parameters used in slope stability model. While this method of parameter estimation admits some uncertainty into the model outputs, it aligns with the use of IC as a cost-effective tool for assessing potential sediment supply. Data on soil mechanical parameters is scarcely available and if this method is to be used as a tool it should operate without extensive data collection field work.

Table 1. Calibrated values entered in the slope stability model.

Surface deposit	Mean cohesion (kPa)	St. dev. cohesion (kPa)	Mean friction angle	St. dev. friction angle
Glacial till	70,5	14,8	39,5	0,8
Colluvial deposit	70,5	14,8	37,5	0,5
Weathered material	63,0	12,3	36,5	0,5
Bedrock*	9999	9999	9999	9999

*Values of 9999 in order to result in unconditionally stable FS.

By treating cohesion and friction angle as stochastic parameters, equation 4 becomes:

$$(5) \quad x(\mu_{FS}, \sigma^2_{FS}) = \frac{x(\mu_C, \sigma^2_C) + \cos S \times \left[1 - w \times g \times \left(\frac{\rho_w}{\rho} \right) \right] \times x(\mu_{\tan\phi}, \sigma^2_{\tan\phi})}{\sin S}$$

Where x is a normal distribution, μ_{FS} and σ^2_{FS} are mean and variance of the factor of safety. This is possible because of the addition of two normal distributions, in this case cohesion and friction angle, resulting in a normal distribution for FS (Simoni et al., 2008). The raster of μ_{FS} was then converted to impedance similarly to the conversion of the roughness index in Cavalli et al. (2013):

$$(6) \quad W = 1 - \left(\frac{\mu_{FS}}{\mu_{FS_{max}}} \right)$$

Where $\mu_{FS_{max}}$ is the maximum value taken by μ_{FS} in the studied catchment. The minimum value of W was floored at 0.001, as prescribed by Cavalli et al. (2013) to avoid $W_i = 0$ values in the calculation of D_{dn} . Therefore, W takes values from 0.001 to 1, with higher values on slopes more prone to landslides.

Since slope is expressed in both IC and FS calculation, it is possible that its influence is overrepresented in the final IC_{FS} results. Thus, an index calculation was performed by excluding the parameter S and S_i from equations 2 and 3, respectively, hereafter referred to as IC^*_{FS} .

The DEM used for FS and IC computation is a 1m resolution Lidar product provided by the Quebec Ministry of Natural Resources and Forests. The focus towards coarse sediments brings the question of which DEM resolution to use when computing the IC. In order to determine the proper resolution, IC was computed at 1, 3 and 5m to visually check if the results were spatially coherent. A resolution of 3m was selected to conduct the analysis as it provides a good balance between computational time, omission of topographical noise and the amount of information it provides.

2.3.3 Assessment of sediment connectivity

Various scales were examined to provide a comprehensive overview of sediment connectivity in the downstream sections of each catchment. First, the *within compartment* scale relates to sediment delivery on hillslopes and valley floors themselves. Landform mapping from field observation and GIS as well as IC maps were used for this analysis. Second, the *between compartment* scale examines the interactions of hillslopes, valley floor and tributaries. Mapping of wood jams, sediment bars and functionally connected sediment sources was done with field data while specific stream power was calculated using an area-discharge relationship with GIS data. Third, the subcatchment scale relates to how valley segments are located in relation to each other. The segments were determined by analyzing morphological data as suggested by Hooke (2003). Functions of supply, transport and transient storage were assigned to each segment.

The connectivity maps were also analyzed within two specific zones defined along the river corridor. The first zone corresponds to the valley floor which was manually delimited using the LiDAR DEM. The second zone corresponds to a 50 meters buffer around the valley floor and constitutes a way to account for proximal hillslope supply. Values of IC maps were extracted from these zones to analyze the lateral structural connectivity related to these two compartments where sediments are recruited at different frequencies and by different processes. A simple subindex called IC_{corridor} was calculated with:

$$(7) \quad IC_{\text{corridor}} = IC_{\text{floor}} / IC_{\text{hillslope}}$$

Where IC_{floor} and $IC_{\text{hillslope}}$ are IC values on valley floor and on hillslopes. The values of IC_{corridor} could be used as a proxy to assess whether sediment supply is relatively higher on hillslopes ($IC_{\text{corridor}} < 1$) or on the valley floor ($IC_{\text{corridor}} > 1$).

2.4 RESULTS

2.4.1 Index of connectivity comparison

Comparison of IC resulting from three methods are presented here for LAY only to avoid duplicating information, since PDE shows similar results (see supplementary materials II and III). The connectivity values exhibit a contrasting spatial arrangement for the three methods of IC with especially large differences when switching from RI to FS as the impedance (figure 10). High connectivity values in IC_{RI} are concentrated around the target, which highlights distance between source and target as the controlling variable in IC_{RI} . Although this is also true when using FS as impedance, high connectivity values propagate further upslope. Spatially, IC_{FS} and IC_{FS}^* are very similar (figure 10b-c) with the main difference being on the highest portion of slopes. These upslope areas appear more connected when looking at IC_{FS} . As could be expected the flat surfaces on the plateau (figure 9e) show the lowest values for all versions of IC.

Mapping IC with a jenks or natural break color code is often the choice since values are often disregarded in favor of their spatial arrangement. Here, the distributions of IC values highlight differences in the methods used for index computation. For instance, removal of the slope parameter in IC_{FS}^* slightly increases connectivity compared to IC_{FS} (figure 11). This is the opposite of what could be interpreted from the maps alone since figure 10b shows more areas classified with higher IC values than 10c. The range of values also varies from one method to another with IC_{RI} showing little spread compared to both versions of the index using FS. This larger spread could indicate that those versions of IC are more sensitive to terrain heterogeneities than IC_{RI} which is more controlled by distance to target. The larger

spread in values for IC_{FS} could be caused by an overrepresentation of the slope parameter, especially on the plateau where surfaces are largely flat.

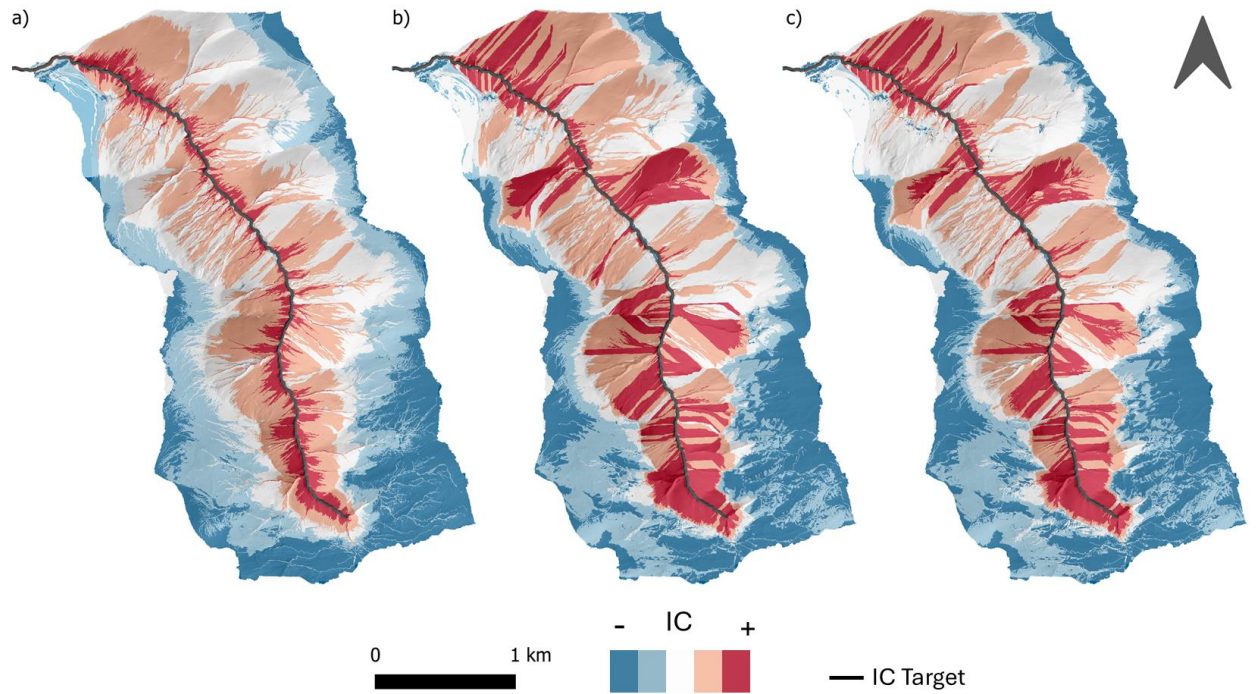


Figure 10. Mapping of IC values in LAY for three methods: a) IC_{RI} , b) IC_{FS} and c) IC^*_{FS} . Each raster has its own color scale according to jenks natural breaks (see figure 11 for details on IC value distributions).

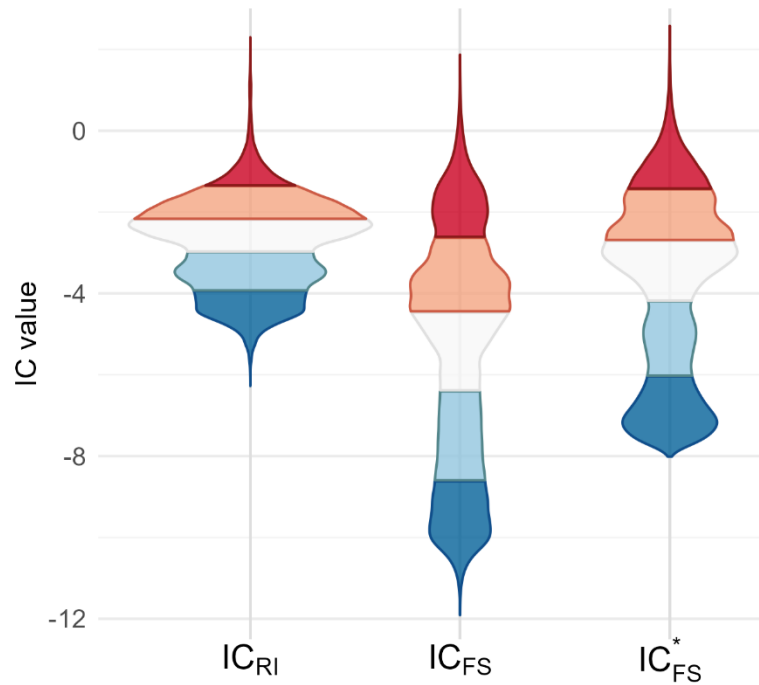


Figure 11. Distributions of values for three methods of IC computation with color mapped according to jenks natural breaks classification.

In short, the method using IC_{FS}^* shows more heterogeneity than IC_{RI} and highlights areas more prone to sediment supply from shallow landslides instead of clustering high IC values around the target. It is also less sensitive to slope than IC_{FS} , allowing distance to target to impact the resulting IC map instead of classifying entire slope faces as highly connected. For these reasons, the remaining analyses use IC_{FS}^* .

2.4.2 Connectivity in a 1st order stream (Coulée à Layoute)

Within compartment connectivity

Structural connectivity in LAY reaches its highest values in the incised sections of the plateau, while the lowest values are observed on the plateau itself (figure 12). In this

catchment, the steep, upper parts of hillslopes facilitate small failures that quickly gain energy traveling down, often evolving into debris flows (figure 13a) (Iverson et al., 1997). Intermittent streams also contribute to sediment mobilization along slope faces. Some of these 0th-order streams are situated within small cirques, which are identified as structurally connected (figure 12). During high-magnitude hydrological events leading to torrential flows, these headwaters can transport substantial volumes of sediment (Maltais, 2019).

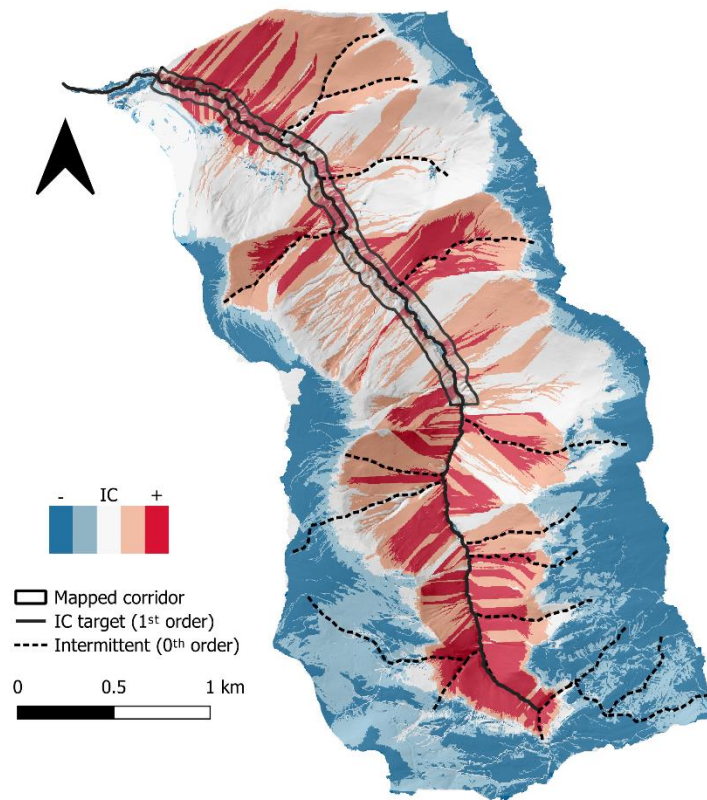


Figure 12. Structural connectivity map for the LAY using IC^*_{FS} method of computation.

Confinement is important in this small 1st order catchment (figure 14a), especially in the downstream reach which forms a gorge with scarce sediment accumulations on the valley floor outside of the channel itself. Confinement becomes discontinuous upstream of this gorge, where floodplain pockets start appearing. Their role as buffers is confirmed by the presence of flood deposits (figure 13b). These deposits showing gravel sized particles suggest a high magnitude low frequency event would be necessary to remobilize them.



Figure 13. Photographs in LAY showing a) debris flows initiated by small failure upslope (photo courtesy of Yan Boulet), b) flood deposit on the forest floor, c) large wood jam blocking connectivity, d) logstep, e) vertical rock wall supplying sediment directly to the channel and f) eroded debris flow deposit (note person standing on top for scale).

Between compartment connectivity

The principal blockage to longitudinal connectivity in LAY is the presence of large wood jams (figure 13c). These jams cause deposition of significant volumes of sediment ranging from sand to large blocks. Logsteps also contribute to longitudinal disconnectivity by trapping sediments and reducing bed gradient (figure 13d). They are mainly located in two areas (logsteps hotspots, figure 14b) with a few isolated steps found in-between.

Connectivity between hillslope and valley floor is strong in the catchment, with important sediment supply directly to the channel (figure 14c). In the downstream confined part, sediment falls directly in the river from vertical walls (figure 13e). Upstream, steep slopes show debris flow scars (figure 13a) whose deposits reached the channel and were remobilized by the stream (figure 13f), indicating direct connectivity between these two compartments. Floodplain pockets on the valley floor present a few deposits from hillslopes, indicating that

a certain magnitude is necessary for an event to supply sediment to the channel in those less confined reaches. Structural connectivity at the scale of the corridor (figure 14f) shows a non-intuitive pattern where higher relative hillslope connectivity seems to appear where confinement is less important while higher relative valley floor connectivity appears in the fully confined reaches.

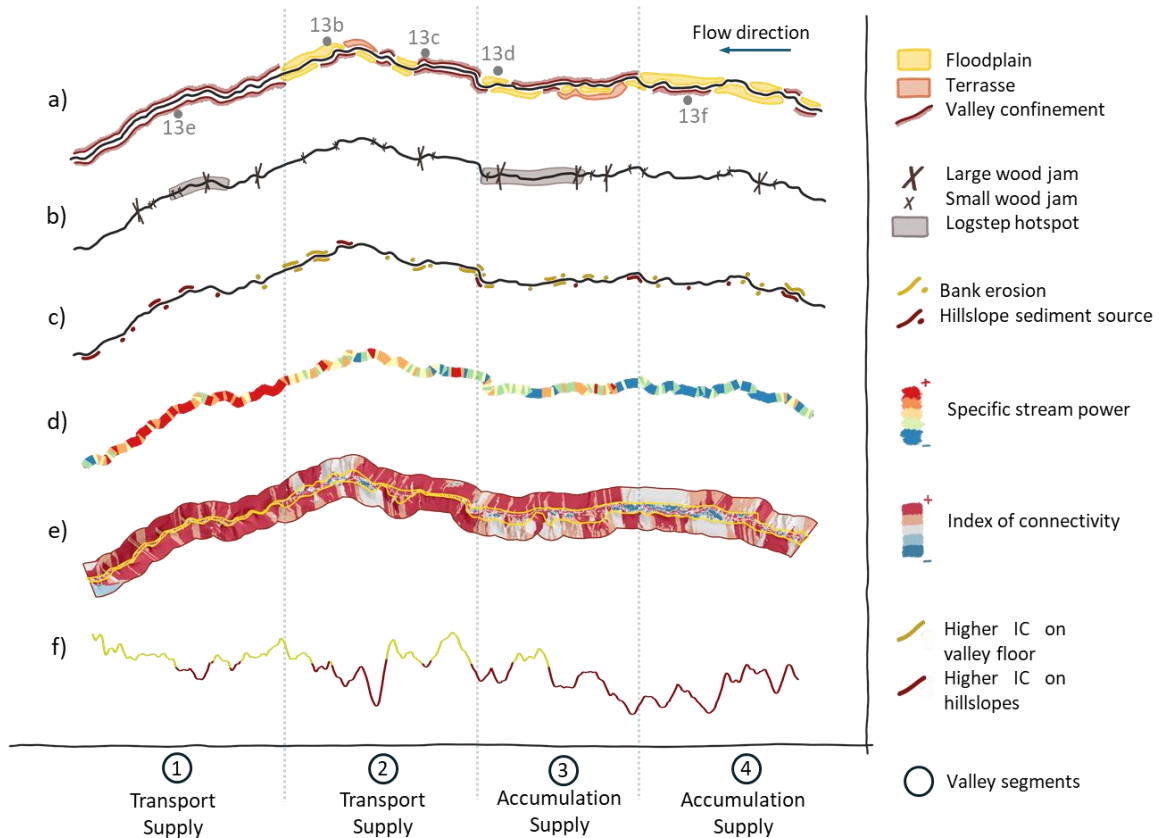


Figure 14. Mapping of the studied portion of LAY with a) near channel landforms and locations of figure 13 photographs, b) in-channel wood structures, c) functionally connected sediment supply, d) stream power, e) near channel IC^*_{FS} and f) ratio between valley floor IC^*_{FS} and hillslope IC^*_{FS} .

Subcatchment scale

Sediment sources occur along the whole studied part of LAY (figure 14c), so all reaches were identified as *supply* reaches. Storage occurs mainly upstream, where reach 4 has lower stream power and a more widely distributed floodplain and where reach 3 has a

more in-channel wood blocking longitudinal connectivity. Transport in reach 1 is indicated by the high stream power and confinement, but at the same time dampened by the presence of in-channel wood. Wood is scarce in reach 2, indicating a low degree of longitudinal blockage of connectivity.

2.4.3 Connectivity in a 3rd order stream (Portes de l'Enfer)

Within compartment connectivity

In PDE, the highest values are mostly located on steep slopes adjacent to the target channel (figure 15). Steeper slopes located farther back in the catchment are largely disconnected by distance to target and a relatively flat valley bottom. The IC map seems to effectively represent the layout of these concave profiled, less competent slopes (figure 9f). It also shows disconnected areas, which were manually removed when they flowed into a sink such as a lake. On the ground, landslide scars can be seen on several slopes adjacent to the stream (figure 16a). The surface deposits on which these landslides occurred are loose and show a wide range of grain size (figure 16d).

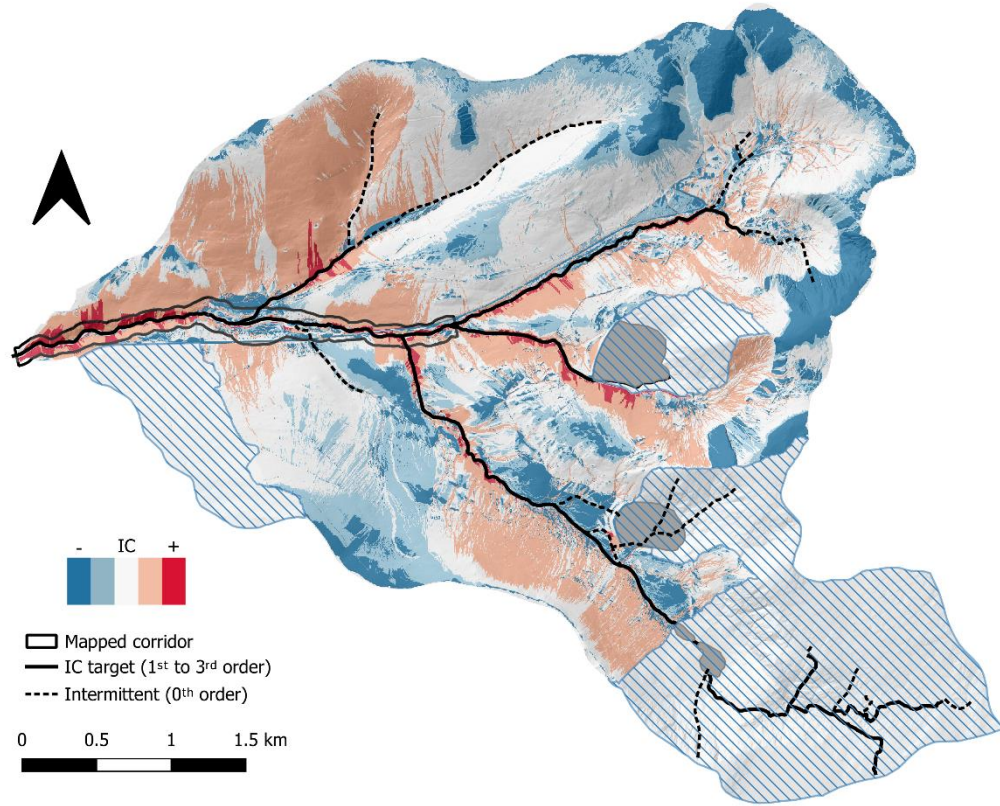


Figure 15. Structural connectivity map for PDE using IC_{FS}^* method of computation.

The downstream portion of the watershed forms an incised gorge with high confinement (figure 17a). Floodplain pockets form in the downstream part of this gorge while terraces in the upstream part could indicate bed incision. Upstream from this gorge is a well-developed floodplain with lateral migration processes and avulsion channels (figure 16b). The more upstream portion of the main channel is semi-confined between slopes and a road. The floodplain becomes more fragmented in this area, giving way to a semi-confined configuration between a road and steep slopes (figure 17a).



Figure 16. Photographs in PDE showing a) landslide scars, b) ancient avulsion channel in the alluvial reach, c) step-pool morphology in a high energy, confined reach, d) rills on the surface of a landslide scar, e) bank erosion and f) hillslope deposit disconnected from the channel by vegetation.

Between compartment connectivity

Longitudinal connectivity appears to vary from reach to reach in the main channel, with higher connectivity in more confined reaches where stream power shows higher values (figure 17d). For instance, these high gradient reaches show few sediments below gravel size in the channel (figure 16c) and tracer data (not presented) show important travel distances for blocks of up to 40 cm in diameter. Meanwhile, sediment bars are abundant in the unconfined reach (figure 17b-c) where stream power is low. These observations could indicate the presence of a barrier limiting longitudinal connectivity and favoring transient storage.

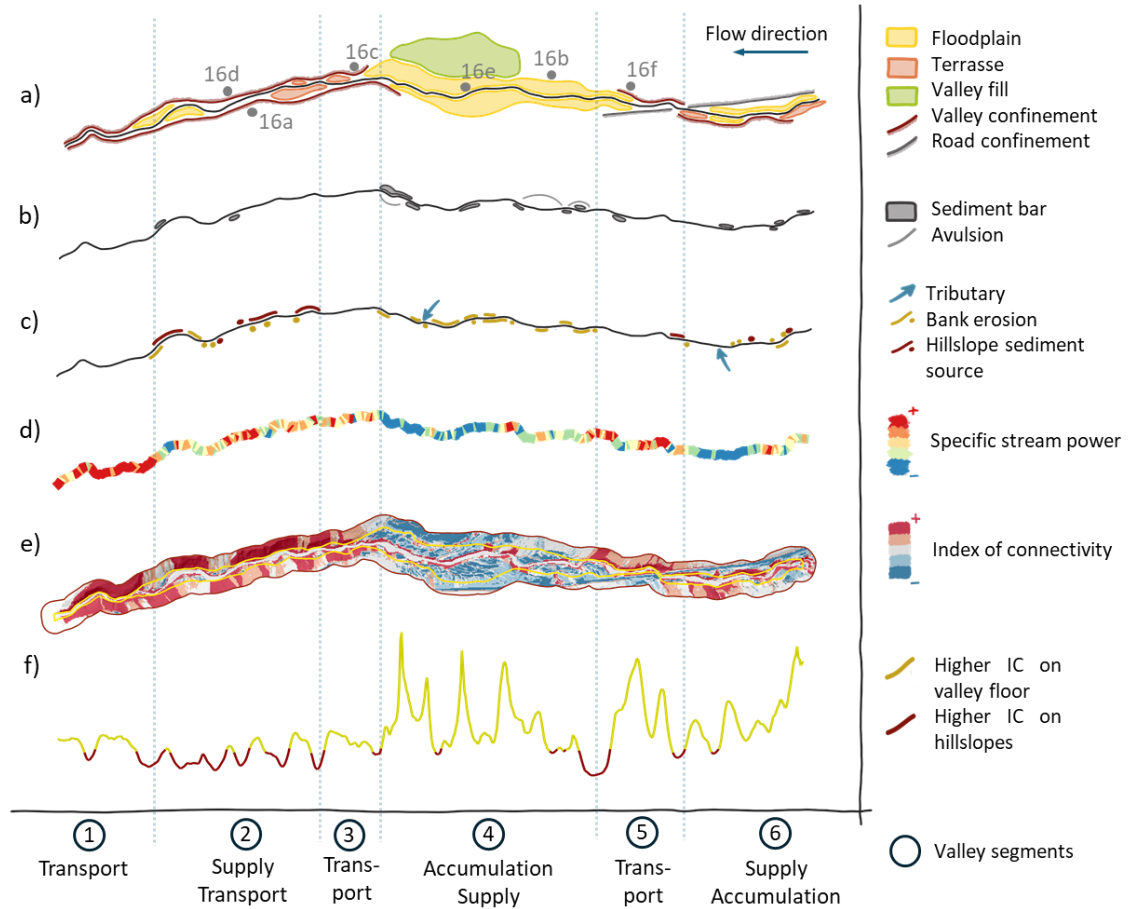


Figure 17. Mapping of the studied portion of PDE with a) near channel landforms and locations of figure 16 photographs, b) sediment stores, c) functionally connected sediment supply, d) stream power, e) near channel IC_{FS}^* and f) ratio between valley floor IC_{FS}^* and hillslope IC_{FS}^* .

Two low-order tributaries flow into the studied portion of PDE (figure 17c), which can supply sediments to the studied main channel. These sub-catchments have their own dynamics and, as lower order streams, can be likened to LAY and the observations made there. Still, it is difficult to assess the sediment contribution of these subsystems while working at the resolution of the PDE catchment, but the confluences allow some interpretation. The downstream tributary (left arrow on figure 17c) is likely to play a smaller role in sediment supply because it flows on a flat surface, a buffer identified as valley fill on figure 17a. The

other tributary, a 2nd order stream (figure 9d), is slightly steeper at its confluence which makes it a more connected supply.

Hillslope-valley connectivity is high in the downstream reach where landslide scars are free of vegetation and show rills on their surface (figure 16d). Finer sediments aren't accumulating at the foot of these active sources, which indicates that at least a portion is mobilized by the stream. Structural connectivity (figure 17f) also shows higher values on hillslopes in this fully confined reach. The floodplain is an important buffer disconnecting hillslopes from the channel in the middle part of the studied portion of the stream. Nonetheless this floodplain acts as supply of sediments with bank erosion being ubiquitous in this reach (figure 16e). These eroding banks are not the focus of the index but are still well represented in IC (figure 17e) and appear as the spikes of higher IC on valley floor (figure 17f). The semi-confined reach upstream shows a few instances where hillslopes could supply sediment (figure 17f), but many of them are functionally disconnected by a barrier of vegetation (figure 16f).

Subcatchment scale

Functional sediment supply in the PDE is discontinuous with reaches showing no sediment supply from banks or hillslopes. Reaches 1, 3 and 5 were assigned a transport function since they showed no deposition bedforms and relatively high stream power values (figure 17). Reaches 4 and 6, on the other hand, showed many in-channel sediment bars and low stream power. In addition, the high number of active sediment sources indicates their function as *supply* reaches. Their connectivity to the outlet is damped by the important deposition happening in reach 4. Hillslope supply is important in reach 2 with large, connected landslide scars (figure 16a-d) and high structural connectivity in the gorge (figure 17e-f). Deposits at the feet of these slopes show mainly very coarse particles indicating recruitment of finer sediment during high flows.

2.5 DISCUSSION

2.5.1 Connectivity controlled by scale

The framework put forward by Hooke (2003) was used as the foundation to which different concepts and methods were added to better assess coarse sediment connectivity. First, landscape linkages (Brierley et al., 2006) are used to look at spatial dimensions of connectivity, with a few of the linkages defined in the original paper used here to determine key controls. Second, the concepts of buffers, barriers and blankets (Fryirs et al., 2007) were incorporated to complement the interpretations of landscape linkages and introduce a temporal element to the analysis. Third, the index of connectivity (Borselli et al., 2008; Cavalli et al., 2013) introduced a quantitative dimension looking at where sediments are structurally available, which was also nuanced by looking at buffer locations.

Sediment connectivity differs between the two studied catchments (table 2). In PDE, sediment supply varies widely across reaches: reach 2 features large, connected landslides; reach 4 is dominated by bank erosion; and reaches 1, 3, and 5 show no sediment recruitment (figure 14). In contrast, LAY lacks such a clear division of sediment sources. Strong confinement promotes lateral inputs occurring via rockfall, small landslides, and debris flows. Although lateral connectivity is higher in LAY, in-channel sediment availability is greater in PDE, where the bed comprises readily mobilized material and sediment bars reworked by minor floods. Conversely, the bed in LAY alternates between thin gravel layers and bedrock, with large deposits often stabilized by large wood, increasing the energy needed for mobilization.

Table 2. Summary of factors controlling (dis)connectivity in studied catchments.

Controlling factors	1 st order stream (LAY)	3 rd order stream (PDE)
Sediment supply (banks and slopes)	○ Active sediment input in all reaches	○ Some reaches show little sediment input and others only bank erosion
Sediment supply (channel)	○ Bedrock in some reaches ○ Sediment accumulated on logjams	○ Gravel bed in all reaches ○ Sediment bars readily available
Barriers	○ Valley constriction ○ Logjams ○ Logsteps	○ Valley constriction
Buffers	○ Floodplain pockets ○ Terraces	○ Continuous floodplain ○ Floodplain pockets ○ Terraces ○ Trapped tributary fill

Buffers and barriers also take different forms in the studied catchments. Buffers play a more prominent role in PDE, where the continuous floodplain and tributary fill dissipate energy and disconnect hillslopes from the channel. While floodplain pockets act as a similar buffer in LAY, debris flows can overcome them due to high confinement. Valley constriction acts as a significant barrier to longitudinal connectivity in PDE, causing upstream backfilling and the development of a continuous floodplain. This alluvial floodplain then serves as a barrier by reducing stream power and channel capacity, making valley constriction a key factor in longitudinal (dis)connectivity. Despite this, the scarcity of other barriers supports strong downstream connectivity. On the other hand, large wood dominates as a barrier in LAY, decreasing connectivity longitudinally, but increasing it laterally by promoting overbank flow (Wohl & Beckman, 2014).

Large wood naturally enters many river systems, with its volume determined by the balance between recruitment and transport or decay (Benda & Sias, 2003; Benda et al., 2005). This volume varies geographically, influencing its role on connectivity (Wohl & Beckman, 2014). The contrast between our two study sites demonstrates this. LAY shows many signs of recruitment, especially through windthrows, and trees are taller than the average channel

width which limits transport distance (Gurnell et al., 2002). This results in a high volume of in-channel wood, which is not unusual for this kind of transport-limited, forested headwater stream (Hassan et al., 2005). In contrast, PDE stores almost no wood in the channel despite lateral migration and mass movements potentially supplying it. The lack of large wood here likely stems from more efficient transport due to its higher stream flow and altered conditions from 1970-1980 copper mining activities, which widened the active channel and built (then removed) a dam (figure 18). These changes may lead to a wood regime that is not ‘natural’ (*sensu* Wohl et al., 2019b), suggesting a legacy effect from mining activities (Wohl, 2015).

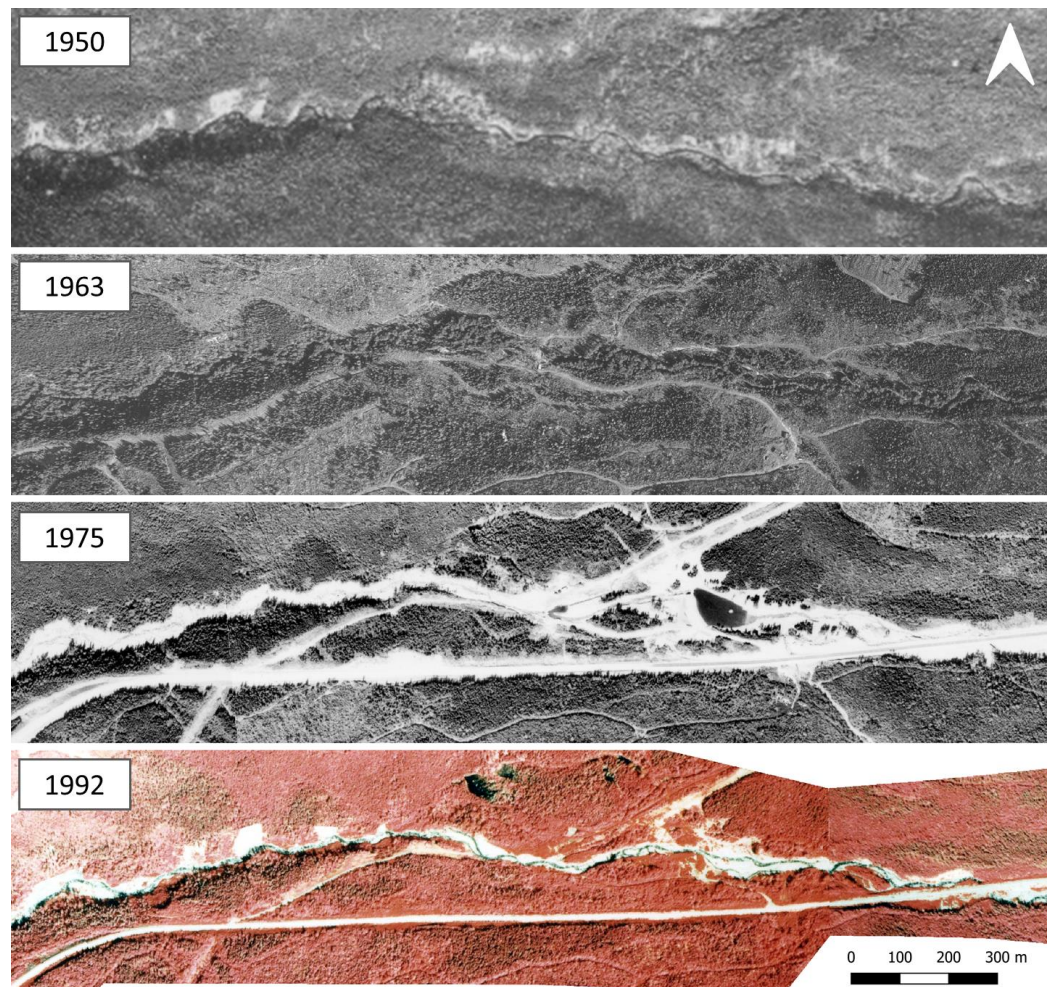


Figure 18. Evolution of PDE seen through historical aerial photography, 1950 and 1963 show the stream prior to mining activities, 1975 was taken during the active mining years and 1992 is a decade after the mine closed.

The frequency and magnitude of sediment transporting events also differs in the studied catchments. For instance, we can assume a more episodic regime in LAY, driven by pulses both from hillslope sediment supply (Miller & Benda, 2000) and logjam breaching (Adenlof & Wohl, 1994). In contrast, the large bars in PDE are readily available supplies of material which can be mobilized in lesser, more frequent floods (Hooke, 2003). These large bars appeared following the mining activities in the 1970s, which have increased connectivity up to now and maybe permanently (Bracken et al., 2015).

Blankets were largely omitted in the results since there wasn't a specific landform acting as a vertical disconnecter of connectivity. The influence of the vegetation cover must however be recognized as a type of blanket since it plays an important role in controlling sediment fluxes in this type of mountainous, forested terrain. The popular IC_{RI} (Cavalli et al., 2013) was developed for an alpine landscape where vegetation cover is discontinuous. In such landscapes, bare sediment is ready to be mobilized and IC_{RI} can be used to interpret areas of catchment with higher potential sediment recruitment. Here, the continuous dense forest cover forms a blanket, greatly reducing the mobilization of sediments by surface runoff and making IC_{RI} less adapted to this environment Jautzy et al. (2021). With the proposed IC_{FS} , potential connected landslides are identified which will, at first, supply a pulse of sediments and wood to the stream. These landslides also disrupt the effect of the forest blanket, forming discontinuities in the vegetation cover. Their significance lies in the fact that discrete sources of sediments such as gullies forming in landslide scars can drive a large portion of the sediment supply in these catchments.

2.5.2 Building on the index of connectivity

While there is still no established method to validate the index of connectivity (Hooke & Souza, 2021), output maps are frequently used as representations of structural connectivity (Najafi et al., 2021). The challenge lies in the fact that the IC is a model, and without proper validation, its results remain theoretical hypotheses (Hooke & Souza, 2021). However, this does not render the IC useless until validation is achieved; it simply calls for careful

interpretation of connectivity assessments based on this tool. Through this study, we advocate for using the IC as a tool rather than an end, emphasizing that it should not be applied in isolation but instead be "grounded in catchment-specific knowledge" (Brierley et al., 2006). Three aspects are discussed here to highlight the use of IC tailored to the research questions.

The first contribution of this study to the use of IC is the implementation of the factor of stability as the impedance. It allowed to assess sources of coarse sediments transported by shallow landslides and debris flows, processes known to contribute to fluvial sediment budget (Benda and Dunne, 1997). This modified IC shows promising results but must be interpreted with care because, as mentioned, validation is complex. Nonetheless, field identification of active sediment sources and buffers to connectivity allowed a more nuanced interpretation of the IC maps at the scale of the river corridor.

The second contribution is the quantification of IC values in the river corridor. Recent studies have investigated methods of quantification, for instance Torresani et al. (2021, 2023) investigated how IC parameters vary longitudinally along the thalweg, Ardizzone et al. (2024) looked at IC values in different hillslope instabilities, Jautzy et al. (2021) and Liu et al. (2022) investigated the interannual evolution connectivity values in different landscape units. Similarly, the work presented in this paper aims to move beyond the standard qualitative appraisal of the IC map and presents ways to link scales of connectivity from catchment to river corridor. The IC_{corridor} subindex shows a way to compare connectivity in different landscape units, namely hillslopes and valley floor. This tool successfully identified reaches where mass movement was supplying sediment to the channel in PDE while field mapping was useful in recognizing buffers not identified by IC. In the more confined corridor of LAY, the applicability of IC_{corridor} was not as definite. Many areas showed higher values on the valley floor while in reality confinement is so important that sediment is mainly supplied from adjacent slopes. As a result, the use of IC_{corridor} could be less adapted to lower order, confined headwater streams and more useful in slightly larger catchments like PDE where the scale of valley floor can effectively limit hillslope supply in some reaches.

Nonetheless, we consider that this analysis of IC expands the range of applications for the index.

The third contribution is a discussion on what determines the optimal resolution for IC. Many studies have investigated the effect of pixel size on model results for rockfalls (Loye et al., 2009; Bühler et al., 2016), landslides (Tarolli & Dalla Fontana, 2009; Pradhan & Sameen, 2017), connectivity (Brardinoni et al., 2015; Cantreul et al., 2018), hydrology (Zhang & Montgomery, 1994; Thielen et al., 1999). It is generally accepted that finer resolutions provide more realistic representations of topographic features. However, this doesn't not always mean better representation of processes and the "ideal pixel size" doesn't exist (Hengl, 2006) and methodologies should instead aim to find the right "pixel range".

As finer resolutions become increasingly accessible through advances in technology (e.g. satellites, LiDAR, UAVs), the influence of noise must be considered (Cantreul et al., 2018). Cavalli et al. (2013) note that high-resolution DEMs enhance characterization of surface roughness, which controls part of sediment connectivity. Refining DEM resolution has been shown to decrease IC values (Brardinoni et al., 2015; Cantreul et al., 2018), likely due to increased surface roughness. Lane et al. (2017) attribute part of surface roughness to noise, calling it methodological disconnection, and another part to process disconnection. They highlight that the roughness threshold distinguishing noise from process varies with landform characteristics and hydrological flow. Similarly, we propose that surface roughness impacts connectivity differently based on process competence. For low-energy surface flows, resolutions of 1m or less may be suitable, but such fine resolutions may introduce noise for high-energy processes like landslides and debris flows. This hypothesis is supported by observations made on IC_{FS}^* runs made at 1, 3 and 5 m (see supplementary materials IV). At finer resolution, small roughness elements such as small trails and forestry roads appeared to control flow pathways. On the other hand, the coarser 5 m resolution omitted smaller gullies which in this case were identified as sediment supplies. The right pixel range therefore appears to be somewhere around 3 m for our specific study area and research question. This highlights the role of landforms significant to the analysis of connectivity and the scale at

which they can be detected. The identification of landforms relevant to a site could therefore be used to guide the choice of resolution

2.5.3 Informing decision using connectivity

While controlling the occurrence of hydrometeorological events causing sediment transport is not possible, we can act on how the river responds to them. If, historically, managing rivers meant controlling processes using "hard" measures including levees, embankments and riprap (Hooke, 1999; Surian & Rinaldi, 2003), sustainable practices are now increasingly present for river restoration (Wohl et al., 2005; Smith et al., 2014, Wohl et al., 2015) and risk mitigation (Kondolf et al., 2014; Dadson et al., 2017). Such methods require a good understanding of the system, especially factors controlling its connectivity or, as Wohl et al. (2019a) put it, "Understanding connectivity in relation to the morphodynamics of rivers is critical for making informed decisions in river management practice. Essentially, such understanding is concerned with the management of fluxes".

Quantification of connectivity is still a work in progress and there is no agreement as to how we can compare connectivity across scales (Bracken et al., 2013; Wohl et al., 2019a). Still, reading the landscape and place-based understanding of sites have value and can be used to inform decisions (Brierley et al., 2013). With this in mind, the methodological approach used here allowed the identification of reaches acting as supply, transport or transient storage of coarse sediment. It also revealed a regime of infrequent sediment pulses in one catchment and a more recurrent one due to the lack of barriers in the other. These kinds of assessments are valuable to river managers, especially when used together with tools that can recognize active tributaries. In this case, the two studied streams were identified by Mazgareanu et al. (2020) as significant tributaries in relation to confluence activity. If sediment control measures are to be taken, our method can then be used to point where and give insight on how to proceed.

For example, a culvert located on the fan at the confluence of PDE and the Sainte-Anne Nord-Est was replaced on at least three occasions in the last 20 years because it was undersized.

Our assessment of coarse sediment connectivity in the river corridor shows that the shallow landslide scars actively supply sediment to the channel, and that high longitudinal connectivity allows for this material to be transported beyond the culvert. The near absence of sediment smaller than gravel size combined with the abundance of large blocks in reaches 1 and 2 (classified as transport reaches, figure 17) also highlight the strong connectivity of coarser particles. In this case, proper evaluation of connected sediment supplies could have guided the design of the infrastructure at the beginning, instead of proceeding to what appears like a trial and error.

Another example illustrates how knowledge of the portrait of connectivity could inform land use in catchments like LAY. The Gaspé region is considered a resource region, with the least industrial diversity and the most activity in the primary sector than any other region in the province (Hamelin et al., 2024). A large part of its industry lies in the forest sector and, between logging, fires and insects, large forested areas are being cleared (Global forest watch, 2025). Notably, logging activities tend to target flatter surfaces, leaving steeper slopes forested in what could be seen as a buffer between the disturbance and the stream. However, Germain and Voiculescu (2007) observed that clear-cutting on the Mont Saint-Pierre plateaus affects snow accumulation patterns and lead to an increase in avalanche corridor formation. Similarly, debris flow occurrence increases on hillslopes below logged plateaus when roads and drainage diversions alter natural flow pathways (Jordan et al., 2010). An analysis of connectivity as presented here highlights the role of hillslope processes as a driver of the sediment regime in LAY. This information is then valuable for forest management since, in this case, disturbances up on the plateau can propagate downstream and an increase in sediment supply could increase mobility on the alluvial fan (Bryant et al., 1995; Ashworth et al., 2004).

2.6 CONCLUSION

This paper contributed to the body of literature regarding the index of sediment connectivity. The use of a landslide stability model as impedance revealed a different spatial

arrangement of connectivity compared to a roughness-based impedance model, with higher values on slopes prone to shallow landslide and coarse sediment connectivity. A way to quantify the index at the scale of the corridor was introduced with the aim of moving beyond visual assessment of IC maps and make them more applicable. Integrating connectivity into practice is a complex task and while researchers have significantly advanced the concept in recent years, we still face the impossibility of summarizing all factors into one metric (Martini et al., 2022b).

In order to move sediment connectivity into an operational role, the next step should focus on finding the right tool for the right application. An ideal tool should be capable of spatializing compartments or units within the system while accounting for connectivity in all three dimensions—longitudinal, lateral, and vertical—since these interact dynamically. It should also evaluate the degree or magnitude of connectivity, a task most commonly performed using quantitative tools. Additionally, considering site configuration (*sensu* Simpson, 1963) adds important nuances that must be factored in when using models to inform decisions. Finding a single tool that meets all these criteria remains a significant challenge.

We addressed this issue by using a methodological collage of readily available tools. In doing so, we were able to identify key components related to connectivity which can then be used to inform decision makers. These elements were different for the two studied catchments despite them being in the same region. Differences related to scale, land use and valley setting contribute to unique catchment configurations. This should be reflected in the tools used to study connectivity, with unique collages of methodologies.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La grande quantité de travaux récents portant sur la connectivité sédimentaire témoigne d'un engouement pour ce pan de la géomorphologie. Beaucoup d'efforts ont été orientés vers le développement de cadres conceptuels et d'outils pour mesurer et caractériser la connectivité. C'est dans cette démarche que s'insère le présent mémoire, avec comme objectif la valorisation de connaissances existantes. Spécifiquement, un indice de connectivité a été modifié en y intégrant le facteur de stabilité issu d'un modèle de glissements de terrain. Cet ajout a permis de tenir compte des sédiments provenant de glissements surfaciques dans deux cours d'eau montagnards en Gaspésie. Ensuite, une proposition d'analyse de l'indice de connectivité allant au-delà de l'interprétation visuelle de la carte a été faite. Bien que les résultats soient prometteurs, cette analyse de l'IC à l'échelle du corridor semble plus adaptée à un cours d'eau d'ordre 3 que d'ordre 1. Finalement, l'analyse de la connectivité a été faite pour deux cours d'eau, faisant ressortir des contrôles spécifiques à chacun.

Dans la Coulée à Layoute, cours d'eau de 1^{er} ordre, l'omniprésence de sources de sédiments actives sur les versants ainsi que le fort confinement indiquent une connectivité latérale importante. Ceci, combiné à une pente dans le chenal laisse penser que le transit sédimentaire est important à l'exutoire. Le dragage près du ponceau situé sur le cône confirme que le cours d'eau est en mesure de transporter une quantité non-négligeable de sédiments. Cependant, ce transit est fortement atténué par la présence de bois dans le chenal en amont. Le bois a été identifié comme un des facteurs principaux dans la (dé)connectivité de ce cours d'eau. Au contraire, le bois est pratiquement absent dans le ruisseau des Portes de l'Enfer, un cours d'eau de 3^e ordre présentant peu de barrières à la connectivité. Dans ce cours d'eau, les sources sont plus variables avec non seulement un apport des versants mais aussi des berges, du lit et de tributaires. Dans ce système, dont l'échelle est plus large que celle du précédent, les contrôles de la connectivité sont plus variables dans l'espace. Certains tronçons sont complètement confinés alors que d'autres présentent une plaine alluviale bien développée et

de la migration latérale. Bien qu'ils partagent une proximité géographique, les deux systèmes étudiés présentent des contrôles distincts en termes de connectivité.

Ces distinctions, qu'on peut attribuer à la configuration du site, suggèrent que les méthodes doivent être réfléchies non seulement en fonction des objectifs de la recherche tel que suggéré dans la littérature, mais aussi en fonction du site où la recherche prend place. Ces spécificités ne sont toutefois pas connues d'emblée et il peut être difficile de définir des méthodes en amont d'un projet. Dans ce cas-ci, l'approche du collage méthodologique a permis d'adapter la démarche en incluant des éléments tirés de méthodologies existantes au rythme de progression du projet. Par exemple, une cartographie morphologique terrain était prévue mais les éléments à cartographier ont changé en cours de route. La présence de bancs d'accumulation a été documentée dans le ruisseau des Portes de l'Enfer et une attention a été faite à l'apport de sédiments par les tributaires. Cependant, la cartographie de la Coulée à Layoute a rapidement montré une absence de bancs et de tributaires et la cartographie a été particulièrement orientée vers le bois mort et le confinement. Cette spontanéité a donc été enrichissante dans le processus de collecte de données. Le collage implique aussi le « découpage » de méthodologies et de cadres conceptuels pour utiliser les parties qui nous sont pertinentes. Par exemple, le cadre conceptuel de Brierley et al. (2006) décompose le système fluvial en plusieurs compartiments et propose d'analyser l'ensemble des liens entre ceux-ci. Dans l'article présenté ici, un nombre réduit de compartiments ont été sélectionnés puisque le reste était moins adapté à l'échelle des petits cours d'eau étudiés. Aussi, ce mémoire s'intéresse particulièrement à la connectivité longitudinale et latérale, laissant de côté la dimension verticale. Les idées de Fryirs et al. (2007) ont donc été « découpées » pour conserver les buffers et les barrières, ignorant les drapages qui sont des freins à la connectivité verticale.

Cette approche de collage méthodologique n'est pas révolutionnaire et constitue probablement la réalité de bien des projets de recherche. Cependant il paraît important de la nommer puisqu'elle permet de justifier des choix méthodologiques et favorise la réflexion sur la méthodologie tout au long du projet et non seulement en amont. La recherche effectuée

dans ce mémoire comporte néanmoins des limites, notamment en terme du choix des sites et des méthodes ainsi que des biais dans l'analyse. D'abord, le projet est né d'un intérêt de lier la connectivité sédimentaire grossière à deux échelles spatiales, celle du bassin-versant et du corridor fluvial. L'indice de connectivité s'est donc rapidement imposé comme choix méthodologique pour sa capacité de modélisation à l'échelle du bassin-versant. L'ajout du modèle de stabilité de pente à l'indice a été fait dans le but de considérer des processus à forte compétence, capables de mobiliser des sédiments grossiers en provenance des versants. Ainsi, l'analyse a grandement portée sur la connectivité des versant au cours d'eau et peu d'espace a été consacré à l'apport de sédiments grossiers par les berges, ou à la connectivité longitudinale des sédiments présents sur le lit.

Qu'elle soit de nature écologique, hydrologique ou sédimentaire, la connectivité continue de susciter de l'intérêt dans le monde de la recherche. Cet intérêt percole tranquillement vers la pratique, bien que des efforts soient toujours nécessaires. Le projet présenté ici montre comment une variété de méthodes peuvent être combinées pour brosser un portrait de la connectivité sédimentaire et identifier quels sont les éléments clés à considérer. Dans ce cas-ci, la connectivité structurelle n'est pas distinguée de sa contrepartie fonctionnelle, en partie parce que cette dernière n'est pas clairement définie. Des efforts supplémentaires dans la définition de la connectivité fonctionnelle permettraient de mieux discerner les sédiments « disponibles » et « accessibles » (Najafi et al., 2021). Ceci augmenterait le pouvoir prédictif de la connectivité et favoriserait son intégration dans la pratique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adenlof, K. A., & Wohl, E. E. (1994). Controls on Bedload Movement in a Subalpine Stream of the Colorado Rocky Mountains, U.S.A. *Arctic and Alpine Research*, 26(1), 77–85. <https://doi.org/10.1080/00040851.1994.12003043>
- Al-Farraj, A., & Harvey, A. (2010). Influence of hillslope-to-channel and tributary-junction coupling on channel morphology and sediments: Bowderdale Beck, Howgill Fells, NW England. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 54(2), 203–224. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2010/0054-0018>
- Ardizzone, F., Esposito, G., Cavalli, M., Crema, S., & Fiorucci, F. (2024). Sediment connectivity as a key to understand geomorphic effects of the Storm Alex in two mountain catchments of the Mediterranean Alps (Italy). *Geomorphology*, 455, 109176. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109176>
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2013). The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology*, 486, 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.010>
- Ashworth, P. J., Best, J. L., & Jones, M. (2004). Relationship between sediment supply and avulsion frequency in braided rivers. *Geology*, 32(1), 21–24. <https://doi.org/10.1130/G19919.1>
- Association des gestionnaires régionaux des cours d'eau du Québec (AGRCQ). (2024, April). Spécial colloque 2024—La connectivité aquatique. *Mém'Eau*, 11(1), 40.
- Baartman, J. E. M., Nunes, J. P., Masselink, R., Darboux, F., Biëlders, C., Degré, A., Cantreul, V., Cerdan, O., Grangeon, T., Fiener, P., Wilken, F., Schindewolf, M., & Wainwright, J. (2020). What do models tell us about water and sediment connectivity? *Geomorphology*, 367, 107300. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107300>
- Baartman, J. E. M., Masselink, R., Keesstra, S. D., & Temme, A. J. A. M. (2013). Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(12), 1457–1471. <https://doi.org/10.1002/esp.3434>
- Bagnold, R. A. (1966). *An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics*. U.S. Government Printing Office.

- Benda, L., & Dunne, T. (1997). Stochastic forcing of sediment supply to channel networks from landsliding and debris flow. *Water Resources Research*, 33(12), 2849–2863. <https://doi.org/10.1029/97WR02388>
- Benda, L. E., & Sias, J. C. (2003). A quantitative framework for evaluating the mass balance of in-stream organic debris. *Forest Ecology and Management*, 172(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00576-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00576-X)
- Benda, L., Hassan, M. A., Church, M., & May, C. L. (2005). Geomorphology of steepland headwaters: The transition from hillslopes to channels. *Journal Of The American Water Resources Association*, 41(4), 835–851.
- Bennett, A. F. (2003). *Linkages in the Landscape: The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*. IUCN.
- Bilby, R. E. (1981). Role of Organic Debris Dams in Regulating the Export of Dissolved and Particulate Matter from a Forested Watershed. *Ecology*, 62(5), 1234–1243. <https://doi.org/10.2307/1937288>
- Blåfield, L., Calle, M., Kasvi, E., & Alho, P. (2024). Modelling seasonal variation of sediment connectivity and its interplay with river forms. *Geomorphology*, 463, 109346. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109346>
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA*, 75(3), 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Boulet, Y., Gauthier, F., Buffin-Bélanger, T., & Hétu, B. (2022). Seuils de précipitation, variabilité spatiotemporelle et tendances climatiques dans les pluies torrentielles en Haute-Gaspésie, Québec. In C. Cloutier, D. Turmel, Maghoul, & A. Locat (Eds.), *Proceedings of the 8th Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards: Innovative geoscience for tomorrow* (pp. 405–413).
- Bracken, L. J., & Croke, J. (2007). The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 21(13), 1749–1763. <https://doi.org/10.1002/hyp.6313>
- Bracken, L. J., Turnbull, L., Wainwright, J., & Bogaart, P. (2015). Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 177–188. <https://doi.org/10.1002/esp.3635>
- Bracken, L. J., Wainwright, J., Ali, G. A., Tetzlaff, D., Smith, M. W., Reaney, S. M., & Roy, A. G. (2013). Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. *Earth-Science Reviews*, 119, 17–34. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>

- Brardinoni, F., Cavalli, M., Heckmann, T., Liébault, F., & Rimböck, A. (2015). *Guidelines for assessing sediment dynamics in alpine basins and channel reaches* (Research Report No. WP4; p. 70). irstea.
- Brierley, G., Fryirs, K., Cullum, C., Tadaki, M., Huang, H. Q., & Blue, B. (2013). Reading the landscape: Integrating the theory and practice of geomorphology to develop place-based understandings of river systems. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 37(5), 601–621. <https://doi.org/10.1177/0309133313490007>
- Brierley, G., Fryirs, K., & Jain, V. (2006). Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications. *Area*, 38(2), 165–174. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x>
- Brierley, G., Fryirs, K., Reid, H., & Williams, R. (2021). The dark art of interpretation in geomorphology. *Geomorphology*, 390, 107870. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107870>
- Brunsdon, D., & Thornes, J. B. (1979). Landscape Sensitivity and Change. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 4(4), 463–484. <https://doi.org/10.2307/622210>
- Bryant, M., Falk, P., & Paola, C. (1995). Experimental study of avulsion frequency and rate of deposition. *Geology*, 23(4), 365–368. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0365:ESOFAFA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0365:ESOFAFA>2.3.CO;2)
- Buffin-Bélanger, T., Lachapelle, F., Biron, P., & Boivin, M. (2024). Trajectoires et visées de l'hydrogéomorphologie au Québec. *Canadian Geographies / Géographies canadiennes*, 68(2), 196–211. <https://doi.org/10.1111/cag.12893>
- Bühler, Y., Christen, M., Glover, J., Christen, M., & Bartelt, P. (2016). *Significance of digital elevation model resolution for numerical rockfall simulations*. 15–17.
- Calle, M., Calle, J., Alho, P., & Benito, G. (2020). Inferring sediment transfers and functional connectivity of rivers from repeat topographic surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(3), 681–693. <https://doi.org/10.1002/esp.4765>
- Cantreul, V., Bièlders, C., Calsamiglia, A., & Degré, A. (2018). How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(4), 884–893. <https://doi.org/10.1002/esp.4295>
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>

- Cossart, É., & Fressard, M. (2017). Assessment of structural sediment connectivity within catchments: Insights from graph theory. *Earth Surface Dynamics*, 5(2), 253–268. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-253-2017>
- Cossart, E., Viel, V., Lissak, C., Reulier, R., Fressard, M., & Delahaye, D. (2018). How might sediment connectivity change in space and time? *Land Degradation & Development*, 29(8), 2595–2613. <https://doi.org/10.1002/ldr.3022>
- Coulthard, T. J., & Van De Wiel, M. J. (2017). Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use changes. *Geomorphology*, 277, 265–281. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.027>
- Crema, S., & Cavalli, M. (2018). SedInConnect: A stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. *Computers & Geosciences*, 111, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.009>
- Croke, J., Fryirs, K., & Thompson, C. (2013). Channel–floodplain connectivity during an extreme flood event: Implications for sediment erosion, deposition, and delivery. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(12), 1444–1456. <https://doi.org/10.1002/esp.3430>
- Czuba, J. A., & Foufoula-Georgiou, E. (2015). Dynamic connectivity in a fluvial network for identifying hotspots of geomorphic change. *Water Resources Research*, 51(3), 1401–1421. <https://doi.org/10.1002/2014WR016139>
- Davis, W. M. (1899). The geographical cycle. *The Geographical Journal*, 14(5), 481–504.
- D’Haen, K., Duser, B., Verstraeten, G., Degryse, P., & De Brue, H. (2013). A sediment fingerprinting approach to understand the geomorphic coupling in an eastern Mediterranean mountainous river catchment. *Geomorphology*, 197, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.038>
- Dubois, J.-M. M., & Provencher, L. (2010). Évolution de la géomorphologie depuis la fin du XIXe siècle. *Cahiers de géographie du Québec*, 54(151), 77–116. <https://doi.org/10.7202/044368ar>
- Dunne, T. (1978). Field studies of hillslope flow processes. In M. J. Kirkby (Ed.), *Hillslope Hydrology* (pp. 227–293). Wiley.
- Dunne, T. (1990). Chapter 1: Hydrology mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. In C. G. Higgins & D. R. Coates (Eds.), *Groundwater Geomorphology; The Role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes and Landforms: Vol. Special paper #252* (pp. 1–28). Geological Society of America.

- Dupuis, M., Leboeuf, A., Vaillancourt, É., Lachance, D., Lefrançois, N., Savard, J., & Hubert, L. (2017, October). *Guide d'utilisation du LiDAR pour l'identification des dépôts de surface et des bancs d'emprunt*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP).
- Freeman, C. (2020). Multiple methods beyond triangulation: Collage as a methodological framework in geography. *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, 102(4), 328–340. <https://doi.org/10.1080/04353684.2020.1807383>
- Fryirs, K. (2013). (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(1), 30–46. <https://doi.org/10.1002/esp.3242>
- Fryirs, K. A. (2017). River sensitivity: A lost foundation concept in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 55–70. <https://doi.org/10.1002/esp.3940>
- Fryirs, K. A., Brierley, G. J., Preston, N. J., & Kasai, M. (2007). Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *CATENA*, 70(1), 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.07.007>
- Fryirs, K. A., Brierley, G. J., Preston, N. J., & Spencer, J. (2007). Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper Hunter catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology*, 84(3), 297–316. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.044>
- Gay, A., Cerdan, O., Mardhel, V., & Desmet, M. (2016). Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *Journal of Soils and Sediments*, 16(1), 280–293. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1235-y>
- Geotechdata. (2025). *Geotechnical parameters*. Geotechdata.Info. <https://www.geotechdata.info/parameter>
- Germain, D., & Voiculescu, M. (2007). Les avalanches de neige dans les Chic-Chocs (Canada) et les Carpates Méridionales (Roumanie) Bilan des connaissances et perspectives futures. *Revista de Geomorfologie*, 9, 17–31.
- Gilbert, G. K. (1877). *The geology of the Henry Mountains*. U.S. Government Printing Office.
- Global Forest Watch (GFW). (2025). *La Haute-Gaspésie, Québec, Canada Deforestation Rates & Statistics | GFW*. [globalforestwatch.org. https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/CAN/11/37?category=forest-change](https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/CAN/11/37?category=forest-change)

- Gurnell, A. M., Piégay, H., Swanson, F. J., & Gregory, S. V. (2002). Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47(4), 601–619. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00916.x>
- Hamelin, F., Bisson, P., Girard, N., & Pongo, M. (2024). *Portrait économique des régions du Québec* (p. 120). Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE).
- Hardy, F., Bariteau, L., Lorrain, S., Thériault, I., Gagnon, G., Messier, D., & Rougerie, J.-F. (2010). Geochemical tracing and spatial evolution of the sediment bed load of the Romaine River, Québec, Canada. *CATENA*, 81(1), 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.005>
- Harvey, A. (1997). Coupling between hillslope gully systems and stream channels in the Howgill Fells, northwest England: Temporal implications. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 3(1), 3–19. <https://doi.org/10.3406/morfo.1997.897>
- Harvey, A. M. (2000). Coupling within Fluvial Geomorphic Systems: Spatial and Temporal Implications. *Journal of Earth Science*, 11(1), 9–27.
- Harvey, A. M. (2001). Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: Implications for landscape sensitivity, illustrated from the Howgill Fells, northwest England. *CATENA*, 42(2), 225–250. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00139-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00139-9)
- Harvey, A. M. (2002). Effective timescales of coupling within fluvial systems. *Geomorphology*, 44(3), 175–201. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00174-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00174-X)
- Hassan, M. A., Hogan, D. L., Bird, S. A., May, C. L., Gomi, T., & Campbell, D. (2005). Spatial and Temporal Dynamics of Wood in Headwater Streams of the Pacific Northwest. *Journal Of The American Water Resources Association*, 41(4), 899–919. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03776.x>
- Heckmann, T., Cavalli, M., Cerdan, O., Foerster, S., Javaux, M., Lode, E., Smetanová, A., Vericat, D., & Brardinoni, F. (2018). Indices of sediment connectivity: Opportunities, challenges and limitations. *Earth-Science Reviews*, 187, 77–108. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.004>
- Heckmann, T., & Schwanghart, W. (2013). Geomorphic coupling and sediment connectivity in an alpine catchment—Exploring sediment cascades using graph theory. *Geomorphology*, 182, 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.033>

- Heckmann, T., & Vericat, D. (2018). Computing spatially distributed sediment delivery ratios: Inferring functional sediment connectivity from repeat high-resolution digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(7), 1547–1554. <https://doi.org/10.1002/esp.4334>
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1283–1298. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>
- Hétu, B., & Gray, J. (1985). Le modelé glaciaire du centre de la Gaspésie septentrionale, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 39(1), 47–66. <https://doi.org/10.7202/032584ar>
- Hillman, M., Brierley, G. J., & Fryirs, K. A. (2012). Social and Biophysical Connectivity of River Systems. In G. J. Brierley & K. A. Fryirs, *River Futures: An Integrative Scientific Approach to River Repair* (pp. 147–169). Island Press.
- Hoffmann, T. (2015). Sediment residence time and connectivity in non-equilibrium and transient geomorphic systems. *Earth-Science Reviews*, 150, 609–627. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.008>
- Hooke, J. (2003). Coarse sediment connectivity in river channel systems: A conceptual framework and methodology. *Geomorphology*, 56(1), 79–94. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00047-3)
- Hooke, J., & Sandercock, P. (2012). Use of vegetation to combat desertification and land degradation: Recommendations and guidelines for spatial strategies in Mediterranean lands. *Landscape and Urban Planning*, 107(4), 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.07.007>
- Hooke, J., & Souza, J. (2021). Challenges of mapping, modelling and quantifying sediment connectivity. *Earth-Science Reviews*, 223, 103847. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103847>
- Hutton, J. (1795). *Theory of the Earth* (Vols. 1–2). Edinburgh: William Creech.
- Iverson, R. M., Reid, M. E., & LaHusen, R. G. (1997). Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, 85–138. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.85>
- Jautzy, T., Maltais, M., & Buffin-Bélanger, T. (2021). Interannual evolution of hydrosedimentary connectivity induced by forest cover change in a snow-dominated mountainous catchment. *Land Degradation and Development*, 32(7), 2318–2335. <https://doi.org/10.1002/ldr.3902>

- Jordan, P., Millard, T. H., Campbell, D., Schwab, J. W., Wilford, D. J., Nicol, D., & Collins, D. (2010). Forest Management Effects on Hillslope Processes. In T. Redding, R. Pike, R. D. Moore, R. Winkler, & K. Bladon (Eds.), *Compendium of forest hydrology and geomorphology in British Columbia: Volume 1 of 2* (pp. 275–323). B.C. Ministry of Forests and Range.
- Kalantari, Z., Cavalli, M., Cantone, C., Crema, S., & Destouni, G. (2017). Flood probability quantification for road infrastructure: Data-driven spatial-statistical approach and case study applications. *Science of The Total Environment*, 581–582, 386–398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.147>
- Kondolf, G., Boulton, A., O'Daniel, S., Poole, G., Rahel, F., Stanley, E., Wohl, E., Bång, A., Carlstrom, J., Cristoni, C., Huber, H., Koljonen, S., Louhi, P., & Nakamura, K. (2006). Process-Based Ecological River Restoration: Visualizing Three-Dimensional Connectivity and Dynamic Vectors to Recover Lost Linkages. *Ecology and Society*, 11(2). <https://doi.org/10.5751/ES-01747-110205>
- Kondolf, G. M., & Pinto, P. J. (2017). The social connectivity of urban rivers. *Geomorphology*, 277, 182–196. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.028>
- Kondolf, George 'mathias. (1997). Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21, 533–551. <https://doi.org/10.1007/s002679900048>
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1996). Uncertainties in Characterizing Soil Properties. In C. D. Shackelford, P. P. Nelson, & M. J. S. Roth (Eds.), *Uncertainty in the geologic environment: From theory to practice* (Vol. 1, pp. 49–75). American Society of Civil Engineers. <http://archive.org/details/uncertaintyingeo0000unce>
- Lane, E. W. (1955). *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering* (Hydraulic Laboratory Report No. 372; p. 21). Department of the Interior.
- Lane, S. N., Tayefi, V., Reid, S. C., Yu, D., & Hardy, R. J. (2007). Interactions between sediment delivery, channel change, climate change and flood risk in a temperate upland environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(3), 429–446. <https://doi.org/10.1002/esp.1404>
- Liu, W., Shi, C., Ma, Y., & Wang, Y. (2022). Evaluating sediment connectivity and its effects on sediment reduction in a catchment on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 408, 115566. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115566>
- López-Vicente, M., Quijano, L., Palazón, L., Gaspar, L., & Navas, A. (2015). Assessment of soil redistribution at catchment scale by coupling a soil erosion model and a sediment connectivity index (central spanish pre-pyrenees). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(1), Article 1. <https://doi.org/10.18172/cig.2649>

- López-Vicente, M., Sun, X., Onda, Y., Kato, H., Gomi, T., & Hiraoka, M. (2017). Effect of tree thinning and skidding trails on hydrological connectivity in two Japanese forest catchments. *Geomorphology*, 292, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.006>
- Loye, A., Jaboyedoff, M., & Pedrazzini, A. (2009). Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5), 1643–1653. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1643-2009>
- Lucía, A., Antonello, A., Campana, D., Cavalli, M., Crema, S., Silvia, F., Marchese, E., Niedrist, M., Schneiderbauer, S., & Comiti, F. (2015). Monitoring and Modeling Large Wood Recruitment and Transport in a Mountain Basin of North-Eastern Italy. In L. Giorgio, A. Massimo, R. Massimo, G. Orazio, M. Jean-Christophe, & G. Gordon E. (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory* (Vol. 3, pp. 155–158). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2_31
- Lyell, C. (1830–1833). *Principles of Geology* (Vols. 1–3). London: John Murray.
- Maltais, M. (2019). *Évolution spatiale et temporelle de la dynamique du bois mort en rivière, Mont-Louis, Gaspésie* [Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski]. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.23150.15685>
- Maltais, M., Buffin-Belanger, T., & Boivin, M. (2024, December). Le bois en rivière, où en sommes-nous? Un lien étroit avec la gestion des cours d'eau. *Mém'Eau*, 13(1), 5–7.
- Marchi, L., & Dalla Fontana, G. (2005). GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology*, 48(2), 218–228. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1292-4>
- Martini, L., Baggio, T., Torresani, L., Crema, S., & Cavalli, M. (2022a). R_IC: A novel and versatile implementation of the index of connectivity in R. *Environmental Modelling & Software*, 155, 105446. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105446>
- Martini, L., Cavalli, M., & Picco, L. (2022b). Predicting sediment connectivity in a mountain basin: A quantitative analysis of the index of connectivity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(6), 1500–1513. <https://doi.org/10.1002/esp.5331>
- Mazgareanu, I., Biron, P. M., & Buffin-Bélanger, T. (2020). A fuzzy GIS model to determine confluence morphological sensitivity to tributary inputs at the watershed scale. *Geomorphology*, 357, 107095. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107095>

- Medina, V., Hürlimann, M., Guo, Z., Lloret, A., & Vaunat, J. (2021). Fast physically-based model for rainfall-induced landslide susceptibility assessment at regional scale. *CATENA*, 201, 105213. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105213>
- Messenzehl, K., Hoffmann, T., & Dikau, R. (2014). Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Mütsch, Swiss National Park—Linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling. *Geomorphology*, 221, 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.033>
- Miller, D. J., & Benda, L. E. (2000). Effects of punctuated sediment supply on valley-floor landforms and sediment transport. *GSA Bulletin*, 112(12), 1814–1824. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<1814:EOPSSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<1814:EOPSSO>2.0.CO;2)
- Ministère des ressources naturelles et des forêts (MRN). (2017). *Épidémie, chablis et verglas* [Dataset]. Données Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/epidemies-chablis-et-verglas>
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4), 1153–1171. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., Torres, R., Anderson, S. P., Heffner, J. T., & Loague, K. (1997). Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall. *Water Resources Research*, 33(1), 91–109. <https://doi.org/10.1029/96WR02985>
- Najafi, S., Dragovich, D., Heckmann, T., & Sadeghi, S. H. (2021). Sediment connectivity concepts and approaches. *CATENA*, 196, 104880. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104880>
- Nones, M. (2019). Dealing with sediment transport in flood risk management. *Acta Geophysica*, 67(2), 677–685. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00273-7>
- Olsen, J. R., Stedinger, J. R., Matalas, N. C., & Stakhiv, E. Z. (1999). CLIMATE VARIABILITY AND FLOOD FREQUENCY ESTIMATION FOR THE UPPER MISSISSIPPI AND LOWER MISSOURI RIVERS¹. *Journal Of The American Water Resources Association*, 35(6), 1509–1523. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb04234.x>
- Ortíz-Rodríguez, A. J., Borselli, L., & Sarocchi, D. (2017). Flow connectivity in active volcanic areas: Use of index of connectivity in the assessment of lateral flow contribution to main streams. *CATENA*, 157, 90–111. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.009>
- Ouranos. (2024). *Portraits climatiques*. Portraits.Ouranos. <https://portraits.ouranos.ca/fr>

- Owens, P. N., Batalla, R. J., Collins, A. J., Gomez, B., Hicks, D. M., Horowitz, A. J., Kondolf, G. M., Marden, M., Page, M. J., Peacock, D. H., Petticrew, E. L., Salomons, W., & Trustrum, N. A. (2005). Fine-grained sediment in river systems: Environmental significance and management issues. *River Research and Applications*, 21(7), 693–717. <https://doi.org/10.1002/rra.878>
- Pack, R. T., Tarboton, D. G., & Goodwin, C. N. (1998). The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping. In D. Moore & O. Hunger (Eds.), *Engineering geology and natural hazards* (Vol. 2, pp. 1157–1166).
- Poepl, R. E., Dilly, L. A., Haselberger, S., Renschler, C. S., & Baartman, J. E. M. (2019). Combining Soil Erosion Modeling with Connectivity Analyses to Assess Lateral Fine Sediment Input into Agricultural Streams. *Water*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/w11091793>
- Poepl, R. E., Keiler, M., Von Elverfeldt, K., Zweimueller, I., & Glade, T. (2012). The influence of riparian vegetation cover on diffuse lateral sediment connectivity and biogeomorphic processes in a medium-sized agricultural catchment, Austria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94(4), 511–529. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2012.00476.x>
- Pradhan, B., & Sameen, M. I. (2017). Effects of the Spatial Resolution of Digital Elevation Models and Their Products on Landslide Susceptibility Mapping. In B. Pradhan (Ed.), *Laser Scanning Applications in Landslide Assessment* (pp. 133–150). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55342-9_7
- Pringle, C. M. (2001). Hydrologic Connectivity and the Management of Biological Reserves: A Global Perspective. *Ecological Applications*, 11(4), 981–998. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[0981:HCATMO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[0981:HCATMO]2.0.CO;2)
- Renard, K. G. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Rogers, K. H. (2006). The real river management challenge: Integrating scientists, stakeholders and service agencies. *River Research and Applications*, 22(2), 269–280. <https://doi.org/10.1002/rra.910>
- Rosso, R., Rulli, M. C., & Vannucchi, G. (2006). A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 42(6). <https://doi.org/10.1029/2005WR004369>
- Schiemer, F., Keckeis, H., Reckendorfer, W., & Winkler, G. (2001). The “inshore retention concept” and its significance for large rivers. *River Systems*, 12(2–4), 509–516. <https://doi.org/10.1127/lr/12/2001/509>

- Schmitt, R. J. P., Bizzi, S., & Castelletti, A. (2016). Tracking multiple sediment cascades at the river network scale identifies controls and emerging patterns of sediment connectivity. *Water Resources Research*, 52(5), 3941–3965. <https://doi.org/10.1002/2015WR018097>
- Simoni, S., Zanotti, F., Bertoldi, G., & Rigon, R. (2008). Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOtop-FS. *Hydrological Processes*, 22(4), 532–545. <https://doi.org/10.1002/hyp.6886>
- Simpson, G. G. (1963). Historical science. In C. C. Albritton (Ed.), *The Fabric of Geology* (pp. 24–48). Freeman, Cooper, & Co.
- Skempton, A. W., & DeLory, S. A. (1957). *Stability of Natural Slopes in London Clay*. 378–381. <https://doi.org/10.1680/sposm.02050>
- Smetanová, A., Paton, E. N., Maynard, C., Tindale, S., Fernández-Getino, A. P., Marqués Pérez, M. J., Bracken, L., Le Bissonnais, Y., & Keesstra, S. D. (2018). Stakeholders' perception of the relevance of water and sediment connectivity in water and land management. *Land Degradation & Development*, 29(6), 1833–1844. <https://doi.org/10.1002/ldr.2934>
- Sougnéz, N., van Wesemael, B., & Vanacker, V. (2011). Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain. *CATENA*, 84(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.010>
- Surian, N., Righini, M., Lucía, A., Nardi, L., Amponsah, W., Benvenuti, M., Borga, M., Cavalli, M., Comiti, F., Marchi, L., Rinaldi, M., & Viero, A. (2016). Channel response to extreme floods: Insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy. *Geomorphology*, 272, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.002>
- Tangi, M., Schmitt, R., Bizzi, S., & Castelletti, A. (2019). The CASCADE toolbox for analyzing river sediment connectivity and management. *Environmental Modelling & Software*, 119, 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.07.008>
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309–319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Tarolli, P., & Dalla Fontana, G. (2009). Hillslope-to-valley transition morphology: New opportunities from high resolution DTMs. *Geomorphology*, 113(1–2), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.006>

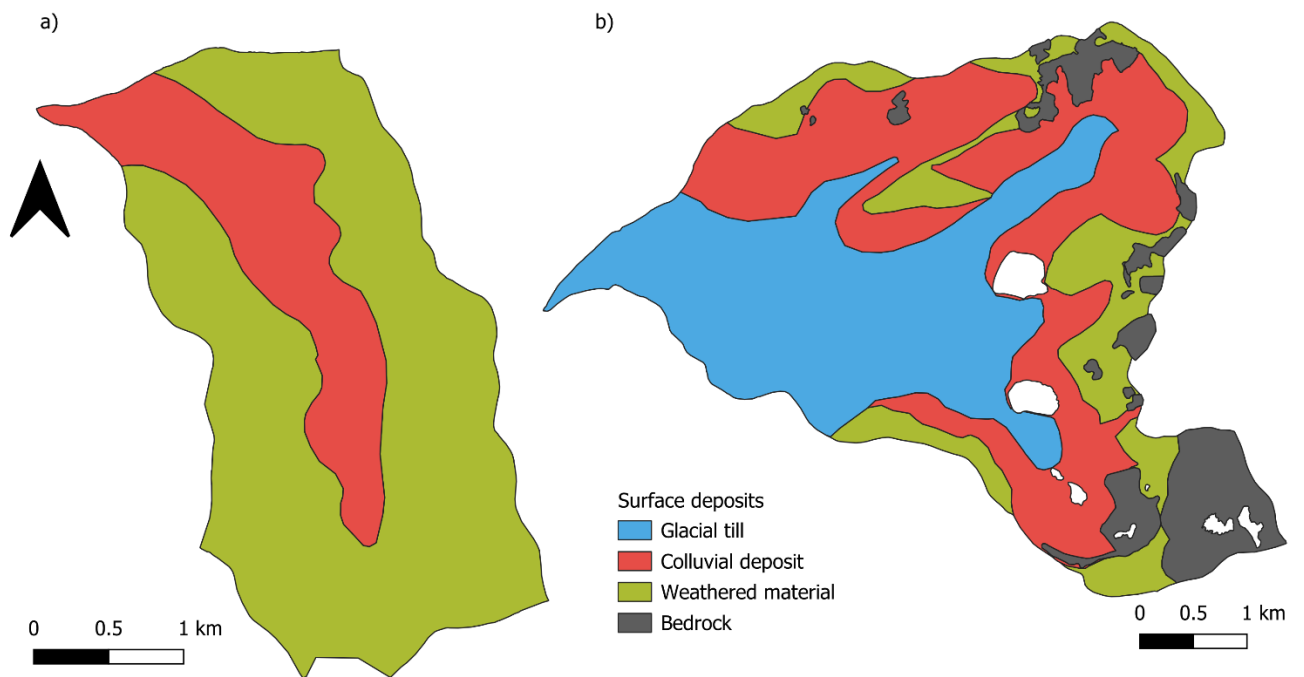
- Tetzlaff, D., Soulsby, C., Bacon, P. J., Youngson, A. F., Gibbins, C., & Malcolm, I. A. (2007). Connectivity between landscapes and riverscapes—A unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science? *Hydrological Processes*, 21(10), 1385–1389. <https://doi.org/10.1002/hyp.6701>
- Thielen, A. H., Lücke, A., Diekkrüger, B., & Richter, O. (1999). Scaling input data by GIS for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 13(4), 611–630. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199903\)13:4<611::AID-HYP758>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199903)13:4<611::AID-HYP758>3.0.CO;2-6)
- Tofani, V., Bicocchi, G., Rossi, G., Segoni, S., D'Ambrosio, M., Casagli, N., & Catani, F. (2017). Soil characterization for shallow landslides modeling: A case study in the Northern Apennines (Central Italy). *Landslides*, 14(2), 755–770. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0809-8>
- Torresani, L., D'agostino, V., & Piton, G. (2021). *Deciphering sediment Connectivity Index and erosion pattern in a debris flow catchment*. 303–311.
- Torresani, L., Piton, G., & D'Agostino, V. (2023). Morphodynamics and sediment connectivity index in an unmanaged, debris-flow prone catchment: A through time perspective. *Journal of Mountain Science*, 20(4), 891–910. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7746-2>
- Turley, M., Hassan, M. A., & Slaymaker, O. (2021). Quantifying sediment connectivity: Moving toward a holistic assessment through a mixed methods approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(12), 2501–2519. <https://doi.org/10.1002/esp.5191>
- Turnbull, L., Hütt, M.-T., Ioannides, A. A., Kininmonth, S., Poepl, R., Tockner, K., Bracken, L. J., Keesstra, S., Liu, L., Masselink, R., & Parsons, A. J. (2018). Connectivity and complex systems: Learning from a multi-disciplinary perspective. *Applied Network Science*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.1007/s41109-018-0067-2>
- Turnbull, L., & Wainwright, J. (2019). From structure to function: Understanding shrub encroachment in drylands using hydrological and sediment connectivity. *Ecological Indicators*, 98, 608–618. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.039>
- Veillette, J. J., & Cloutier, M. (1993). *Géologie des formations en surface, Gaspésie, Québec* [Map]. Canadian Geological Survey. <https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/handle/1845/194893>
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L. T. H., McInnes, J., & Roberts, A. M. (2012). Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138(1), 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>

- Vörösmarty, C. J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., & Syvitski, J. P. M. (2003). Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39(1), 169–190. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00023-7)
- Wainwright, J., Turnbull, L., Ibrahim, T. G., Lexartza-Artza, I., Thornton, S. F., & Brazier, R. E. (2011). Linking environmental régimes, space and time: Interpretations of structural and functional connectivity. *Geomorphology*, 126(3), 387–404. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.027>
- Walling, D. E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65(1), 209–237. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
- Walling, D. E., & Zhang, Y. (2004). Predicting slope-channel connectivity: A national-scale approach. *IAHS Publication*, 288, 107–114.
- Ward, J. V., & Stanford, J. A. (1995). Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. *Regulated Rivers: Research & Management*, 11(1), 105–119. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450110109>
- Werner, B. T., & McNamara, D. E. (2007). Dynamics of coupled human-landscape systems. *Geomorphology*, 91(3–4), 393–407. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.04.020>
- Willgoose, G. (2005). Mathematical Modeling of Whole Landscape Evolution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1), 443–459. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122610>
- Wohl, E. (2015). Legacy effects on sediments in river corridors. *Earth-Science Reviews*, 147, 30–53. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.001>
- Wohl, E. (2017). Connectivity in rivers. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 41(3), 345–362. <https://doi.org/10.1177/0309133317714972>
- Wohl, E., & Beckman, N. D. (2014). Leaky rivers: Implications of the loss of longitudinal fluvial disconnectivity in headwater streams. *Geomorphology*, 205, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.022>
- Wohl, E., Brierley, G., Cadol, D., Coulthard, T. J., Covino, T., Fryirs, K. A., Grant, G., Hilton, R. G., Lane, S. N., Magilligan, F. J., Meitzen, K. M., Passalacqua, P., Poepl, R. E., Rathburn, S. L., & Sklar, L. S. (2019a). Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 4–26. <https://doi.org/10.1002/esp.4434>

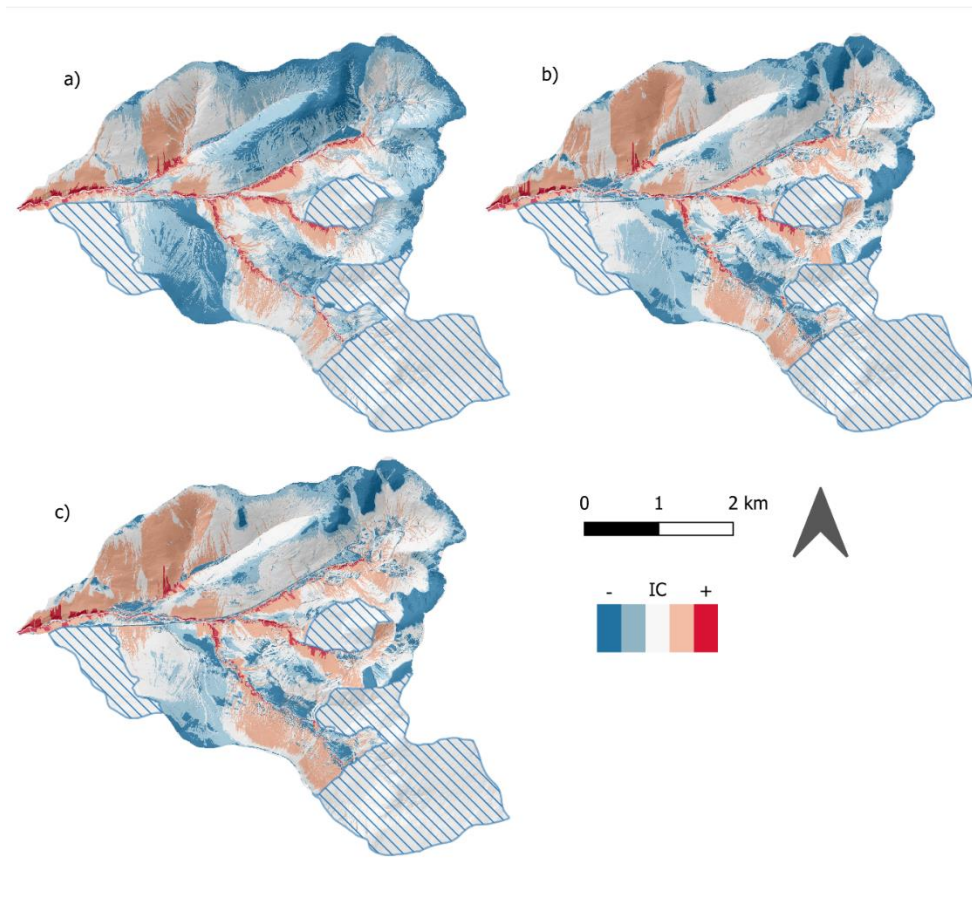
- Wohl, E., Kramer, N., Ruiz-Villanueva, V., Scott, D. N., Comiti, F., Gurnell, A. M., Piegay, H., Lininger, K. B., Jaeger, K. L., Walters, D. M., & Fausch, K. D. (2019b). The Natural Wood Regime in Rivers. *BioScience*, 69(4), 259–273. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz013>
- Wohl, E., Lininger, K. B., & Scott, D. N. (2018). River beads as a conceptual framework for building carbon storage and resilience to extreme climate events into river management. *Biogeochemistry*, 141(3), 365–383. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0397-7>
- Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1960). Magnitude and Frequency of Forces in Geomorphic Processes. *The Journal of Geology*, 68(1), 54–74. <https://doi.org/10.1086/626637>
- Wood, P. J., & Armitage, P. D. (1997). Biological Effects of Fine Sediment in the Lotic Environment. *Environmental Management*, 21(2), 203–217. <https://doi.org/10.1007/s002679900019>
- Zanandrea, F., Michel, G. P., & Kobiyama, M. (2020). Impedance influence on the index of sediment connectivity in a forested mountainous catchment. *Geomorphology*, 351, 106962. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106962>
- Zhang, W., & Montgomery, D. R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, 30(4), 1019–1028. <https://doi.org/10.1029/93WR03553>

ANNEXES

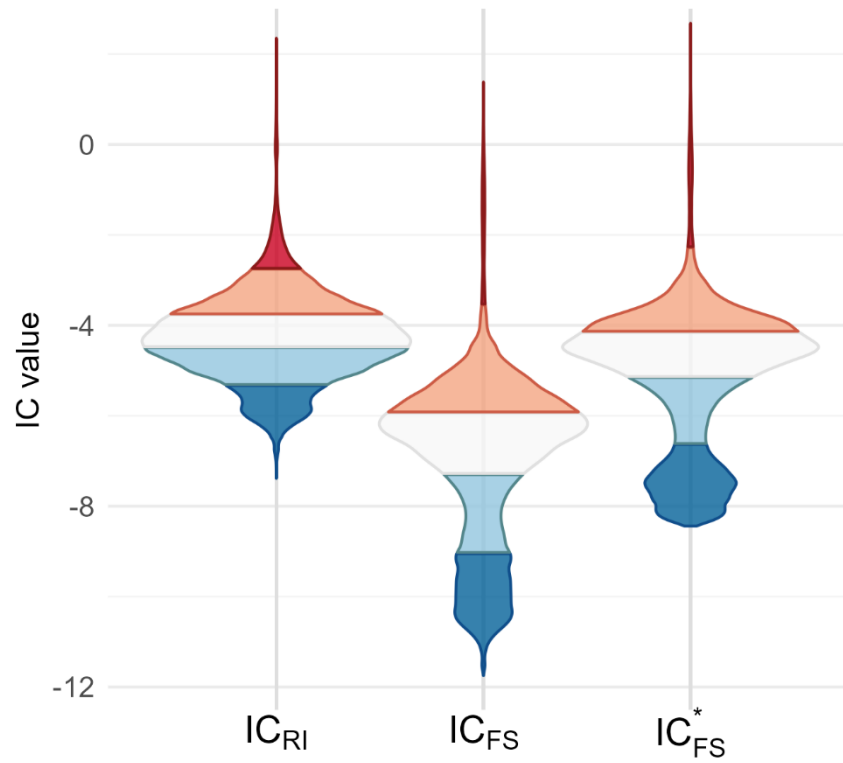
ANNEXE I – SURFACE DEPOSIT MAPS FOR A) COULÉE À LAYOUTE AND B) PORTES DE L'ENFER



ANNEXE II – MAPPING OF IC VALUES IN PDE FOR THREE METHODS: A) IC_{RI} , B) IC_{FS} AND C) IC_{FS}^* . EACH RASTER HAS ITS OWN COLOR SCALE ACCORDING TO JENKS NATURAL BREAKS



ANNEXE III – DISTRIBUTIONS OF VALUES FOR THREE METHODS OF IC COMPUTATION IN PDE WITH COLOR MAPPED ACCORDING TO JENKS NATURAL BREAKS CLASSIFICATION.



ANNEXE IV – COMPARISON OF IC^*_{FS} FOR RESOLUTIONS OF 1, 3 AND 5M.

