

**ANALYSE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE
DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE BULSTRODE**

Rapport final



Rapport présenté à l'Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet (COPERNIC)



Pascale Biron, William Massey et Nicolas Stämpfli
Laboratoire de gestion des rivières de l'Université Concordia



Janvier 2020

Analyses et rédaction :

William Massey, M.Sc.
Professionnel de recherche

Nicolas Stämpfli

Candidat au doctorat (Geography, Urban and Environmental Studies)

Supervision et rédaction:

Pascale Biron, Ph.D
Professeure titulaire

Laboratoire de gestion des rivières

Département de géographie, urbanisme et environnement

Université Concordia

Financement :

Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet (COPERNIC)

TABLE DES MATIÈRES

1	Hydrogéomorphologie et concept d'espace de liberté	1
2	Le cas de la rivière Bulstrode : contexte et études antérieures.....	1
3	Hypothèses de départ.....	3
4	Objectifs du projet et portée du mandat	4
5	Méthodologie	5
5.1	Analyse des débits.....	5
5.2	Outils hydrogéomorphologiques SIG	7
5.2.1	Génération du MNE	7
5.2.2	Utilisation des outils hydrogéomorphologiques SIG	7
5.3	Cartographie de l'espace de liberté.....	8
5.3.1	Approche générale	8
5.3.2	Détermination de l'espace M_{plaine}	10
5.3.3	Détermination de l'espace M_{50}	13
5.3.4	Détermination de l'espace d'inondabilité	19
6	Résultats.....	20
6.1	Pente et puissance spécifique	20
6.2	Cartographie de l'espace de liberté et identification des zones dynamiques et stables	26
6.3	Investigation de l'impact des modifications anthropiques sur la dynamique sédimentaire de la rivière Bulstrode	29
6.3.1	Pertes et déstabilisation des bancs d'accumulation et des berges	29
6.3.2	Linéarisation des cours d'eau	30
6.3.3	Stabilisation des berges (enrochements)	31
6.3.4	Contribution potentielle des routes non pavées.....	32
7	Discussion	34
7.1	Évaluation des résultats en lien avec les problèmes de sédimentation dans le réservoir Beaudet.....	34
7.2	Analyse des résultats à la lumière des études antérieures réalisées dans le bassin versant de la rivière Bulstrode	36
8	Conclusion et recommandations	38
	Références	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Étendue et topographie du bassin versant de la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet. Les chiffres indiquent les points kilométriques (PK) en amont du réservoir Beaudet... 3	
Figure 2 Données de débit journaliers (ligne bleue) et débit annuel maximum (losanges noirs) pour la station de jaugeage 030106 (rivière Bulstrode en aval du réservoir Beaudet) – 1975-2019. La ligne pointillée indique la tendance pour les débits annuels maximum 6	
Figure 3 : Exemple de cartes produites : A) aléas fluviaux; B) espace de liberté..... 9	
Figure 4 : Tronçons homogènes délimités sur les 36 km de la rivière Bulstrode situés immédiatement en amont du réservoir Beaudet.....12	
Figure 5 : Axe principal des méandres et corridor de mobilité (tiré de Parish Geomorphic, 2004)	13
Figure 6 : Position du chenal déterminée à partir de différentes photographies aériennes pour deux sections de la rivière Bulstrode. A) Section dynamique, où l'emplacement du chenal sur les photographies les plus anciennes diverge de manière significative par rapport à son emplacement actuel; B) Section stable, peu de mobilité historique observée.....15	
Figure 7 : Extrapolation de la migration latérale de la rivière Bulstrode sur 50 ans, en fonction des taux d'érosion historiques – PK12-PK13	17
Figure 8 : Exemple de méandre à risque d'avulsion sur la rivière Bulstrode et enrochement effondré avec prise en compte de l'érosion naturelle probable.....19	
Figure 9 : A) Puissance spécifique à l'échelle du bassin versant de la rivière Bulstrode (et de ses tributaires) en amont du réservoir Beaudet; B) Variation de la pente et de la puissance spécifique dans la rivière Bulstrode le long de la section d'étude (PK0-PK36)	21
Figure 10: Puissance spécifique moyenne calculée pour différentes sections du bassin versant de la rivière Bulstrode	22
Figure 11 : Puissance spécifique, profil en long et pente du ruisseau Gobeil	23
Figure 12 : Puissance spécifique, profil en long et pente du ruisseau Michaud	24
Figure 13 Puissance spécifique, profil en long et pente du ruisseau Parent	24
Figure 14 : Puissance spécifique, profil en long et pente du ruisseau Perreault	25
Figure 15 : Profil en long de la rivière Bulstrode dans la zone d'étude	25
Figure 16 : A) Carte intégrale de l'espace de liberté montrant séparément les espaces de mobilité (M_{50} et M_{plaine}) et les espaces d'inondabilité ($F_{élévé}$ et F_{med}); B) Carte simplifiée de l'espace de liberté.....27	
Figure 17 : Zone d'érosion active près du PK31	28
Figure 18 : Secteur très dynamique autour du PK31, avec des changements majeurs dans la position du chenal entre 1950 et 2010, résultant en une zone M_{50} plus large	28
Figure 19 : Espace de liberté A) près du PK31 et B) près du PK35, montrant des secteurs avec infrastructures (habitations ou routes) à risque, puisque situées à l'intérieur de l'espace de liberté minimal (en bleu)	29
Figure 20 : Bancs d'accumulation présents en 1950 autour du PK20, qui ne sont plus présents aujourd'hui à la suite d'une stabilisation des berges et d'une occupation plus intensive de la plaine alluviale.....30	
Figure 21 : A) Traverse à gué et passages de véhicules sur un banc d'accumulation (x rouges) dans un secteur dynamique près de PK11 (pratiques non recommandées); B) Traverse à gué dans un secteur stable près du PK8 (plus adéquat qu'en A)	30
Figure 22 : Linéarisation du tracé Parent et traces d'anciens bras de méandres près du PK12 31	
Figure 23 : Risque accru d'érosion en aval d'un secteur enroché près du PK35	32
Figure 24 : A) Réseau de routes non pavées dans le bassin de la rivière Bulstrode; B) Exemple de route forestière et de fossé près du PK29	33
Figure 25 : Exemples de routes non pavées dans le secteur appalachien du bassin versant de la rivière Bulstrode	34

Figure 26 : Accumulation de sédiments en amont du barrage de Sainte-Sophie.....36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Critères pour le découpage en tronçons homogènes	10
Tableau 2 : Photographies aériennes utilisées	14

1 HYDROGÉOMORPHOLOGIE ET CONCEPT D'ESPACE DE LIBERTÉ

Le concept d'espace de liberté des cours d'eau au Québec est basé sur la science de l'hydrogéomorphologie, qui étudie la dynamique naturelle des rivières. C'est un concept développé par Biron et al. (2013a; 2014) qui le définissent comme suit :

« L'espace de liberté des cours d'eau est un cadre de gestion intégrée qui se base sur l'hydrogéomorphologie des rivières. [...] L'espace de liberté vise à identifier les espaces d'inondabilité et de mobilité du cours d'eau et à le laisser évoluer dans ces espaces plutôt que de le contraindre à évoluer dans un corridor fluvial façonné par les interventions anthropiques. »

Bien que le terme « Espace de liberté » ait originellement été employé par Piégay et al. (2005) pour désigner l'espace de mobilité des rivières, c'est-à-dire la portion du territoire à l'intérieur duquel le chenal de la rivière peut potentiellement se déplacer, ce terme est utilisé au Québec pour désigner non seulement l'espace de mobilité, mais également l'espace d'inondabilité (portion du territoire potentiellement inondé par les crues de la rivière), ainsi que les milieux humides riverains.

2 LE CAS DE LA RIVIÈRE BULSTRODE : CONTEXTE ET ÉTUDES ANTÉRIEURES

Le réservoir Beaudet, situé en bordure de Victoriaville, constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable pour cette municipalité. Ce réservoir a été créé en 1977 par un élargissement de la rivière Bulstrode. L'ensablement graduel du réservoir a mené à une réduction significative de sa capacité. Par conséquent, la Ville de Victoriaville souhaite procéder à une restauration du réservoir, qui inclura notamment l'excavation de sédiments déposés au fond du réservoir.

De nombreuses études ont été menées au fil du temps afin de mieux comprendre la source et la dynamique des sédiments de la rivière Bulstrode. En 2012, un portrait global du bassin versant de la rivière Bulstrode a été réalisé par la firme Poly-Géo Inc. (Duhamel et Bariteau, 2012a,b). Cette étude a conclu que les flux sédimentaires en provenance du secteur amont du bassin versant étaient limités, et que la majeure partie de la charge sédimentaire transportée jusqu'au réservoir Beaudet serait générée dans le segment central de la rivière Bulstrode, soit entre le barrage de Sainte-Sophie et la route 116 (entre les points kilométriques (PK) 27 et 10). Ce segment est caractérisé (surtout à partir du PK 21) par des méandres et par la présence de sédiments sableux et silteux dans les rives et le lit de la rivière. Le volume approximatif de sédiments relié au recul des berges dans ce segment serait de l'ordre de 7000 m³/an. Par ailleurs, il est précisé dans cette étude que les phénomènes d'érosion et de migration observés dans la rivière Bulstrode ne sont vraisemblablement pas récents, mais que certaines interventions anthropiques auraient pu en affecter la progression.

En 2017, une étude de traçage de sédiments de l'Université Laval distinguait quatre catégories de sources de sédiments, soit les sols agricoles, les sols forestiers, et les horizons supérieur et inférieur des berges de la rivière (Lachance, 2017). Selon cette étude, le tronçon le plus actif de la rivière Bulstrode (soit celui où la contribution des berges était la plus importante) était situé

entre le barrage de Princeville et le réservoir Beaudet, ce qui représente un tronçon d'un peu moins de 20 km de longueur. Il est toutefois à noter que l'étude n'incluait pas de site d'échantillonnage entre les extrémités amont et aval de ce tronçon. Par ailleurs, alors que l'étude concluait que les barrages de Sainte-Sophie et de Princeville avaient principalement un impact sur la fraction grossière des matières en suspension et sur la charge de fond, une diminution de la taille des sédiments en suspension et autres sols et sédiments échantillonnés a été observée de l'amont vers l'aval du bassin versant.

En 2018, le taux d'ensablement moyen du réservoir Beaudet depuis 1979 a été estimé à environ 16 000 m³/an, ou environ 1 %/an par la firme Les Services EXP inc. (EXP, 2019). Il est à noter que la valeur pour l'estimation de HBA Environnement (2004) pour ce taux d'ensablement passe du simple au double entre le rapport de HBA Environnement de 2004, pour la période allant de 1994 à 2003, et celui de EXP (2019).

Toutefois, une étude hydrogéomorphologique plus globale du bassin versant en amont du réservoir Beaudet n'a pas été effectuée à ce jour. Cette analyse permettrait de mieux mesurer les impacts des interventions humaines antérieures dans ce secteur, notamment avec la construction du barrage du réservoir Beaudet en 1977, mais aussi possiblement de modifications anthropiques du tracé de la rivière (e.g. linéarisation) ou de stabilisation de berges. Les données LiDAR sur l'ensemble du bassin versant permettent aussi de bien caractériser la rivière Bulstrode à l'aide d'outils SIG (Systèmes d'Information Géographique) développés au laboratoire de gestion des rivières de l'Université Concordia (Biron et al., 2013b).

Afin de développer un plan de restauration intégré qui permettra de minimiser les besoins d'entretien du réservoir dans le futur et en appui à la Ville de Victoriaville, l'Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet (COPERNIC) a donc mandaté l'Université Concordia pour dresser un portrait hydrogéomorphologique à l'échelle du bassin versant de la rivière Bulstrode, en vue d'identifier des pratiques à mettre en place pour diminuer l'apport de sédiments au réservoir Beaudet. La figure 1 situe le tronçon d'étude.

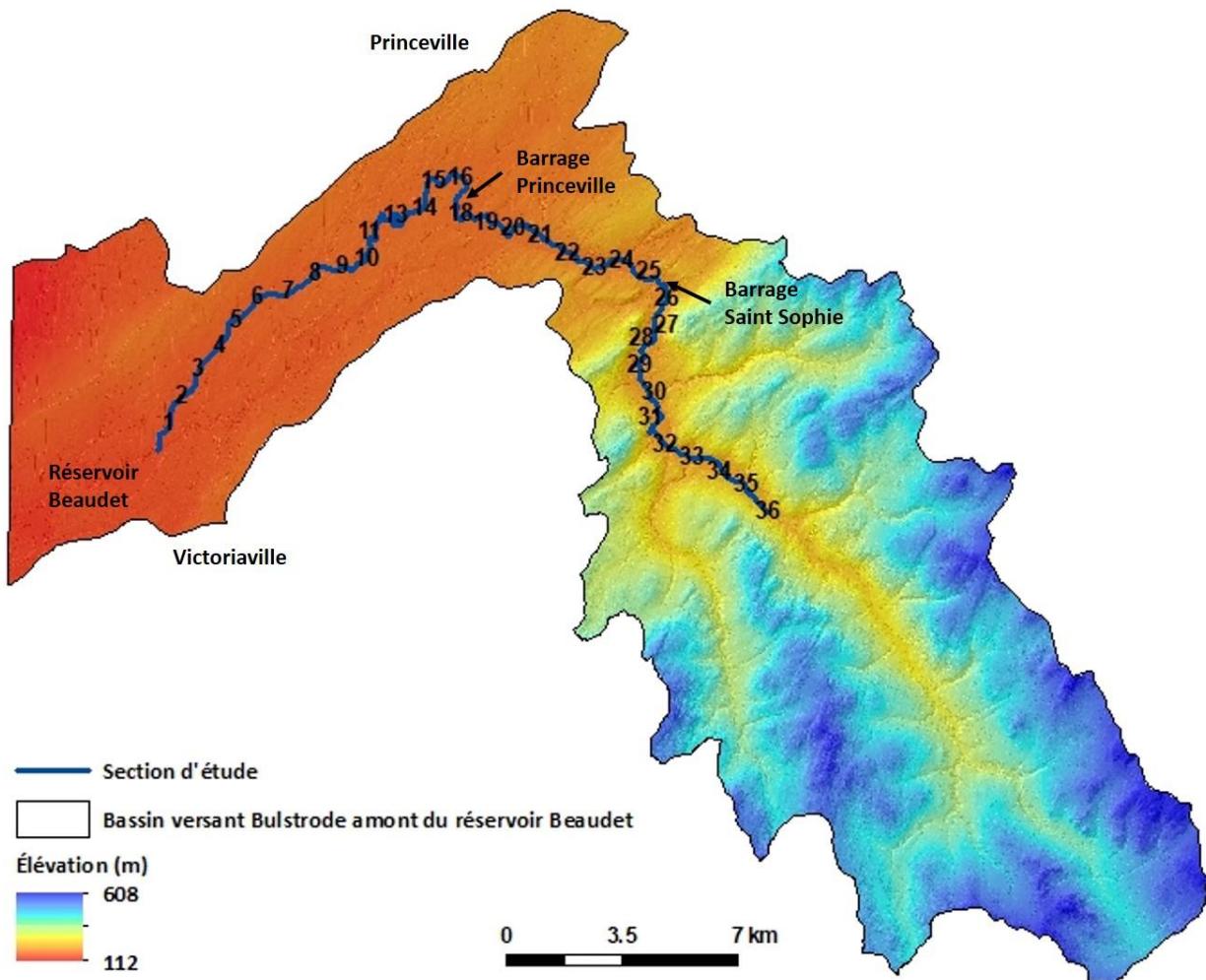


Figure 1 : Étendue et topographie du bassin versant de la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet. Les chiffres indiquent les points kilométriques (PK) en amont du réservoir Beaudet.

3 HYPOTHÈSES DE DÉPART

Les deux hypothèses de départ identifiées par COPERNIC étaient les suivantes :

- 1) une gestion de l'eau concertée et intégrée par bassin versant est plus viable économiquement à long terme (en prenant en compte les changements climatiques) que le recours exclusif à des mesures palliatives temporaires comme le dragage;
- 2) réussir à réduire le niveau de plusieurs occurrences de débits de pointe permet une meilleure adaptation aux changements climatiques en réduisant l'érosion, la sédimentation et les impacts des inondations.

4 OBJECTIFS DU PROJET ET PORTÉE DU MANDAT

L'objectif principal de la présente proposition consiste à mieux documenter les causes des flux sédimentaires élevés dans la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet par une analyse hydrogéomorphologique à l'échelle du bassin versant. Cette étude vise aussi à analyser de façon plus détaillée les tronçons de la rivière Bulstrode jusqu'à 36 km en amont du réservoir puisque ces secteurs ont déjà été identifiés comme étant problématiques (Duhamel et Bariteau, 2012a,b). Les zones à étudier incluaient notamment le secteur des PK 31-32, où une érosion significative avait été observée en bordure d'un champ agricole; le PK 34, où la présence de bancs d'accumulation avait été rapportée à l'embouchure du ruisseau Gobeil dans la rivière Bulstrode; et le PK 36, où le ministère des Transports du Québec (MTQ) avait réalisé un enrochement qui aurait eu un impact sur la dynamique de la rivière en aval de celui-ci.

Les deux objectifs généraux de cette étude étaient les suivants :

1. caractériser la dynamique sédimentaire dans le bassin versant de la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet;
2. Identifier des stratégies de gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant permettant de diminuer la sédimentation dans le réservoir Beaudet.

Les objectifs spécifiques de cette étude étaient les suivants :

1. analyser la variation longitudinale des variables clés de la dynamique fluviale de la rivière Bulstrode (pente, puissance spécifique) à l'aide d'outils SIG développés pour les données LiDAR par le laboratoire de gestion des rivières de l'Université Concordia;
2. cartographier l'espace de mobilité de la partie proximale de la rivière Bulstrode (36 km en amont du réservoir Beaudet) à l'aide d'une analyse des photographies aériennes historiques ainsi que de visites sur le terrain;
3. investiguer l'impact des modifications anthropiques passées sur la dynamique sédimentaire de la rivière Bulstrode.

Le mandat consistait à compléter une analyse hydrogéomorphologique basée sur un modèle numérique d'élévation (MNE) à haute résolution établi à partir de données LiDAR pour la partie de la rivière Bulstrode située en amont du réservoir Beaudet, ainsi qu'une analyse plus détaillée de la mobilité de la rivière pour un tronçon de 36 km dont l'extrémité aval était l'embouchure de la rivière Bulstrode dans le réservoir. La réalisation de ce mandat, répondant aux objectifs spécifiques indiqués ci-haut, incluait les tâches et livrables suivants :

- développement d'une géobase complète pour le bassin versant de la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet, incluant notamment les données LiDAR traitées pour éliminer les ponts et les ponceaux du MNE;
- utilisation des outils SIG développés au laboratoire de gestion des rivières de l'Université Concordia (Biron et al. 2013b) pour déterminer la pente et la puissance spécifique en continu sur la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet;
- cartographie de l'espace de mobilité M_{50} et M_{plaine} (voir Biron et al. 2014) pour le tronçon 36 km situé en amont du réservoir Beaudet, qui incluait les sections de la rivières

préalablement identifiées comme étant les plus dynamiques (Duhamel et Bariteau 2012a,b) et des points d'intérêt spécifiques;

- cartographie semi-automatisée de l'espace de liberté de la rivière Bulstrode en se servant des outils d'analyse SIG à partir des données LiDAR (voir Massé et al., 2020);
- analyse des interventions anthropiques passées sur le bassin de la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet, afin d'évaluer leur impact potentiel sur la dynamique sédimentaire actuelle de la rivière.

5 MÉTHODOLOGIE

5.1 Analyse des débits

Une analyse de la série de données de débit historiques a été réalisée pour la station de jaugeage 030106, située dans la rivière Bulstrode immédiatement en aval du réservoir Beaudet. Cette analyse visait notamment à évaluer si les débits liquides étaient stables dans le temps et de mieux comprendre la relation possible entre l'évolution historique des débits liquides et des charges sédimentaires dans la rivière Bulstrode.

Des données de débits maximaux étaient disponibles pour la période allant d'octobre 1975 au début décembre 2019. En raison du manque de données pour l'année 1975, cette année n'a pas été considérée dans l'analyse. En contrepartie, bien que les données soient manquantes pour certains mois des années 1993, 1999 et 2019, les données disponibles pour ces années ont été utilisées dans l'analyse, compte tenu que ces données couvraient la période de fonte printanière.

Une analyse statistique des données disponibles a été réalisée à partir des débits maximums annuels. Les débits correspondant à diverses périodes de récurrence ont été calculés en supposant une distribution log-Pearson III (USGS, 1982; England et al., 2019).

En examinant les données de débit à la station de jaugeage 030306, on constate qu'il n'y a aucune tendance à une augmentation des débits de pointe depuis 1975 (figure 2). Ce rapport se concentrera donc sur l'hypothèse no 1.

Comme les photographies aériennes consultées indiquent que plusieurs activités de linéarisation de cours d'eau dans le bassin versant ont été réalisées avant les années 1960, il n'est pas exclu que les débits de pointe de certains petits tributaires de la rivière Bulstrode aient été influencés par ces modifications au réseau hydrique. Cette augmentation potentielle des débits de pointe en lien avec la linéarisation de certains cours d'eau serait toutefois survenue à cette époque, soit il y a plus de 50 ans, avant la construction du réservoir Beaudet et avant le début du suivi des débits dans la rivière Bulstrode. Par ailleurs, compte tenu de la position de la station de jaugeage dans le bassin versant du réservoir Beaudet (soit complètement en aval), il est probable que l'impact des modifications hydrologiques apportées dans les tributaires situés plus en amont soit partiellement amorti par la dynamique d'ensemble du bassin versant.

Le tableau 1 présente les résultats de l'analyse statistique des données de débits réalisée pour la station de jaugeage 030106 (sans facteur de pointe). Les débits de crue estimés sont similaires aux valeurs estimées par Idée-eau Environnement (2017). Il est toutefois à noter que la station

de jaugeage est située en aval du barrage Beaudet et que les débits mesurés sont donc influencés par la présence du réservoir et du barrage.

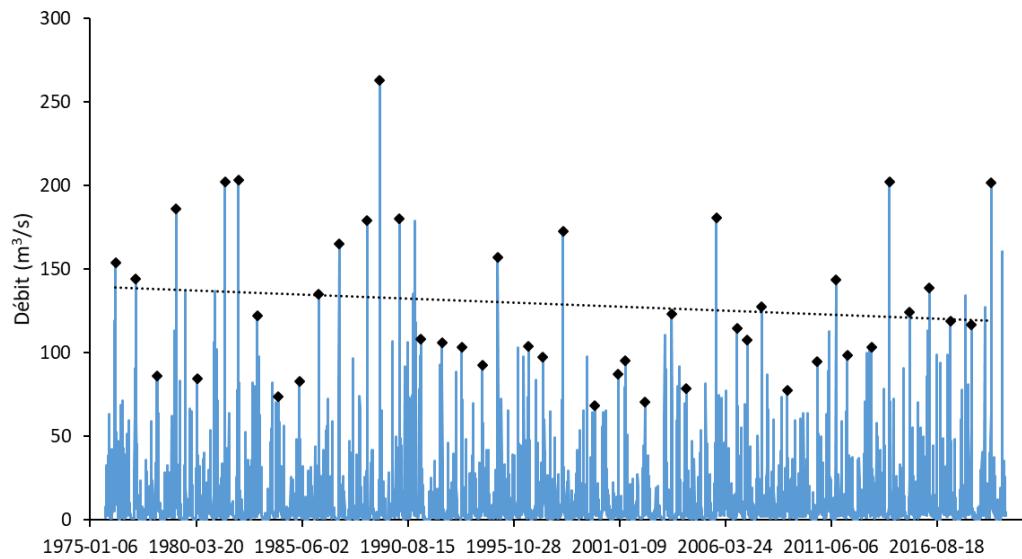


Figure 2 Données de débit journaliers (ligne bleue) et débit annuel maximum (losanges noirs) pour la station de jaugeage 030106 (rivière Bulstrode en aval du réservoir Beaudet) – 1975-2019. La ligne pointillée indique la tendance pour les débits annuels maximum

Tableau 1 : Analyse statistique des débits de crue pour la station de jaugeage 030106 (rivière Bulstrode en aval du réservoir Beaudet) – 1976-2019

Période de récurrence	Débit (m ³ /s)
2	121
5	162
10	190
20	218
25	226
50	255
100	284
200	313

5.2 Outils hydrogéomorphologiques SIG

5.2.1 Génération du MNE

Le MNE généré à partir des données LiDAR avait une résolution de 1 m. Alors que cette résolution est appropriée pour l'utilisation des outils hydrogéomorphologiques à l'échelle du tronçon et pour les petits bassins versants, elle est peu pratique pour l'analyse de grands bassins versants comme celui de la rivière Bulstrode, en raison des temps d'analyse et des besoins importants en termes de mémoire informatique. Par conséquent, la résolution initiale du MNE a été réduite à 5 m en utilisant l'outil « Aggregate » de ArcGIS. L'élévation minimale de chaque groupe de pixels a été utilisée afin de conserver les plus petits cours d'eau présents dans le bassin versant. Cette agrégation des pixels a aussi comme avantage d'éliminer les plus petits ponts dans le MNE. Les plus gros ponts doivent être supprimés manuellement suivant la méthode décrite dans Biron et al. (2013b), de façon à assurer le bon fonctionnement des outils SIG.

Par la suite, les outils ArcGIG « *Fill* », « *Flow direction* » et « *Flow accumulation* » ont été utilisés pour déterminer le parcours de l'eau dans l'ensemble du bassin versant de la rivière Bulstrode. Afin de limiter le temps de traitement des données, le seuil minimal de superficie contributive utilisé était de 10 km².

5.2.2 Utilisation des outils hydrogéomorphologiques SIG

Les outils hydrogéomorphologiques de SIG développés par Biron et al. (2013b) et Massé et al. (2020) ont été employés sur le MNE d'une résolution de 5 m. Cette partie de l'analyse a été effectuée à l'échelle du bassin versant, et n'était donc pas limitée au tronçon de 36 km en amont du réservoir Beaudet sur la rivière Bulstrode mentionné précédemment. Ces outils permettent notamment d'extraire la pente du cours d'eau (S, m/m) et la puissance spécifique (ω , en W/m²) en tous points le long du chenal à la résolution du pixel:

$$\omega = \rho g Q S / W$$

où ρ est la densité (kg/m³), g l'accélération due à la gravité (m/s²), Q le débit plein bord (référence de 2 ans, m³/s) et W est la largeur (m).

Dans le cadre de l'analyse hydrogéomorphologique, la pente recherchée est celle de la surface de l'eau. Malheureusement, même avec des données LiDAR de haute résolution, des erreurs d'interpolation peuvent fausser l'élévation de certains pixels. Ceci est particulièrement fréquent pour les cours d'eau plus larges ou sinueux, comme certains tronçons de la rivière Bulstrode, où les berges ou la présence de bancs d'accumulation peuvent affecter l'interpolation. Il existe deux méthodes pour éliminer ce type d'erreur. La première est d'utiliser comme données d'élévation la moyenne des données obtenues avec les outils « *Fill* » et « *Breach* », pour éliminer les pics et les creux le long du cours d'eau et de façon à ce que l'élévation baisse systématiquement de l'amont vers l'aval. La seconde méthode, employée dans cette étude, consiste à utiliser une moyenne mobile assez large (200 m dans le cadre de ce projet) pour déterminer l'élévation en un point en éliminant l'effet des variations locales.

La largeur de plein bord est déterminée à partir de données binaires raster de l'étendue du cours d'eau. Des polygones de Thiessen sont utilisés pour calculer la largeur moyenne à intervalles réguliers (50 m dans le cadre de ce projet). Des interpolations linéaires sont réalisées pour obtenir

une donnée de largeur de plein bord pour chaque pixel le long du chemin de parcours de l'eau (*flow accumulation*).

Le débit de plein bord est calculé pour chaque pixel à partir du débit de récurrence 2 ans estimé pour la station de jaugeage 030106, située dans la rivière en aval du réservoir Beaudet. Le débit en chaque point est estimé à partir de cette valeur et de l'équation de géométrie hydraulique suivante, développée à la base par Benyahya et al. (2009) pour le sud du Québec et dont le coefficient alpha a été modifié ici pour correspondre à la valeur de débit 2 ans estimé à la station de jaugeage (1.417 au lieu de 0.81) :

$$Q = 1.417 A^{0.76}$$

où Q est le débit de plein bord pour un point donné (en m^3/s) et A est l'aire drainée à ce point (en km^2).

5.3 Cartographie de l'espace de liberté

5.3.1 Approche générale

La méthode de cartographie de l'espace de liberté comporte deux étapes :

1. une évaluation des espaces d'inondabilité et de mobilité. Ce travail, auquel s'ajoute la cartographie des milieux humides, permet de produire une carte des aléas fluviaux;
2. une combinaison des différents éléments de la carte des aléas fluviaux pour produire une carte simplifiée de l'espace de liberté.

La figure 3 illustre les deux cartes résultantes pour une même zone.

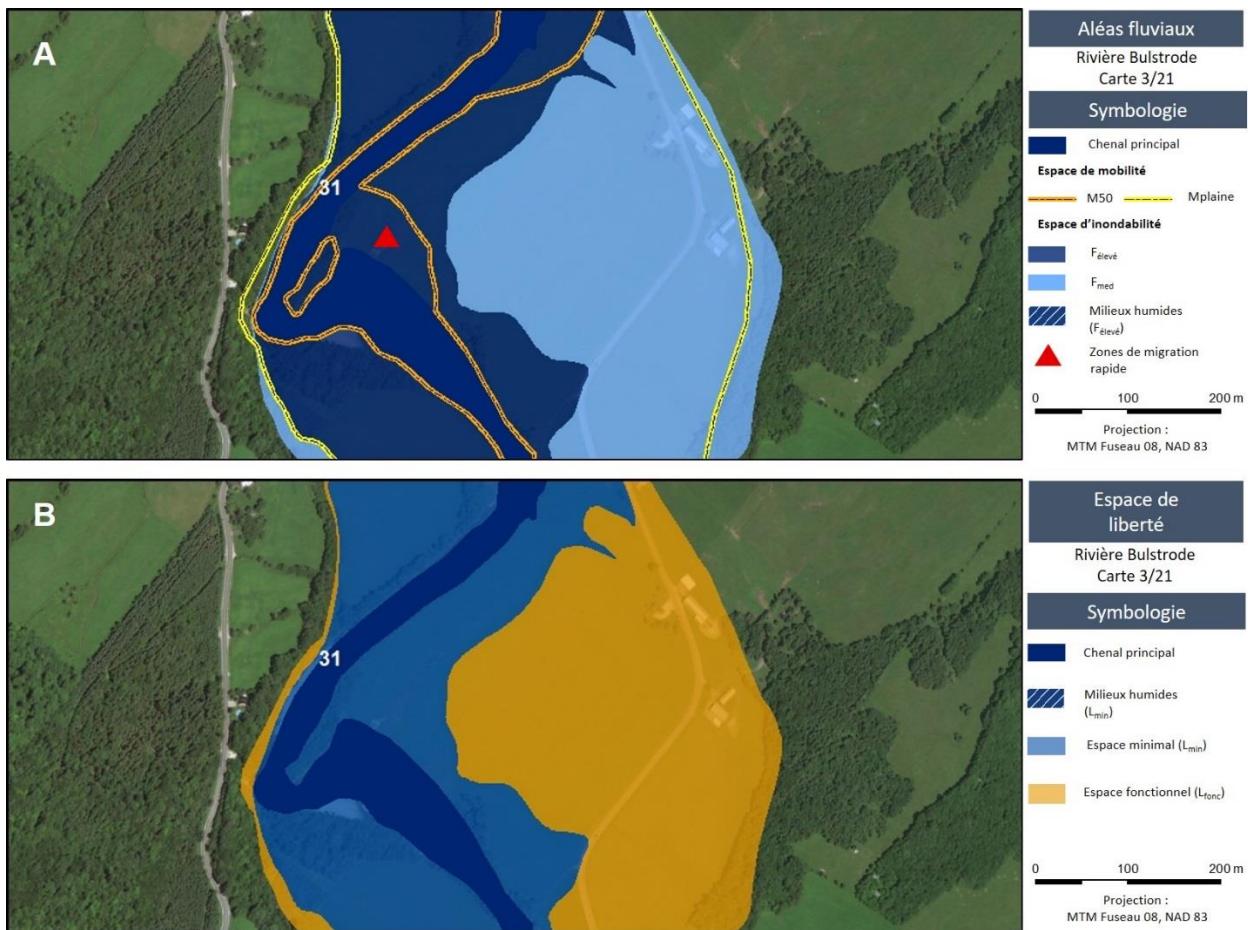


Figure 3 : Exemple de cartes produites : A) aléas fluviaux; B) espace de liberté

Comme présenté à la figure 3, deux niveaux de mobilité sont déterminés et cartographiés :

1. M_{50} : il s'agit de l'espace possiblement occupé par le chenal de la rivière dans les 50 prochaines années. La migration latérale des méandres, par érosion des berges, est le principal processus menant au déplacement du chenal dans le temps. Les risques d'avulsion, c'est-à-dire de changement soudain de position du lit de la rivière, sont également considérés. Il est à noter que la cartographie produite considère l'emplacement probable du chenal de la rivière en l'absence d'intervention humaine. Les ouvrages de stabilisation des berges, existants ou à venir, peuvent modifier cet espace.
2. M_{plaine} : il s'agit de l'espace requis pour la conservation de l'ensemble des processus fluviaux dans la plaine alluviale, où la rivière peut potentiellement migrer à long terme (> 100 ans).

En ce qui concerne l'inondabilité, trois niveaux sont définis :

1. $F_{élévé}$: il s'agit des zones à fort risque d'inondation. Cet espace est parfois associé à la zone de grand courant selon la définition de la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (PPRLPI; RLRQ, c. Q-2, r. 35), ce qui correspond à la zone inondable de récurrence 0-20 ans, mais il est important de noter que la cartographie hydrogéomorphologique n'est pas directement associée à une récurrence de crue. La

correspondance entre les espaces d'inondabilité et les récurrences de crues est fournie ici à titre indicatif et doit être considérée comme très approximative.

2. F_{med} : il s'agit des zones à risque d'inondation modéré. Cet espace est parfois associé à la zone de faible courant de la PPRPLPI, ce qui correspond à la zone inondable de récurrence 20-100 ans, avec encore là des limites liées à l'impossibilité d'associer directement la cartographie hydrogéomorphologique à une récurrence.
3. F_{faible} , ou zone d'inondabilité potentielle : il s'agit des zones pour lesquels le risque d'inondation est faible ou incertain. Ce niveau d'inondabilité n'a pas été cartographié pour la rivière Bulstrode.

Une fois définis, les espaces d'inondabilité et de mobilité et les milieux humides sont fusionnés pour délimiter l'espace de liberté. Cet espace comporte deux niveaux :

1. L_{min} , espace de liberté minimal : Il s'agit de l'espace minimal pour que les processus hydrogéomorphologiques et écologiques puissent opérer. Cet espace est issu de l'union des espaces M_{50} et $F_{élévé}$, auquel s'ajoutent les milieux humides riverains.
2. L_{fonc} , espace de liberté fonctionnel : Il s'agit de l'ensemble de l'espace de liberté dans sa définition généralement acceptée, c'est-à-dire le corridor nécessaire au maintien des processus fluviaux essentiels. Cet espace est issu de l'union des espaces M_{plaine} et F_{med} .

5.3.2 Détermination de l'espace M_{plaine}

La détermination de l'espace M_{plaine} commence par la détermination de tronçons homogènes. Les tronçons homogènes sont des portions de rivières dans lesquelles les conditions d'écoulement sont considérées comme relativement constantes. Les critères listés au tableau 1 ont été utilisés sur la rivière Bulstrode pour déterminer les tronçons homogènes.

Tableau 1 : Critères pour le découpage en tronçons homogènes

Critère pour le découpage en tronçon	Source de données
Variations de pente	LiDAR (Biron et al. 2013b)
Confluence avec les tributaires principaux	LiDAR
Changements de configuration en plan du chenal	Photographies aériennes
Changements dans la taille des sédiments du lit et des berges	Observations de terrain
Changements dans la morphologie du cours d'eau (largeur, vitesse de courant, présence de seuils et mouilles, présence de bancs, incision)	Observations de terrain

Au final, trois tronçons homogènes ont été déterminés dans les 36 km de la rivière Bulstrode situés immédiatement en amont du réservoir Beaudet. Ces tronçons sont présentés à la figure 4.

Le premier tronçon (Tr.H.1) est situé entre le PK0, à l'embouchure de la rivière Bulstrode dans le réservoir Beaudet, et le PK9. Ce tronçon est situé dans les basses terres et le piedmont et est caractérisé par des pentes faibles (la pente moyenne est de 0.19 % pour ce tronçon), une sinuosité faible et des berges constituées de matériaux fins sur la berge gauche (sable/silt) avec des affleurements rocheux sur la berge droite, typiques des cours d'eau présents dans cette

région physiographique. Le tronçon se distingue aussi par la présence de roc, qui agit comme élément de contrôle de la pente, et par la faible quantité de matériaux grossiers (à l'exception de quelques blocs épars), qui limite la formation de structures complexes (seuils/mouilles) sur le lit. Les pentes des berges sont très faibles et la plaine inondable est large en comparaison avec celle des deux autres tronçons.

Le deuxième tronçon homogène (Tr.H.2) est délimité par le PK9 et le PK20. Il est aussi localisé dans la région physiographique des basses terres / piedmont, immédiatement à l'aval du secteur appalachien. La pente moyenne du tronçon Tr.H.2 est de 0.09 %. Cette pente très faible est probablement inférieure à celle du tronçon Tr.H.1 en raison de la sinuosité plus élevée du tronçon Tr.H.2. En effet, plusieurs méandres et bancs d'accumulation sont présents dans ce tronçon, dans lequel les sédiments sont plutôt fins (gravier fin à sable et silt). La plaine inondable du tronçon Tr.H.2 est relativement large malgré des pentes de berges plus élevées que dans le tronçon Tr.H.1. Les berges présentent des signes d'érosion active et aucun indice de contrôle géologique (roc) pouvant limiter la migration du cours d'eau n'a été observé dans ce tronçon.

Le troisième tronçon homogène (Tr.H.3) est situé entre le PK20 et le PK36. Ce tronçon est situé dans le secteur appalachien. Sa pente moyenne (0.33%) est plus élevée que celle des deux autres tronçons, sa sinuosité est moyenne (avec quelques méandres bien formés), les matériaux constituant le lit et les berges de la rivière y sont plus grossiers que dans les tronçons aval (granulométrie entre graviers grossiers et blocs, avec une prédominance de cailloux) et des affleurements de roc ponctuels sont observables sur le lit et les berges de la rivière dans ce secteur. Alors que la plaine inondable est généralement plus étroite dans ce tronçon, notamment en raison de la présence fréquente d'affleurements formant des terrasses non érodables sur une rive ou les deux, le tronçon comporte aussi des secteurs où des processus naturels d'érosion de berge et de formation de bancs d'accumulation peuvent être observés.

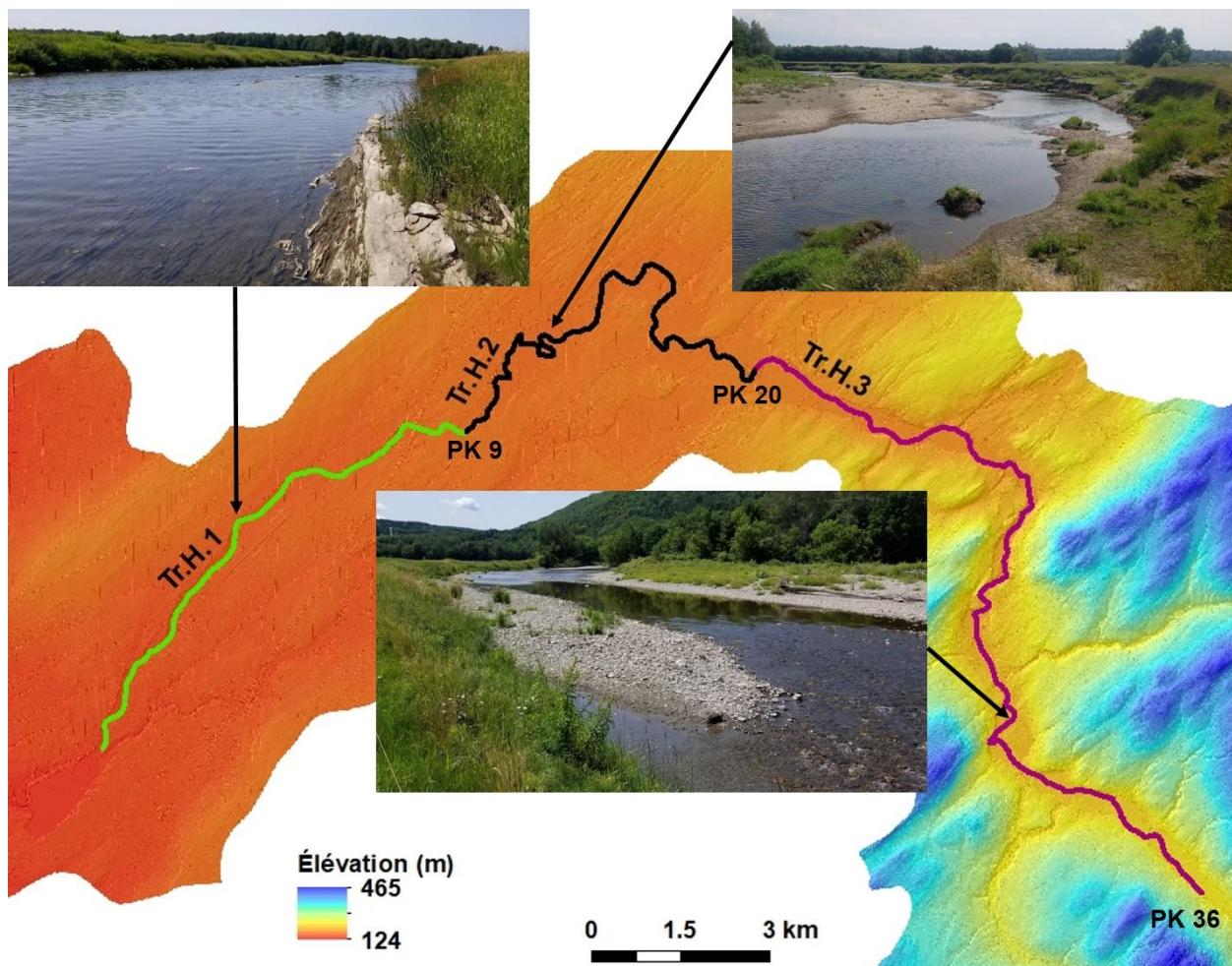


Figure 4 : Tronçons homogènes délimités sur les 36 km de la rivière Bulstrode situés immédiatement en amont du réservoir Beaudet

Une fois les tronçons homogènes établis, l'axe principal des méandres est tracé. Celui-ci suit l'axe de la vallée et passe au milieu des méandres (figure 55). Le corridor de mobilité est ensuite déterminé. Il s'agit d'une bande, centrée sur l'axe principal des méandres, et de largeur suffisante pour englober les boucles de méandres (figure 55) (« *meander belt width* »; Parish Geomorphic, 2004). Cette largeur est déterminée pour chaque tronçon homogène.

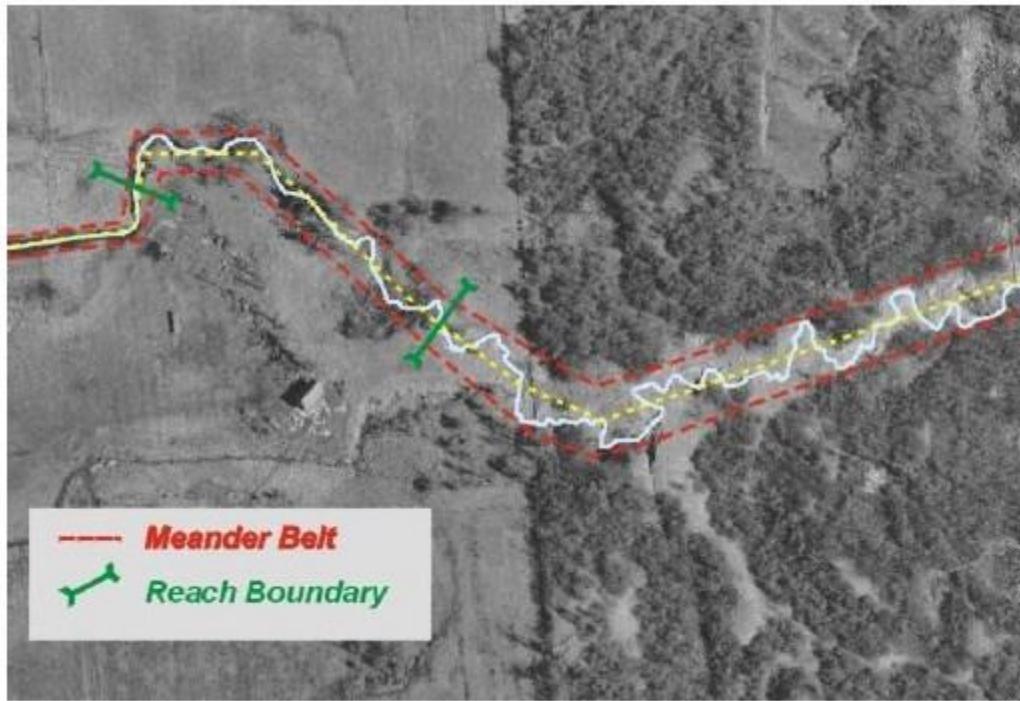


Figure 5 : Axe principal des méandres et corridor de mobilité (tiré de Parish Geomorphic, 2004)

Le corridor de mobilité obtenu ainsi correspond à l'espace à l'intérieur duquel les méandres peuvent théoriquement migrer à long terme. Toutefois, afin de déterminer l'espace de mobilité, il est nécessaire de déterminer si les sédiments présents dans ce corridor de mobilité théorique peuvent être érodés. Les sédiments situés dans la plaine inondable sont toujours considérés comme érodables. Pour ce qui est des dépôts de sédiments plus élevés que la plaine inondable, des observations de terrain et l'étude des données LiDAR permettent de déterminer s'ils peuvent être érodés. Les dépôts non érodables sont retranchés du corridor de mobilité pour obtenir le résultat final, l'espace de mobilité M_{plaine} .

Il est à noter que ce qui est évalué ici est le confinement naturel de la rivière, et non le confinement résultant d'enrochements et/ou d'infrastructures anthropiques comme des talus de route. Le processus cherche en effet à évaluer la zone de mobilité naturelle de la rivière en dehors des interventions humaines. Dans les faits, les contraintes anthropiques peuvent venir réduire l'espace de mobilité des cours d'eau.

5.3.3 Détermination de l'espace M_{50}

L'espace M_{50} comprend les éléments suivants:

- les zones qui pourraient être érodées sur les 50 prochaines années si les tendances historiques observées perdurent;
- les zones à risque d'avulsion;
- les zones qui seraient probablement érodées en l'absence d'enrochements et autres structures anthropiques limitant l'érosion;

- les zones à fort dynamisme.

5.3.3.1 *Détermination des zones probables d'érosion sur 50 ans*

Les taux d'érosion des berges sont évalués à partir de photographies aériennes historiques qui doivent être numérisées, géoréférencées, et sur lesquelles la position du chenal est relevée. Dans la section d'étude de la rivière Bulstrode, ce travail a été effectué avec les photographies détaillées au tableau 2.

Tableau 2 : Photographies aériennes utilisées

Année(s)	Échelle d'origine	Source	Support d'origine
1950	1 : 15 860	Cartothèque U. Laval	Papier
1956	1 : 15 860	COPERNIC	Papier
1950	1 : 15 860	Cartothèque U. Laval	Papier
1966	1 : 15 860	Cartothèque U. Laval	Papier
1977-1980	1 : 15 860	Cartothèque U. Laval, MRC de l'Érable et Arthabaska	Papier
1997	1 : 15 860	MRC de l'Érable et Arthabaska	Papier
2010	1 m/pixel	DOQ (Digital Orthophoto Quad), COPERNIC	Numérique
2019	Variable	Google Earth	Numérique

La Figure 6 montre le résultat de ce travail pour deux sections de la rivière Bulstrode.

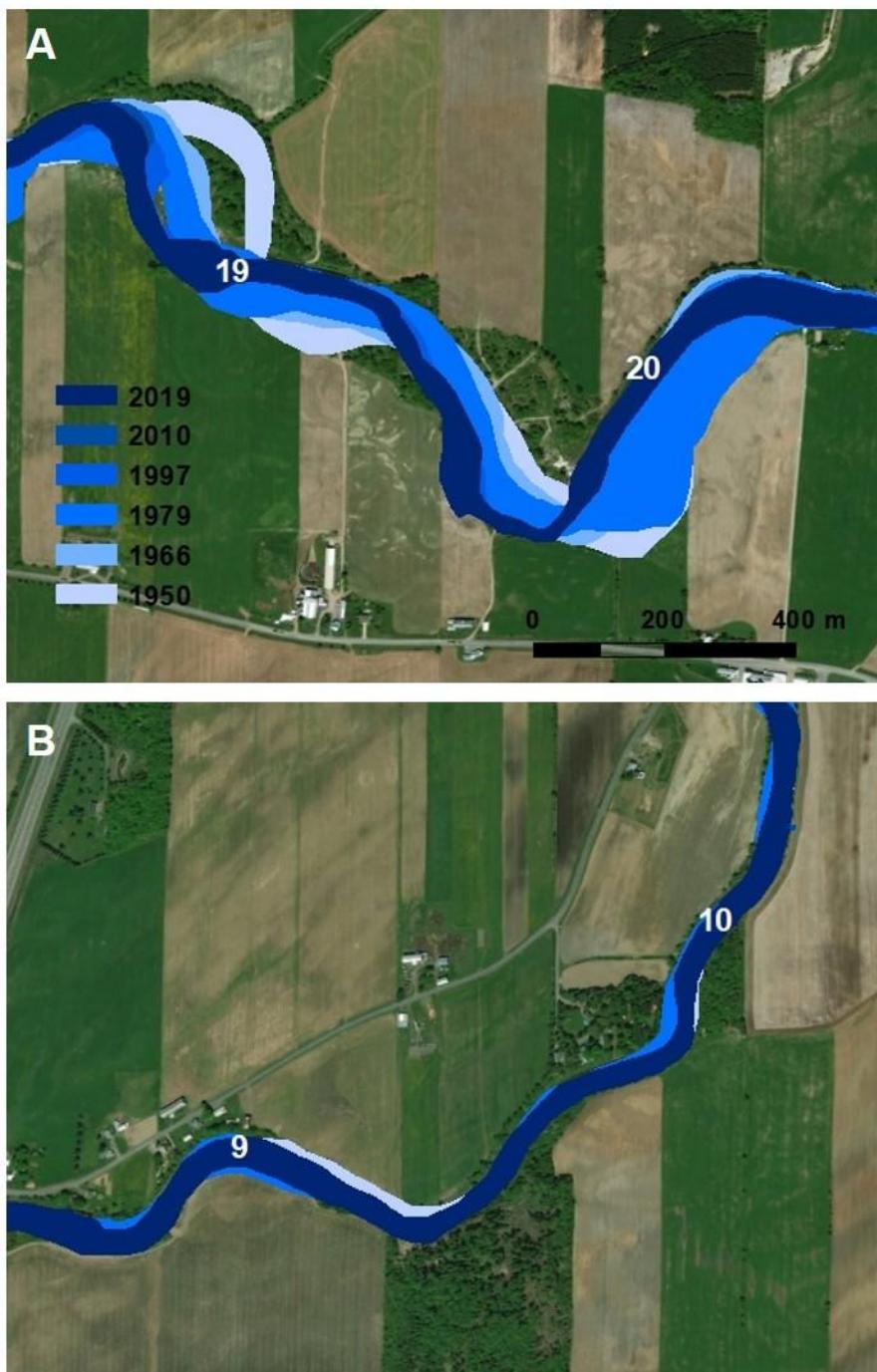


Figure 6 : Position du chenal déterminée à partir de différentes photographies aériennes pour deux sections de la rivière Bulstrode. A) Section dynamique, où l'emplacement du chenal sur les photographies les plus anciennes diverge de manière significative par rapport à son emplacement actuel; B) Section stable, peu de mobilité historique observée

Des transects perpendiculaires aux berges sont tracés à intervalles d'environ 30 m. Des ajustements manuels sont parfois nécessaires dans les zones particulièrement sinueuses pour

s'assurer que les transects ne recoupent la berge qu'une seule fois. Les taux de migration sont établis par interpolation linéaire à partir des positions historiques des berges. Par la suite, ces taux de migration sont utilisés pour extrapoler la position des berges sur 50 ans. Seules les extrapolations pour lesquelles l'érosion suit une progression relativement linéaire ($R^2 > 0,5$), et pour lesquelles au moins 5 m de migration latérale est prévu, sont conservées. Dans le cadre de ce mandat, cet exercice a été réalisé indépendamment pour les deux berges, pour maximiser la précision des estimations dans les cas où les taux de migration n'étaient pas les mêmes pour les deux berges à un point donné. Les résultats ont ensuite été combinés dans un seul fichier. La figure 7 montre un exemple d'extrapolation de la mobilité de la rivière Bulstrode sur 50 ans, autour des PK12 et PK13. Comme le montre la figure, la mobilité prévue résulterait en l'avulsion d'un méandre dans ce secteur.

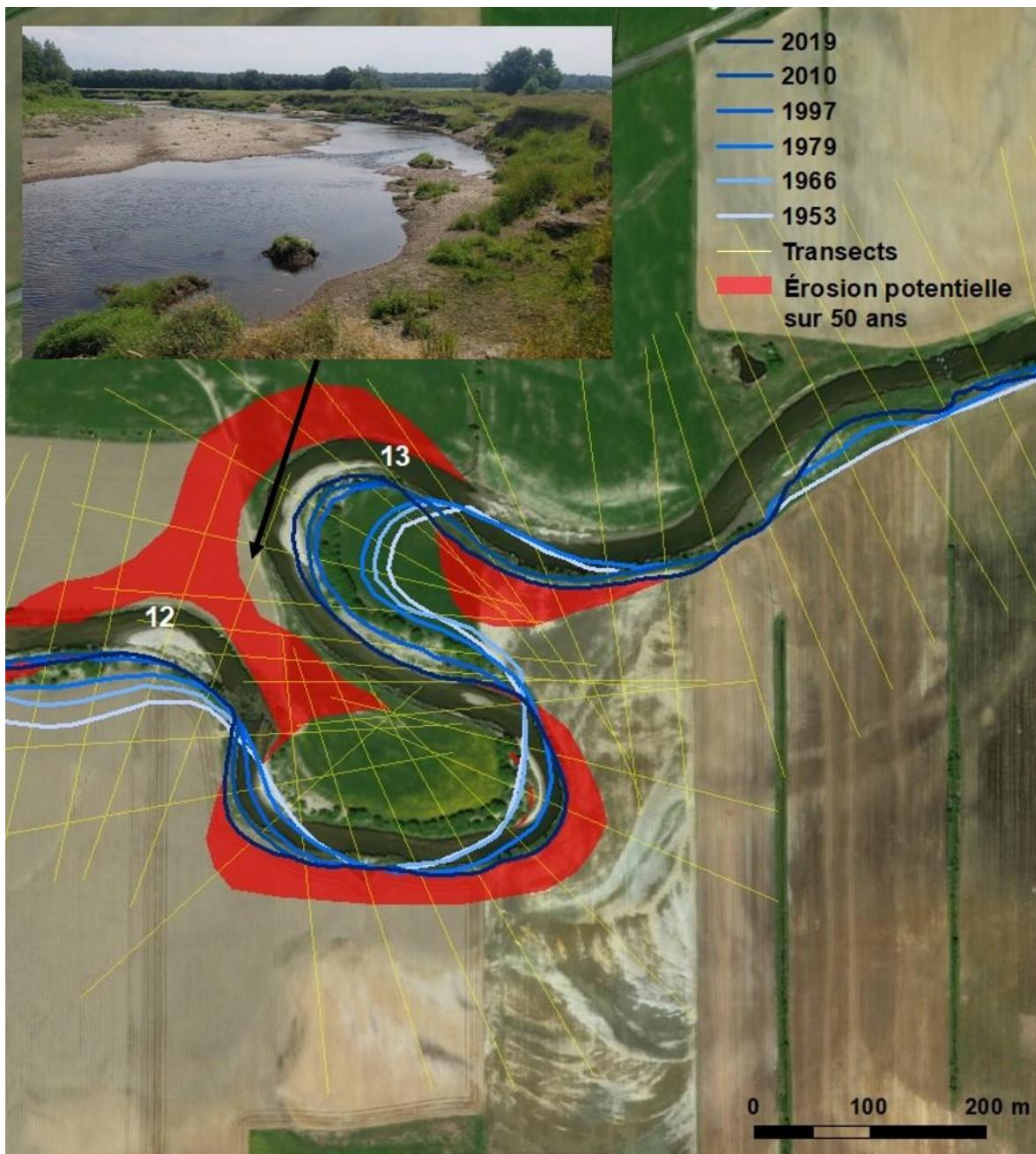


Figure 7 : Extrapolation de la migration latérale de la rivière Bulstrode sur 50 ans, en fonction des taux d'érosion historiques – PK12-PK13

5.3.3.2 Détermination des zones probables d'avulsion

Les zones probables d'avulsion sont déterminées à partir de la position du chenal. Même lorsque les extrapolations réalisées ne prédisent pas l'avulsion complète d'un méandre comme dans la figure 7, le méandre est considéré à risque d'avulsion si la largeur finale de la bande de terre restante à l'intérieur du méandre, après extrapolation de l'érosion sur 50 ans, est inférieure à quatre fois la largeur du chenal (figure 88).

Il est à noter que l'avulsion d'un méandre vient considérablement modifier l'écoulement aux alentours de la section où se produit l'avulsion. Par conséquent, l'érosion des berges évaluée précédemment en serait fortement modifiée. En particulier, une instabilité plus grande est en général observée autour de l'avulsion, alors que l'érosion sur la berge externe du méandre coupée s'arrête.

5.3.3.3 *Évaluation de l'érosion « naturelle » dans les tronçons stabilisés*

Le but de l'exercice de cartographie de l'espace de liberté est d'évaluer les aléas fluviaux naturels, c'est-à-dire en absence d'intervention humaine. L'érosion historique observée peut cependant être inférieure à l'érosion qui aurait eu lieu naturellement en raison d'enrochements limitant. Pour cette raison, les zones d'enrochements ont été répertoriées lors de visites de terrain en juillet 2019. L'hypothèse est ensuite posée que si un enrochement a été installé à cet endroit, il s'agit d'un secteur où une érosion sévère avait lieu. Le 90^e centile des taux d'érosion linéaire mesurés précédemment, pour l'ensemble des mesures faites sur le tronçon homogène, est alors extrapolé linéairement sur 50 ans pour évaluer l'érosion naturelle dans le secteur stabilisé (figure 8).

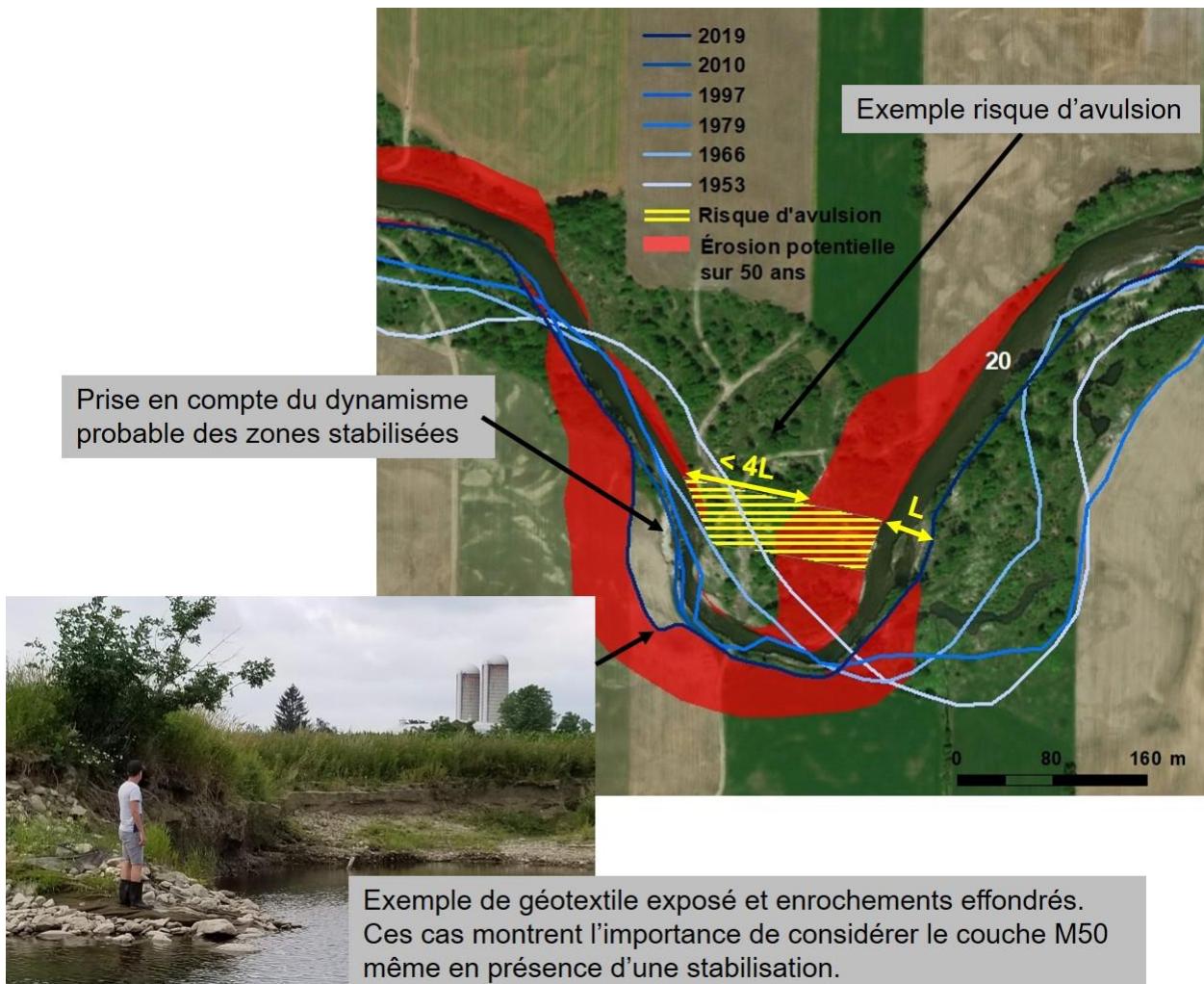


Figure 8 : Exemple de méandre à risque d'avulsion sur la rivière Bulstrode et enrochements effondrés avec prise en compte de l'érosion naturelle probable

5.3.3.4 Identification des zones à fort dynamisme

Cette procédure de la méthodologie de cartographie de l'espace de liberté permet d'identifier les tronçons homogènes pour lesquels le dynamisme de la rivière, et donc l'érosion des berges, est trop intense pour que les techniques décrites précédemment puissent être appliquées. Dans ce cas, l'ensemble de l'espace M_{plaine} est alors considéré comme à risque d'érosion à court terme et est reclassé en M_{50} . L'identification de ces tronçons est effectuée en calculant le taux de renouvellement de l'espace M_{plaine} . Le taux de renouvellement correspond à une mesure du temps nécessaire à la rivière pour éroder l'ensemble de l'espace M_{plaine} . Sur la rivière Bulstrode, aucun tronçon n'a été jugé assez dynamique (taux de renouvellement inférieur à 200 ans) pour être traité de cette manière.

5.3.4 Détermination de l'espace d'inondabilité

Des outils semi-automatisés de cartographie de l'espace d'inondabilité ont récemment été mis au point (Massé et al., 2020) afin d'associer les espaces $F_{élévé}$ et F_{med} à des hauteurs d'eau fixes au-dessus du niveau plein bord. Des hauteurs d'eau de 1 m et 2.5 m sont respectivement utilisées

pour l'évaluation de $F_{\text{élévé}}$ et F_{med} . Comme mentionné précédemment, ces niveaux peuvent être très approximativement associés à des débits de récurrences de 20 et 100 ans, mais l'approche hydrogéomorphologique n'est pas directement liée à des récurrences spécifiques, contrairement à l'approche hydraulique.

Le niveau plein bord est obtenu aux 5 m le long du parcours de l'eau et les différents espaces d'inondabilité sont évalués à partir du MNE, à l'aide des outils SIG développés dans le laboratoire de gestion des rivières de l'Université Concordia. Il est à noter que cette estimation semi-automatisée des espaces d'inondabilité comporte certaines limites. Par exemple, la largeur plein bord est souvent surestimée pour les petits cours d'eau linéarisés (largeur inférieure à 5 m), comme la géométrie de ces cours d'eau a été modifiée par des interventions anthropiques. De plus, l'outil permettant d'établir l'étendue des zones d'inondation a tendance à surestimer les superficies inondées dans les secteurs caractérisés par une transition rapide d'une pente forte à une pente plus faible, comme dans le cas du passage du secteur appalachien au secteur des basses terres, et aux confluences avec des tributaires dont la pente est faible.

Les fichiers SIG pour les milieux humides riverains ont été fourni par Canards illimités. Ceux-ci sont inclus dans l'espace d'inondabilité $F_{\text{élévé}}$.

6 RÉSULTATS

6.1 Pente et puissance spécifique

L'analyse de la variation longitudinale des variables clés de la dynamique fluviale démontre que la puissance spécifique est plus élevée pour les tributaires et les sections de la rivière Bulstrode situés dans la partie appalachienne du bassin versant (figure 9). La puissance spécifique dans la rivière Bulstrode est donc variable (figure 9B) et diminue généralement entre l'amont de la section à l'étude (PK36) et le réservoir Beaudet. Une exception notable est observée au barrage de Sainte-Sophie, où la puissance spécifique calculée est de 350 W/m², ce qui constitue la valeur pour l'ensemble du bassin versant de la rivière Bulstrode, tributaires inclus. La figure 10 présente la puissance spécifique moyenne calculée pour les trois tronçons homogènes de la rivière Bulstrode, ainsi que pour les principaux tributaires de la rivière. Dans le tronçon Tr.H.3, qui inclut le barrage de Sainte-Sophie, la puissance spécifique moyenne excède 35 W/m², un seuil établi à partir des travaux de Brookes (1987) sur des cours d'eau à lit de sédiments sableux et au-delà duquel les cours d'eau sont considérés plus susceptibles d'éroder leurs berges et lit. La puissance spécifique moyenne des ruisseaux Gobeil et Michaud est aussi supérieure à 35 W/m². Les puissances spécifiques élevées calculées pour ces tronçons n'est pas surprenante compte tenu de leurs pentes moyenne et maximale élevées, particulièrement dans les ruisseaux Gobeil (pente moyenne de 2.2 %; pente maximale de 9.3 %; figure 11) et Michaud (pente moyenne de 3.4 %; pente maximale de 7.4 %; figure 12). À l'opposé, un puissance spécifique inférieure à 25-35 W/m² indique généralement une stabilité du lit, voire une tendance à la sédimentation.

Les pentes et les puissances spécifiques des secteurs appalachiens contrastent avec les valeurs plus faibles observées dans les secteurs du bassin versant de la rivière Bulstrode situés dans les basses terres et le piedmont, comme les tronçons Tr.H.1 et Tr.H.2, le ruisseau Parent (figure 13) et le ruisseau Perreault (figure 14). Dans ces secteurs, les pentes moyennes sont plus faibles. Elles sont inférieures à 0.5 % pour les tronçons Tr.H.1 et Tr.H.2 et le ruisseau Parent, tandis que

la pente moyenne du ruisseau Perreault est de 0.9 %, du fait de son emplacement plus en amont dans le piedmont. La puissance spécifique moyenne de ces tronçons est inférieure ou égale au seuil 35 W/m^2 , une valeur moyenne de 35 W/m^2 ayant été calculée pour le tronçon Tr.H.1, situé immédiatement du réservoir Beaudet. Le contraste de pente entre les trois tronçons homogènes est clairement visible sur la figure 15.

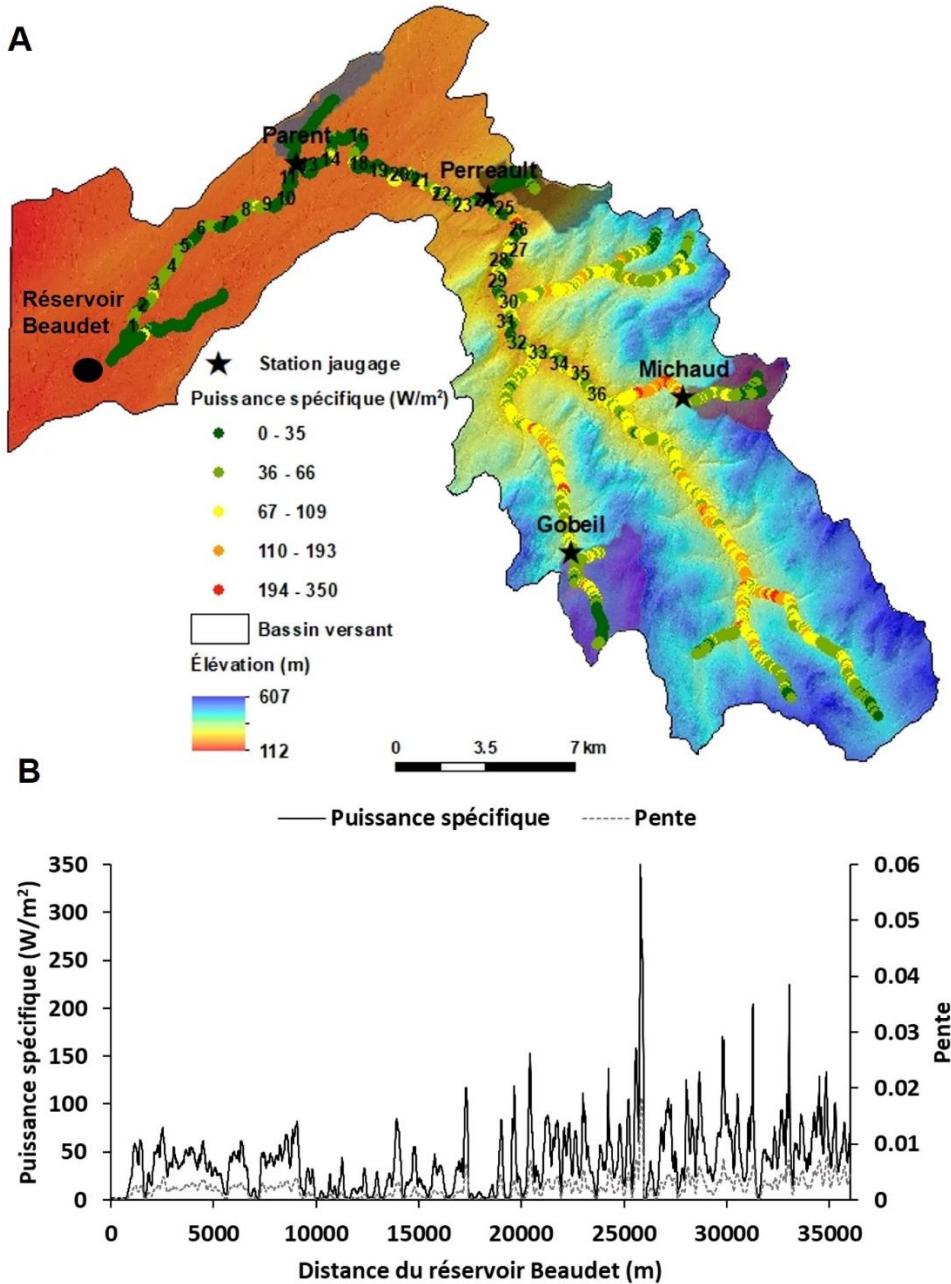


Figure 9 : A) Puissance spécifique à l'échelle du bassin versant de la rivière Bulstrode (et de ses tributaires) en amont du réservoir Beaudet; B) Variation de la pente et de la puissance spécifique dans la rivière Bulstrode le long de la section d'étude (PK0-PK36)

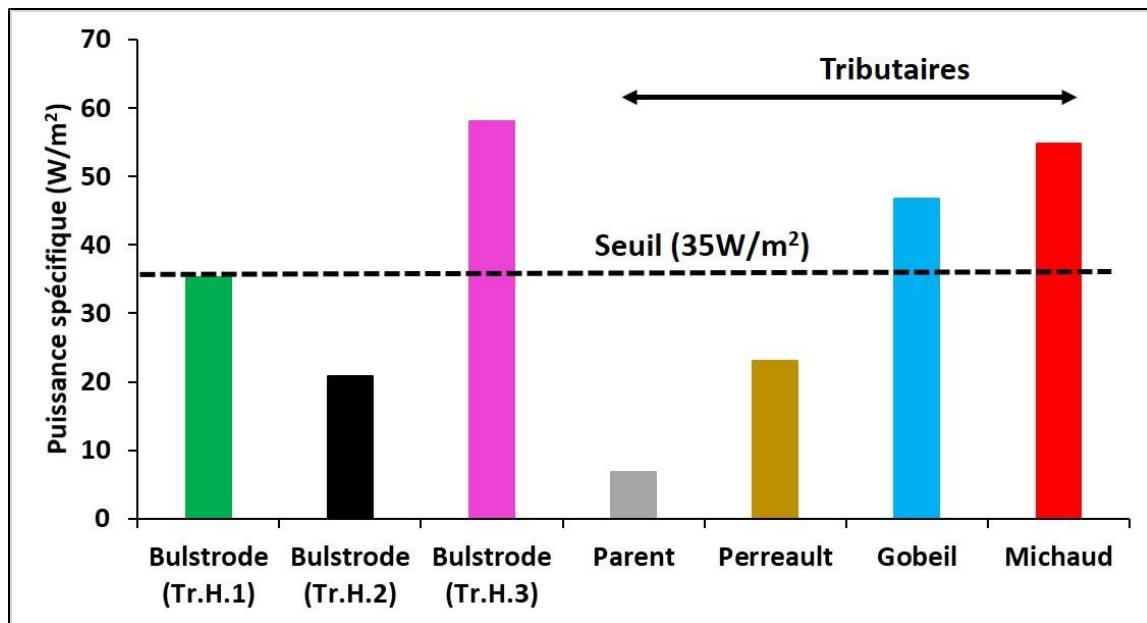


Figure 10: Puissance spécifique moyenne calculée pour différentes sections du bassin versant de la rivière Bulstrode

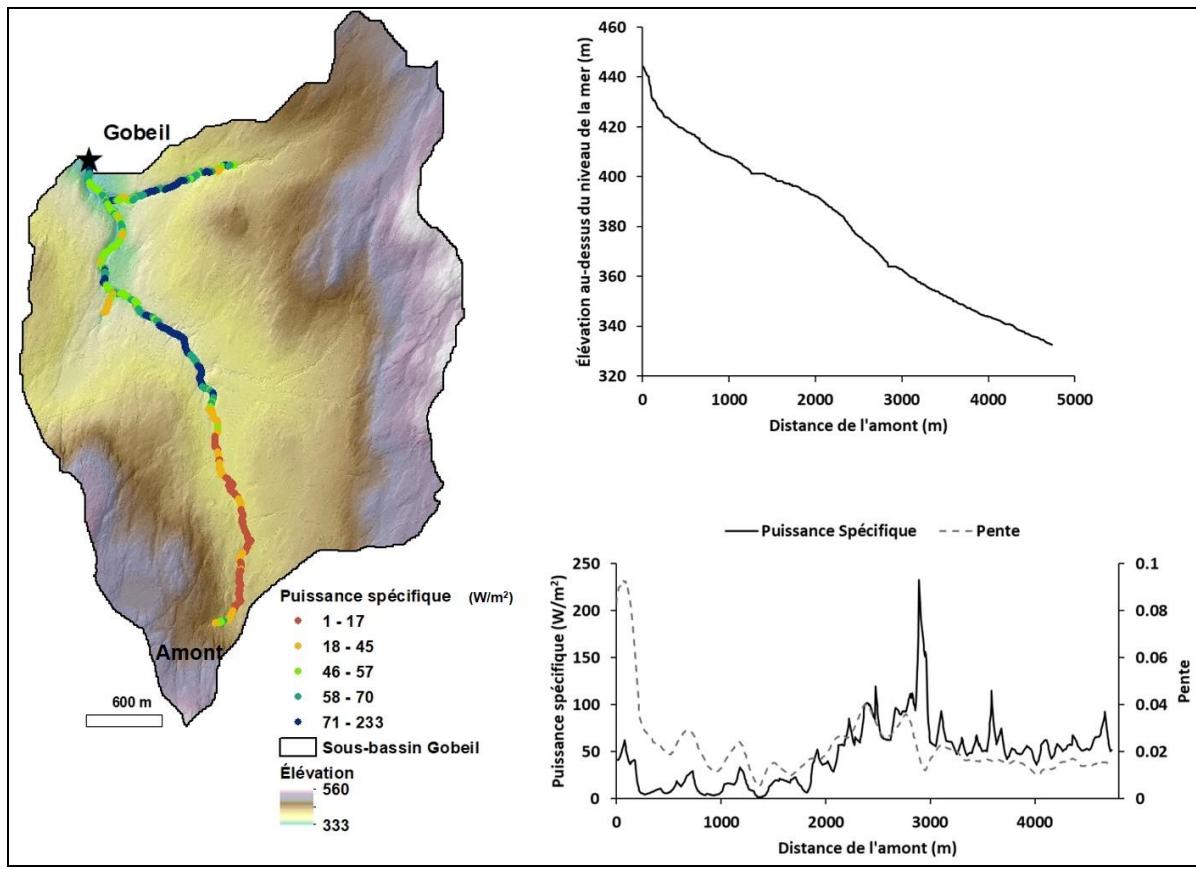


Figure 11 : Puissance spécifique, profil en long et pente du ruisseau Gobeil

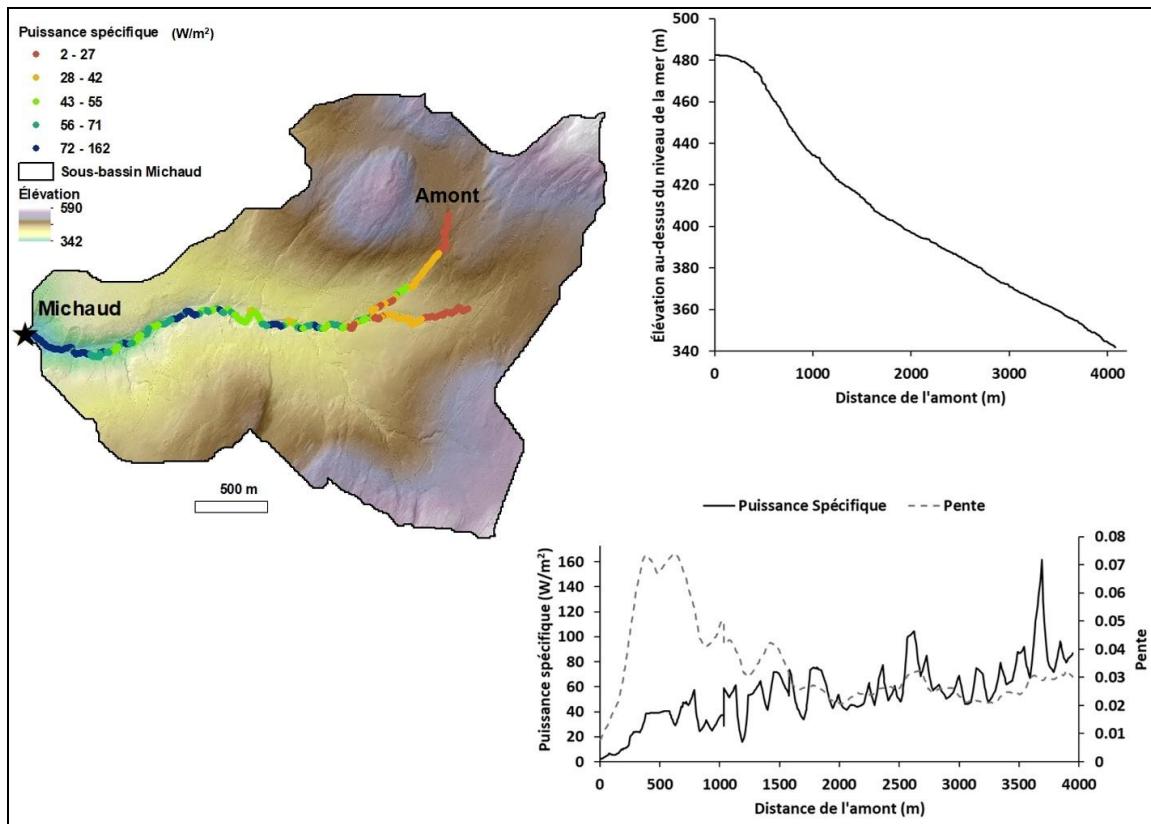


Figure 12 : Puissance spécifique, profil en long et pente du ruisseau Michaud

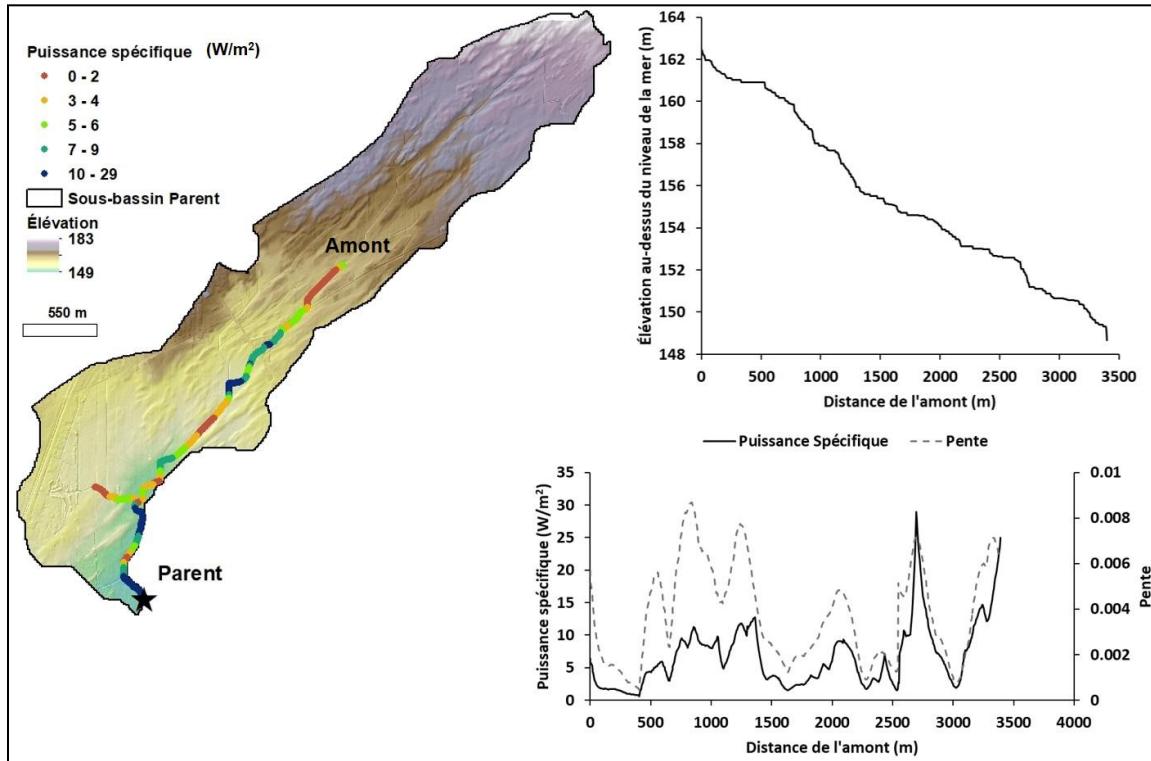


Figure 13 Puissance spécifique, profil en long et pente du ruisseau Parent

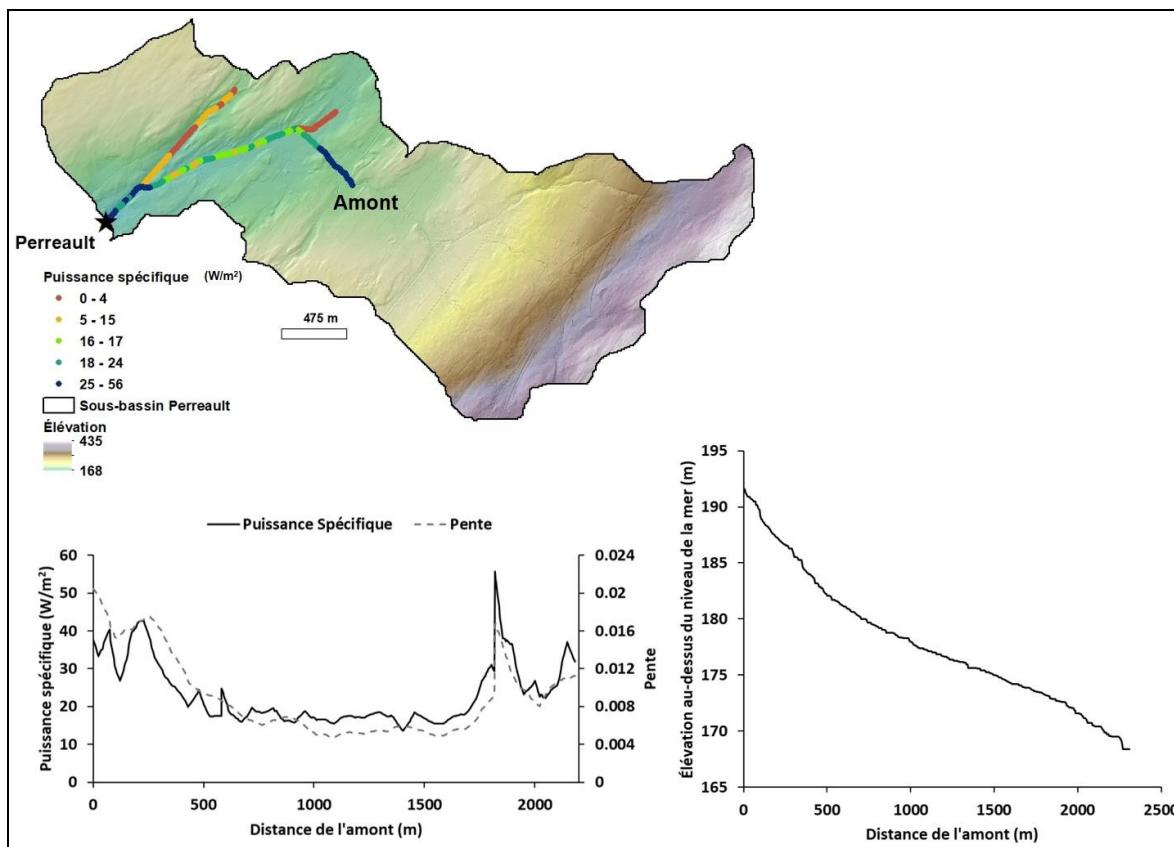


Figure 14 : Puissance spécifique, profil en long et pente du ruisseau Perreault

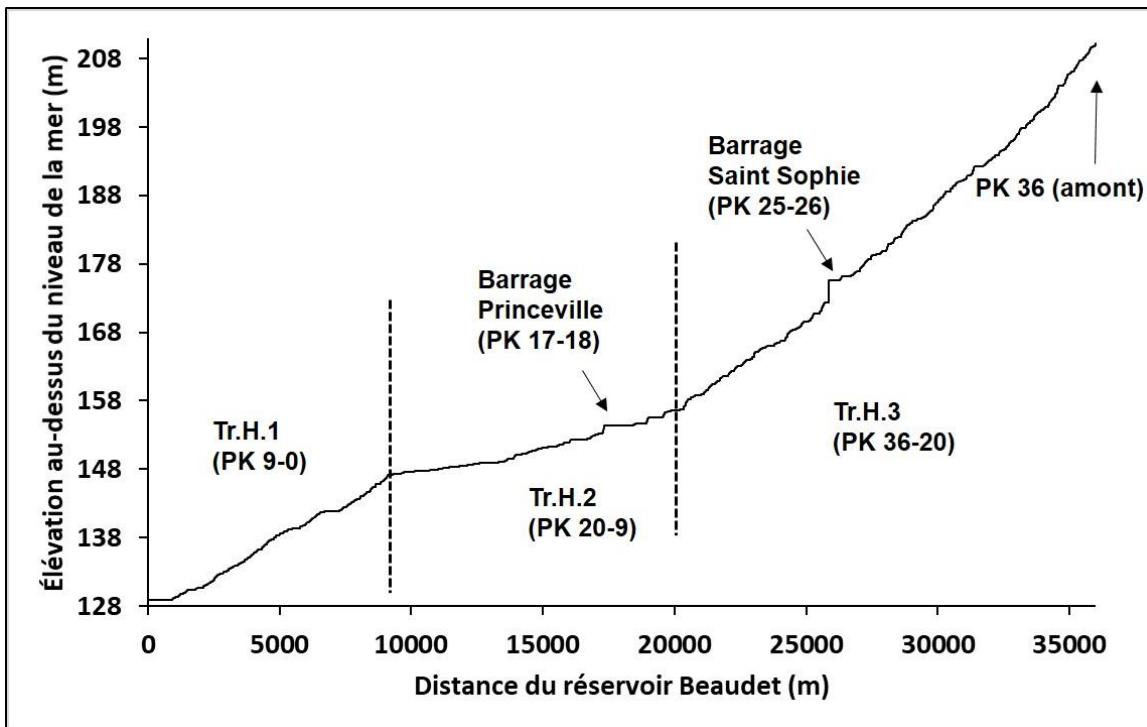


Figure 15 : Profil en long de la rivière Bulstrode dans la zone d'étude

6.2 Cartographie de l'espace de liberté et identification des zones dynamiques et stables

Comme mentionné précédemment, des sections dynamiques ont été observées dans les tronçons Tr.H.2 (basses terres et piedmont) et Tr.H.3 (Appalaches) de la rivière Bulstrode. Ces sections dynamiques sont aussi visibles dans les espaces de mobilité et de liberté délimités pour la zone d'étude. Les figures 16A et 16B fournissent un aperçu global de l'analyse réalisée et des cartes plus détaillées sont fournies en format SIG (shapefiles).

Dans le tronçon Tr.H.3, la mobilité du cours d'eau est très variable. On observe une alternance entre sections stables et sections dynamiques avec migration du cours d'eau, ce qui résulte en une variabilité significative des espaces de mobilité M_{50} et M_{plaine} . Dans ce tronçon semi-alluvial, les affleurements rocheux et les terrasses non érodables limitent l'espace disponible pour des ajustements à la morphologie de la rivière. La présence de terrasses non érodables des deux côtés de la rivière Bulstrode expliquent la stabilité de la portion du tronçon Tr.H.3 situé des deux côtés du barrage de Sainte-Sophie, à proximité de ce dernier (PK24-PK28; barrage situé environ à PK27). En effet, l'analyse des photographies aériennes historiques ne révèle aucun indice de migration dans cette section. À l'inverse, à PK31 et PK35, une migration significative de la rivière est observable en l'absence de contrôle géologique. Au niveau du PK31, par exemple, la berge droite de la rivière s'est déplacée de 139 m entre 1950 et 2019 (figure 17). Dans ces secteurs dynamiques avec de forts taux d'érosion, les risques d'avulsion sont élevés et des avulsions pourraient entraîner de nouvelles zones d'érosion active (figure 18). De façon générale, les infrastructures (habitations, routes) situées à l'intérieur de l'espace de liberté (mobilité?) minimal sont exposées à des risques élevés de dommages par érosion des berges et/ou inondation (Figure 19).

Le tronçon Tr.H.2 est caractérisé par des berges érodables. Ceci se traduit par une migration active de la rivière Bulstrode sur l'ensemble des 11 km du tronçon. Plusieurs méandres à risque d'avulsion sont visibles, particulièrement là où les berges sont constituées de sédiments plus fins et moins résistants à l'érosion. L'analyse des photographies historiques révèle une migration constante de la rivière dans ce tronçon depuis les années 1950, migration qui peut atteindre 100 m par endroits (PK12, PK13, PK19, PK20). Un élargissement de l'espace de mobilité de la rivière Bulstrode est par ailleurs observé en aval de la transition entre le secteur appalachien et les basses terres : à cet endroit, les données LiDAR permettent de déceler des traces d'anciens méandres à des distances considérables (jusqu'à 600 m) de la position actuelle de la rivière. C'est d'ailleurs aussi dans le tronçon Tr.H.2 que l'espace d'inondabilité de la rivière Bulstrode est le plus large.

Les observations réalisées lors des visites de terrain suggéraient que le tronçon Tr.H.1 était plutôt stable. Cette hypothèse est en grande partie confirmée par l'analyse des photographies aériennes historiques, qui montrent une absence de migration significative (migration latérale de plus de 5 m) du tronçon depuis les années 1950. Un léger élargissement de la rivière a été observé dans la partie aval du tronçon en lien avec la construction du réservoir Beaudet. La faible déclivité de la berge gauche de la rivière et la présence de nombreux milieux humides riverains pourraient expliquer la largeur plus importante de l'espace d'inondabilité entre PK6 et PK8.

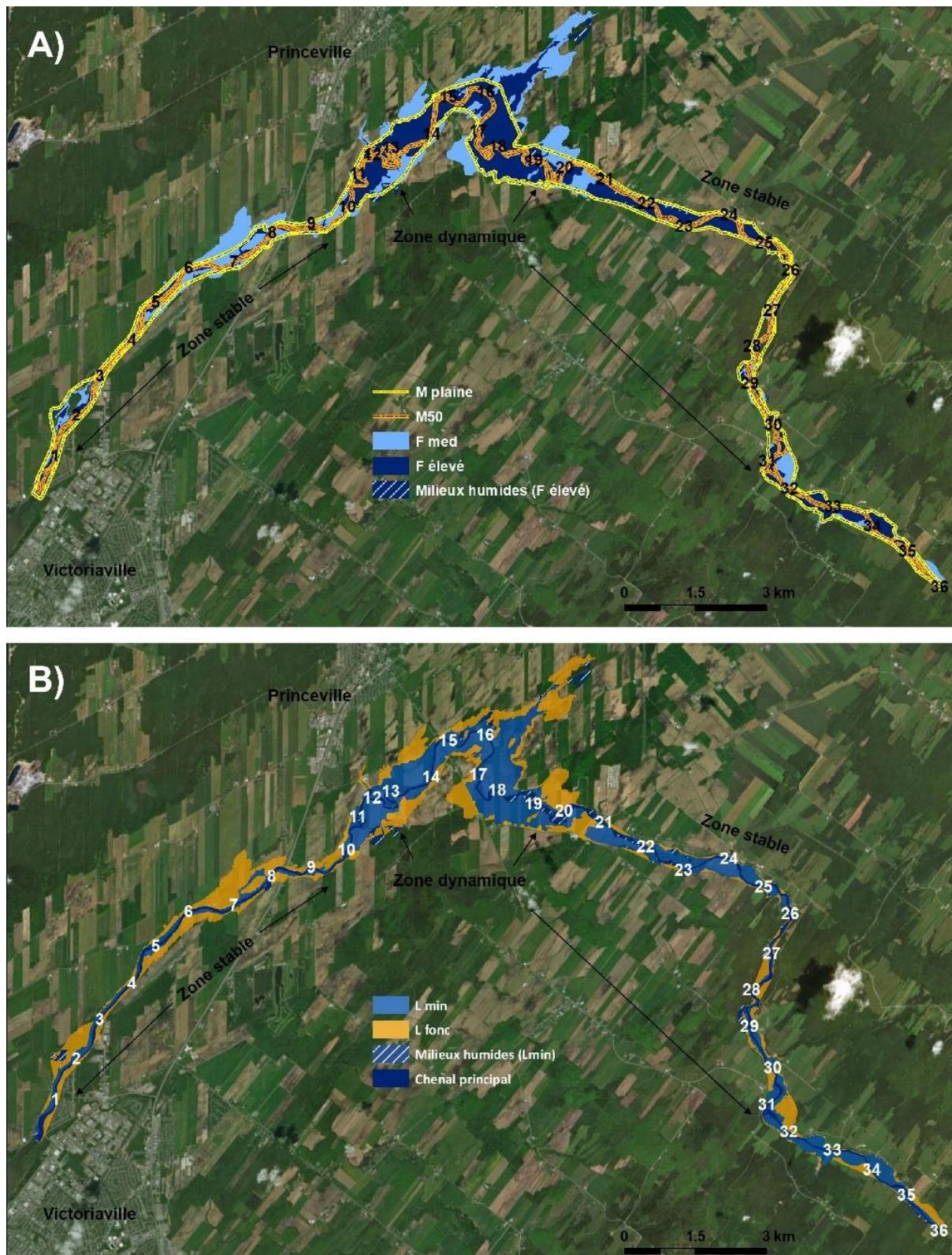


Figure 16 : A) Carte intégrale de l'espace de liberté montrant séparément les espaces de mobilité (M_{50} et M_{plaine}) et les espaces d'inondabilité ($F_{élevé}$ et F_{med}); B) Carte simplifiée de l'espace de liberté

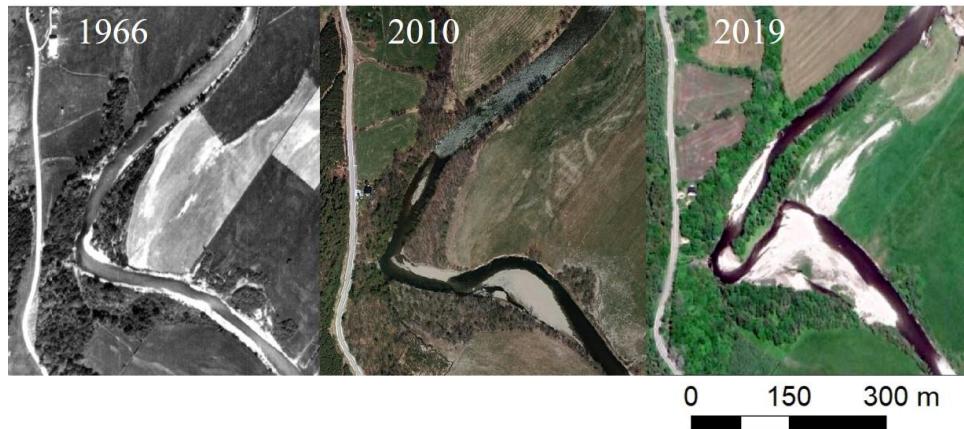


Figure 17 : Zone d'érosion active près du PK31



Figure 18 : Secteur très dynamique autour du PK31, avec des changements majeurs dans la position du chenal entre 1950 et 2010, résultant en une zone M₅₀ plus large

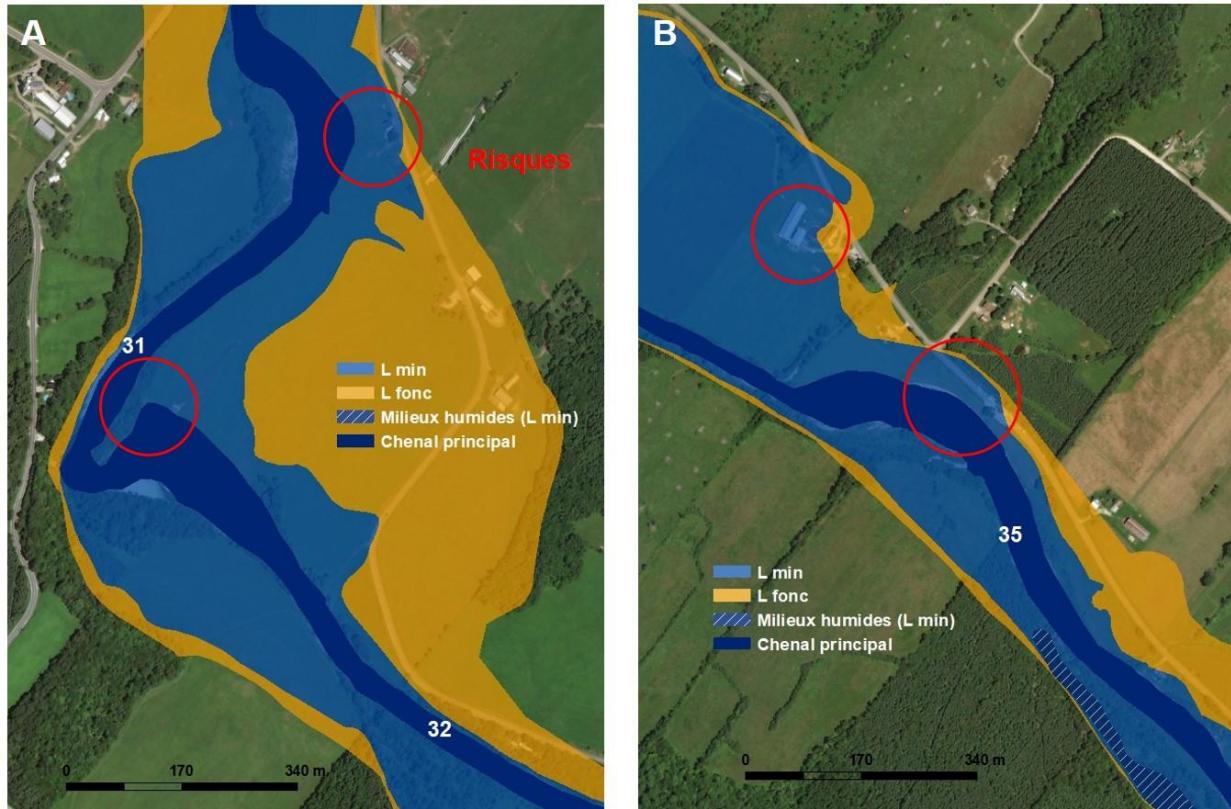


Figure 19 : Espace de liberté A) près du PK31 et B) près du PK35, montrant des secteurs avec infrastructures (habitations ou routes) à risque, puisque situées à l'intérieur de l'espace de liberté minimal (en bleu)

6.3 Investigation de l'impact des modifications anthropiques sur la dynamique sédimentaire de la rivière Bulstrode

6.3.1 Pertes et déstabilisation des bancs d'accumulation et des berges

L'analyse des photographies aériennes historiques révèle que la charge sédimentaire sur la rivière Bulstrode semblait déjà élevée au milieu du 20^e siècle, avec la présence de nombreux bancs d'accumulation, par exemple autour du PK20 (figure 20). De façon générale, des interventions anthropiques dans la rivière et en bordure de celle-ci pourraient avoir causé une diminution de la superficie des bancs d'accumulation et, par conséquent, une diminution de la capacité d'entreposage des sédiments dans la rivière. Par exemple, de nombreux passages à gué et des traces de passage de véhicules motorisés sur des bancs d'accumulation ont été observés lors des visites de terrain réalisées dans le cadre de ce projet (figure 21A). Ces pratiques pourraient nuire à la stabilité des bancs d'accumulation, réduire la croissance de la végétation (qui contribue à stabiliser les bancs) et limiter le potentiel de déposition et d'entreposage des sédiments fins (sable et silt) transportés par la rivière.

La stabilité des berges est aussi affectée par les passages à gué. La figure 18 (B, C, E) montre des exemples d'endroits où le passage fréquent de véhicules motorisés a exacerbé l'érosion au-delà de la tendance de la rivière à migrer naturellement.



Figure 20 : Bancs d'accumulation présents en 1950 autour du PK20, qui ne sont plus présents aujourd'hui à la suite d'une stabilisation des berges et d'une occupation plus intensive de la plaine alluviale

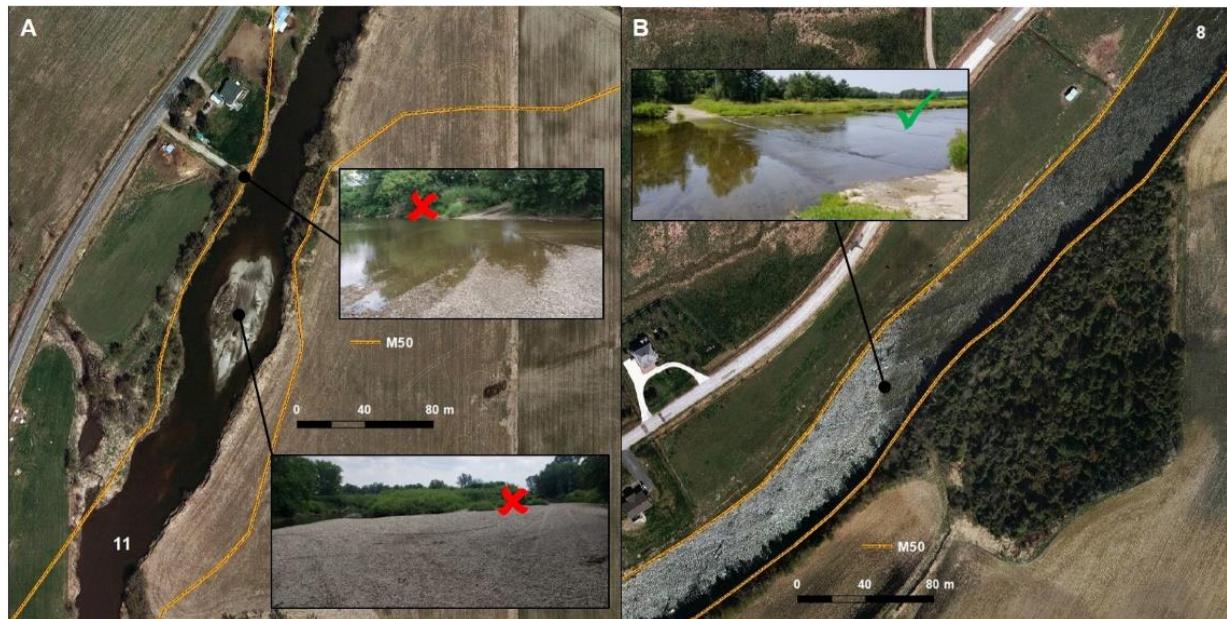


Figure 21 : A) Traverse à gué et passages de véhicules sur un banc d'accumulation (x rouges) dans un secteur dynamique près de PK11 (pratiques non recommandées); B) Traverse à gué dans un secteur stable près du PK8 (plus adéquat qu'en A)

6.3.2 Linéarisation des cours d'eau

Les interventions anthropiques réalisées dans le bassin versant de la rivière Bulstrode incluent aussi la linéarisation de certains tributaires, ainsi que la déconnexion d'anciens méandres de la plaine inondable en raison de la densification du réseau routier. Alors que ces perturbations anthropiques peuvent être observées à plusieurs endroits dans le bassin versant, elles sont particulièrement évidentes dans des secteurs agricoles comme celui situé dans le tronçon Tr.H.2, entre le PK11 et le PK14 (figure 22). Les travaux de linéarisation entraînent fréquemment des changements importants dans la morphologie et la section d'écoulement des cours d'eau, comme l'augmentation de la pente et de la largeur du cours d'eau, ainsi que l'augmentation de la densité

de drainage par le dragage de fossés. Ces modifications du réseau hydrique pourraient avoir causé une augmentation du transport vers la rivière Bulstrode de particules fines provenant des champs adjacents aux tributaires linéarisés. Il est à noter que, dans le bassin versant de la rivière Bulstrode, plusieurs tributaires avaient déjà été linéarisés avant la construction du réservoir Beaudet et même avant 1950, année des photographies aériennes les plus anciennes disponibles. Par conséquent, il est impossible de connaître l'état de ces cours d'eau avant leur linéarisation.



Figure 22 : Linéarisation du tracé Parent et traces d'anciens bras de méandres près du PK12

6.3.3 ***Stabilisation des berges (enrochements)***

De nombreux enrochements de berges ont été observés dans la section d'étude de la rivière Bulstrode lors des visites de terrains, en particulier dans les sections plus dynamiques des tronçons Tr.H2 et Tr.H.3. Plusieurs structures présentaient des indices d'instabilité comme des sections d'enrochement éboulées et du géotextile à nu. À titre d'exemple, la stabilisation mécanique de berge réalisée à proximité du PK20 (tronçon Tr.H.2) et présentée à la figure 8 n'a pas réussi à stopper la migration d'un méandre vers l'intérieur d'un champ agricole.

Par ailleurs, la stabilisation de berges dans certains secteurs névralgiques peut aussi avoir comme conséquence une érosion accrue en aval des zones stabilisées. La figure 23 présente un secteur situé près du PK35, où l'érosion d'une berge en direction d'une route a justifié, vers 2010 (selon les informations obtenues de COPERNIC), l'enrochement de la berge sur une centaine de mètres pour tenter de freiner la migration de la rivière. L'analyse des photographies aériennes historiques montre que, si l'enrochement a localement contribué à stabiliser la berge, la migration de la berge vers la route s'est accélérée à l'aval de l'enrochement après la mise en place de ce dernier. En effet, alors que la berge (droite) s'était érodée d'environ 45 m entre 1953 et 2010, soit à une vitesse moyenne de 0.8 m/année, la berge a migré de 49 m entre 2010 et 2019 (après l'enrochement de la berge), ce qui correspond à une vitesse moyenne de 5.4 m/année. De tels

augmentations des taux de migration pourraient résulter en des augmentations du transport sédimentaire vers le réservoir Beaudet.

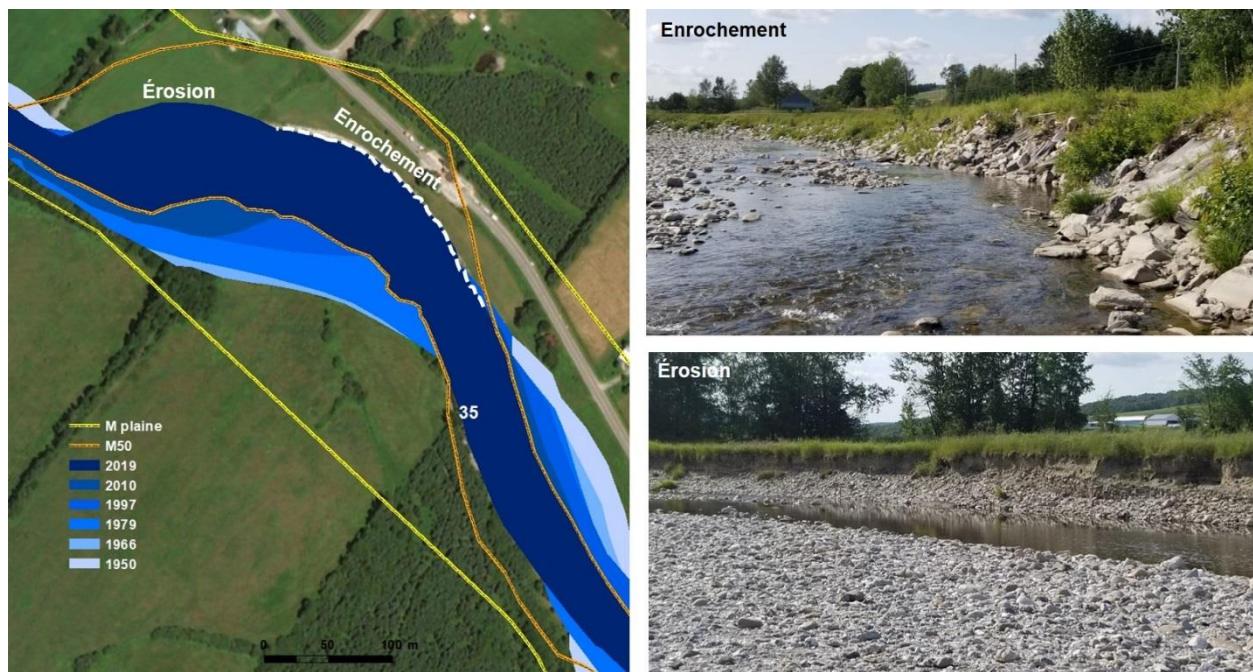


Figure 23 : Risque accru d'érosion en aval d'un secteur enroché près du PK35

6.3.4 Contribution potentielle des routes non pavées

Avec une longueur totale de 373 km, le réseau de routes non pavées est très développé dans le bassin versant de la rivière Bulstrode (figure 24). Les routes non pavées sont très fréquentes dans la section appalachienne du bassin versant, qui est principalement constituées d'aires boisées et dans lequel les pentes sont souvent fortes. Dans ces conditions, les routes non pavées peuvent générer des quantités significatives de sédiments, qui peuvent être transportés rapidement dans les fossés adjacents – dans lesquels le sol est aussi généralement à nu (figure 25) – vers la rivière Bulstrode.

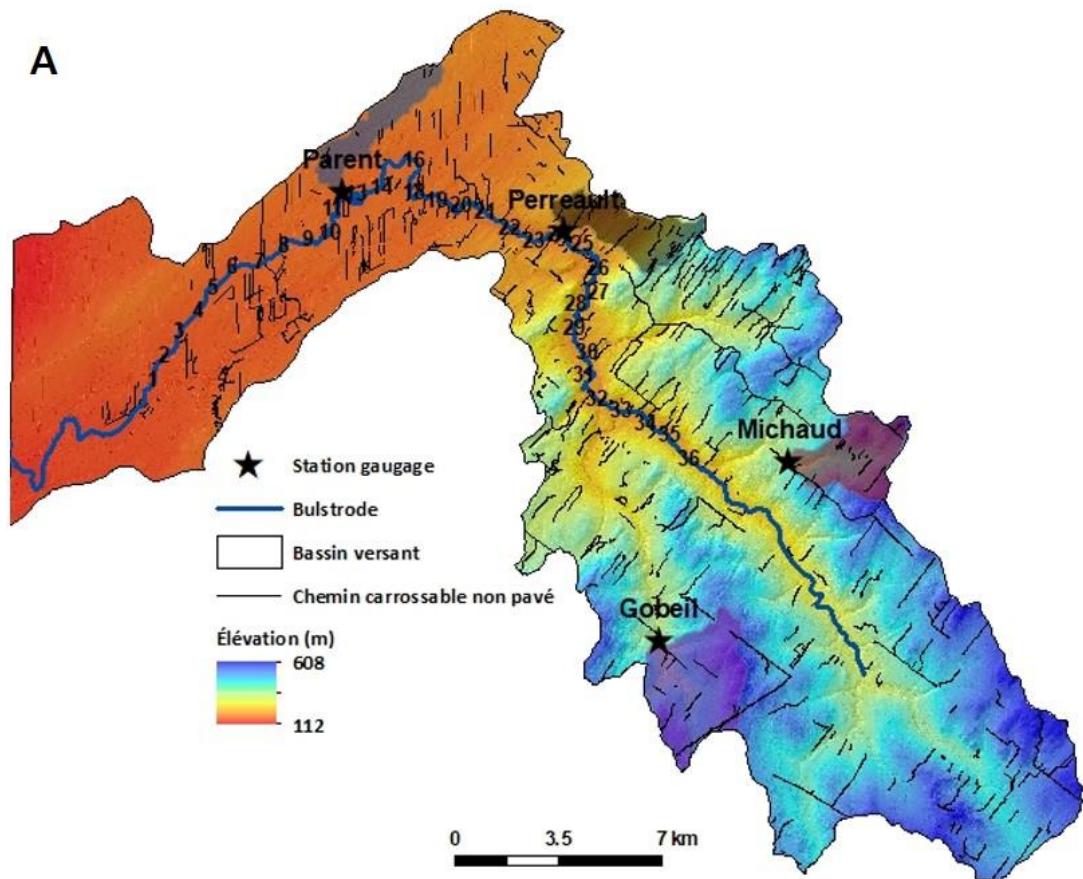


Figure 24 : A) Réseau de routes non pavées dans le bassin de la rivière Bulstrode; B) Exemple de route forestière et de fossé près du PK29



Figure 25 : Exemples de routes non pavées dans le secteur appalachien du bassin versant de la rivière Bulstrode

7 DISCUSSION

7.1 Évaluation des résultats en lien avec les problèmes de sédimentation dans le réservoir Beaudet

Les résultats de l'analyse hydrogéomorphologique effectuée fournissent un portrait clair et cohérent du bassin versant de la rivière Bulstrode en amont du réservoir Beaudet, et plus particulièrement pour les 36 km de la zone d'étude.

Dans un premier temps, l'analyse des photographies aériennes historiques et des données LiDAR a démontré que la rivière Bulstrode est une rivière dynamique, que sa mobilité est élevée dans plusieurs tronçons de la rivière situés en secteur appalachien et dans la zone de transition entre le piedmont et les basses terres et que la rivière transporte naturellement des charges élevées de sédiments.

Par ailleurs, le potentiel de migration des sédiments et l'espace de liberté de la rivière Bulstrode sont très variables dans le bassin versant, notamment en raison de la nature semi-alluviale de plusieurs tronçons. Comme la puissance spécifique de la rivière dépasse souvent le seuil de stabilité de 35 W/m^2 établi par Brookes (1987), il est normal que la rivière procède à des ajustements – parfois rapides – de son lit lorsque le contexte géologique le lui permet.

Comme mentionné précédemment, il est aussi à noter que des modifications anthropiques réalisées dans le bassin versant (dont la linéarisation de tributaires, les stabilisations de berges par enrochement et la construction de routes non pavées) et certaines pratiques (dont des pratiques agricoles et la circulation de véhicules motorisés sur les bancs d'accumulation et le lit et les berges des cours d'eau au niveau des passages à gué) pourraient contribuer à la mobilisation et au transport de sédiments vers le réservoir Beaudet, particulièrement dans les tronçons plus dynamiques.

D'après l'analyse hydrogéomorphologique réalisée, le tronçon Tr.H.2 (PK9-PK20) apparaît comme le tronçon de la rivière Bulstrode le plus susceptible de contribuer à l'apport de sédiments

fins au réservoir Beaudet. En effet, c'est dans ce tronçon que les espaces de mobilité M_{50} et M_{plaine} (déterminés à partir des changements de position de la rivière depuis les années 1950) sont les plus larges. De nombreux indices d'érosion active des berges ont été observés dans ce tronçon, ainsi que plusieurs secteurs sans végétation riveraine. Même si la puissance spécifique moyenne de ce tronçon est inférieure à celle des deux autres tronçons homogènes identifiés dans la zone d'étude et inférieure au seuil de 35 W/m^2 présenté précédemment, la puissance spécifique excède ce seuil à plusieurs endroits et paraît suffisante pour éroder les berges, qui sont souvent constituées de remblais à granulométrie plutôt fine (sable, silt et argile) dans ce secteur. En outre, la linéarisation de plusieurs tributaires (dont le ruisseau Parent près du PK11) et la déconnexion d'ancien méandres lors du développement du réseau routier, pourraient contribuer à une augmentation des apports de sédiments fins à la rivière en provenance des champs agricoles adjacents et à une réduction des zones de stockage naturel des sédiments. La circulation de véhicules motorisés sur les bancs d'accumulation et sur le lit de la rivière pourraient aussi réduire la stabilité des berges, qui subissent déjà de l'érosion dans ce tronçon.

Alors que le tronçon Tr.H.3 ne constitue vraisemblablement pas la source principale de sédiments fins qui peuvent être transportés dans la rivière Bulstrode jusqu'au réservoir Beaudet, plusieurs portions de ce tronçon requièrent une attention particulière et de possibles modifications aux pratiques actuelles. Comme mentionné précédemment, plusieurs secteurs de la rivière Bulstrode dans ce tronçon sont stables en raison de la présence d'affleurements rocheux et de terrasses non érodables. Par contraste, d'autres sections apparaissent nettement plus dynamiques, comme aux PK31 et PK35. Compte tenu de la pente et de la puissance spécifique élevées de la rivière dans ce tronçon, les activités anthropiques réalisées à proximité de la rivière peuvent réduire la stabilité du lit et des berges et exacerber la tendance naturelle de la rivière à migrer latéralement, comme les figures 18, 19 et 23 l'illustrent.

L'impact du barrage de Sainte-Sophie sur la dynamique sédimentaire et la morphologie de la rivière Bulstrode demeure partiellement indéterminé. Le barrage est situé dans le tronçon Tr.H.3, entre le PK25 et le PK26. Cette section de la rivière Bulstrode est confinée par des terrasses non érodables et l'analyse des photographies aériennes historiques indique que le secteur entourant le barrage (PK24-PK28) est stable depuis les années 1950. Comme le soulignait les travaux de Poly-Géo (2012 a,b), le barrage semble bloquer temporairement les sédiments grossiers, mais ne semble pas empêcher la migration vers l'aval des sédiments plus fins en suspension. Comme le montre la figure 26, les observations réalisées sur le terrain montrent que l'accumulation de sédiments grossiers (cailloux, graviers et sables grossiers) est significative en amont du barrage. Le barrage de Sainte-Sophie a aussi sûrement eu un impact sur la géométrie de la section d'écoulement de la rivière en aval de celui-ci (incision du lit en raison du déficit sédimentaire), mais son impact sur la géométrie en plan de la rivière n'a pu être évalué puisque ces changements pourraient être survenus avant 1950 (le barrage ayant été construit en 1934), date des plus anciennes photographies aériennes disponibles dans le cadre de cette étude. La puissance spécifique très élevée calculée à la hauteur du barrage (puissance spécifique supérieure à 350 W/m^2) indique un fort potentiel d'incision du lit à l'aval du barrage. Cette conclusion n'a pas pu être vérifiée directement, parce que la section située à l'aval du barrage est érodée jusqu'au roc et que seuls des blocs et cailloux sont observables au-dessus du roc. Enfin, la rétention de sédiments grossiers en amont du barrage pourrait expliquer la disparition graduelle des bancs d'accumulation observée aux environs du PK20 (figure 20).

Les résultats de cette étude montrent que le tronçon Tr.H.1 (PK0-PK9) est généralement stable et ne constitue pas une source significative de sédiments. Alors que la puissance spécifique moyenne était de 35 W/m^2 dans ce tronçon, aucun indice d'érosion de berge n'a été noté pendant les visites de terrain réalisées dans le cadre de ce mandat. La présence de roc sur le lit et sur la berge droite sur la majeure partie de ce tronçon explique vraisemblablement le peu de changements observés dans ce tronçon depuis les années 1950. Les valeurs de puissance spécifique plus élevées peuvent vraisemblablement être expliquées par le fait que la pente est contrôlée par le roc. Celles-ci suggèrent qu'à défaut de représenter une source significative de sédiments, le tronçon Tr.H.1 est en mesure de transporter les sédiments qui proviennent des sections situées plus en amont dans le bassin versant de la rivière Bulstrode.



Figure 26 : Accumulation de sédiments en amont du barrage de Sainte-Sophie

7.2 Analyse des résultats à la lumière des études antérieures réalisées dans le bassin versant de la rivière Bulstrode

Comme mentionné dans la section précédente, cette étude a démontré que la rivière Bulstrode est un cours d'eau très dynamique par endroits et que sa mobilité est la plus élevée dans le

tronçon Tr.H.2, situé entre le PK9 et le PK20. Dans l'ensemble, ces résultats concordent avec ceux de Poly-Géo (2012 a,b), qui avaient identifié le tronçon situé entre le PK10 et le PK27 comme principale source potentielle de sédiments dans la rivière Bulstrode. A priori, ils diffèrent plus significativement des conclusions de Lachance (2017), selon lesquelles le tronçon de la rivière Bulstrode contribuant le plus significativement aux apports de sédiments dans la rivière était celui situé entre le site 1 (immédiatement en amont du réservoir Beaudet) et le site 3 (situé approximativement entre le PK16 et le PK17). Cette étude concluait en outre que les sédiments provenant de l'amont du bassin versant ne parvenaient pas au réservoir Beaudet. Alors que la présente étude ainsi que celles de Poly-Géo et Lachance (2017) identifient toutes trois le tronçon situé entre le PK10 et le PK16-17 comme une zone très dynamique, les études de Poly-Géo ont aussi conclu que la zone dynamique s'étend jusqu'au PK27, tandis que la limite amont établie par la présente étude est située au PK20. À l'opposé, seule l'étude de Lachance identifie les dix premiers kilomètres en amont du réservoir Beaudet comme une zone dynamique.

Les études de Poly-Géo (2012 a,b) et le mémoire de maîtrise de Lachance (2017) peuvent sembler complémentaires car ils visent à répondre à des questions différentes et également importantes pour comprendre le transport sédimentaire dans la rivière Bulstrode. En effet, alors que les études de Poly-Géo visaient à comprendre la géomorphologie de la rivière (notamment en identifiant les indices d'érosion et de dépôt dans celle-ci) à partir de l'interprétation de photographies aériennes récentes et historiques et par des travaux de validation sur le terrain, les travaux de Lachance consistaient plutôt en une caractérisation des sols du bassin versant de la rivière Bulstrode et des sédiments présents dans la rivière, et en l'utilisation de traceurs (notamment géochimiques) pour déterminer la provenance des sédiments observés dans la rivière.

En ce sens, les conclusions divergentes de ces études peuvent étonner. Toutefois, certaines considérations doivent être prises en compte pour mettre en contexte les résultats de l'étude de Lachance.

- 1) Les sédiments de la rivière ont été échantillonnés à un nombre de sites limités, soit huit sites sur une cinquantaine de kilomètres (en excluant le site 2, placé dans la rivière l'Abbé). Environ 16 km séparent les sites 1 et 3, qui sont situés aux extrémités du segment jugé le plus critique par Lachance en termes d'apport de sédiments au réservoir Beaudet. L'emplacement de ces deux sites limite donc les conclusions au sujet de la délimitation exacte du tronçon jugé le plus actif.
- 2) Les sédiments ont été échantillonnés avec des trappes à sédiments décrites à la section 4.1.2 du mémoire de maîtrise de Lachance. Le mémoire ne fournit pas d'information sur la hauteur à laquelle ces trappes ont été installées au-dessus du lit, ni d'évaluation ou de discussion du transport de particules en charge de fond ou par saltation ou suspension en dessous des trappes, qui n'auraient pas été pris en compte dans l'étude. Le mémoire ne présente pas non plus d'information sur le positionnement latéral des trappes dans la section d'écoulement, ce qui pourrait par endroit avoir une influence significative sur la nature et la quantité des sédiments échantillonnés.
- 3) Les résultats de l'analyse discriminante utilisée pour différencier les quatre catégories de provenance des sédiments (sols agricoles, sols forestiers, berge inférieure et berge supérieure) montrent un certain chevauchement sur la figure 39 du mémoire de Lachance,

ce qui semble indiquer que la discrimination des sources de sédiments comporte une part d'ambiguïté et doit être interprétée avec prudence.

- 4) Il apparaît compliqué de comparer les résultats obtenus aux différentes stations, parce que ceux-ci sont exprimés uniquement en pourcentages de provenance et non en termes de charges. Par conséquent, en l'absence de données sur les charges de sédiments mesurées à chaque station, il n'est pas possible d'expliquer entièrement l'évolution des proportions entre chaque station. Par exemple, sans les données de charges, il est impossible de déterminer si la baisse de pourcentage des sédiments d'origine forestière entre les sites 4 et 3 est attribuable à un dépôt de ces sédiments entre ces deux sites (bien qu'aucune forme majeure de dépôt ou structure de rétention des sédiments n'ait été observée dans ce tronçon), ou plutôt à un effet de « dilution » en raison d'une augmentation de la concentration des sédiments provenant d'autres sources.
- 5) Les résultats obtenus aux différentes stations n'ont pas été mis en lien avec la nature et la provenance des sédiments présents dans le réservoir Beaudet, ce qui aurait permis de valider les hypothèses émises par Lachance quant à la provenance des sédiments se déposant dans le réservoir.

Enfin, il est à noter que les conclusions de Lachance au sujet de la contribution dominante du segment aval à l'apport sédimentaire au réservoir Beaudet ne sont pas appuyées par les observations réalisées par Poly-Géo en 2012 et dans le cadre de la présente étude en 2019, qui semblent plutôt démontrer que ce tronçon est relativement stable. Par conséquent, bien que l'analyse effectuée par Lachance semble permettre (en tenant compte des limites de l'étude) de déterminer la provenance des sédiments dans la rivière Bulstrode à différents points de mesure, des éléments d'analyse apparaissent manquer pour permettre de relier ces données entre elles et d'établir un portrait d'ensemble du transport sédimentaire en amont du réservoir Beaudet. Cette étude apporte toutefois des informations intéressantes à mettre en lien avec la capacité d'entreposage des sédiments à l'intérieur du système de la rivière Bulstrode.

8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Tant l'analyse des photographies aériennes historiques que les observations sur le terrain et l'analyse SIG révèlent que le transit sédimentaire sur la rivière Bulstrode est considérable, et l'a vraisemblablement toujours été. Le secteur de 36 km à l'amont du réservoir Beaudet comprend des zones d'affleurement rocheux qui limitent grandement la migration de la rivière à ces endroits. Ces zones semblent limiter la possibilité pour la rivière de modifier sa pente, ce qui est la façon normale pour une rivière de s'ajuster lorsque surviennent des changements dans le débit liquide ou solide (Mackin, 1948). En outre, les nombreuses interventions anthropiques réalisées dans le bassin versant pourraient avoir entraîné des ajustements significatifs dans les zones alluviales où la rivière est libre d'éroder son lit et ses berges.

Il est aussi possible qu'une certaine forme de canalisation, telle qu'observée à la figure 20, ait accentué le transit sédimentaire vers les tronçons aval. En effet, compte tenu de la charge sédimentaire élevée charriée par ce cours d'eau, il est important de préserver des zones de stockage naturel dans la plaine alluviale. Ces sédiments transitent alors beaucoup plus lentement dans le système fluvial avant de se retrouver dans le réservoir Beaudet.

L'analyse hydrogéomorphologique permet d'établir dans une certaine mesure la dynamique de la rivière à différentes époques pour lesquelles des photographies aériennes sont disponibles. Puisque l'occupation du territoire est antérieure aux plus anciennes photographies disponibles, il n'est pas possible de dissocier entièrement la dynamique naturelle du cours d'eau de l'impact des activités anthropiques. Par ailleurs, il est à noter que le réservoir Beaudet agit vraisemblablement comme un frein à la connectivité sédimentaire de la rivière à l'échelle plus globale du bassin versant de la rivière Bulstrode.

Il est commun au Québec, dans des cas de rivières dynamiques, de considérer des options d'ingénierie dite dure, comme par exemple l'installation de seuils comme action de prévention. Les seuils sont des structures de contrôle de l'érosion qui sont généralement utilisées dans des situations d'érosion régressive. Ces situations surviennent lorsque des sédiments ont été prélevés des rivières, souvent pour servir de matériaux de construction, résultant en un changement abrupt de la pente du lit (point dur, ou « *knick point* » en anglais) qui migre vers l'amont, ce qui engendre une incision du lit et déstabilise les berges (Malavoi, 2003). Une autre utilisation des seuils consiste à contrôler la pente (« *grade control structure* ») afin d'atténuer les problèmes d'érosion de berges d'un cours d'eau en forte incision verticale, par exemple en raison d'une baisse du niveau de base (cours ou plan d'eau dans lequel un tributaire se jette). Selon les observations effectuées, ces deux possibilités ne correspondent pas au contexte de la rivière Bulstrode. L'utilisation de seuils pour réduire le transfert de sédiments vers l'aval apparaît comme une stratégie de portée locale et limitée, comme les seuils ont généralement une faible capacité de rétention et que les sédiments s'accumulant en amont de ceux-ci doivent être dragués périodiquement pour que les seuils conservent leur efficacité (Malavoi, 2003).

Il est très peu probable que l'on puisse empêcher le fort transit sédimentaire de la rivière Bulstrode de se maintenir dans le futur, ce qui implique que les sédiments vont continuer de s'accumuler dans le réservoir, comme c'est le cas dans plusieurs réservoirs à travers le monde. Toutefois, il serait possible de limiter l'apport sédimentaire en provenance des champs avec l'implantation de pratiques agricoles limitant la connectivité entre les champs et les cours d'eau. De plus, en laissant plus d'espace à la rivière pour que les processus fluviaux d'érosion et d'inondation puissent survenir, il est possible que la capacité d'entreposage des sédiments augmente et que le taux de sédimentation diminue dans le réservoir. Ceci éviterait aussi des dépenses récurrentes et coûteuses de stabilisation de berges.

Plus spécifiquement, à la lumière de l'analyse hydrogéomorphologique réalisée dans le cadre de ce mandat, nous recommandons :

- 1) **De réduire ou éliminer la stabilisation de berges là où il n'y a pas d'enjeux de sécurité publique.** À plusieurs endroits le long des sections les plus dynamiques du tronçon d'étude de 36 km, nous avons noté du géotextile exposé et des enrochements effondrés. Bien que la stabilisation des berges soit souvent nécessaire pour protéger les infrastructures publiques et privées qui ont été construites trop près d'un cours d'eau (à l'intérieur de l'espace de liberté minimal), ces interventions ne sont souvent qu'une solution temporaire car l'érosion des berges est un processus naturel par lequel la rivière ajuste sa sinuosité, et donc sa pente, lorsqu'il y a un déséquilibre entre les débits liquides et solides. Ceci est bien illustré par le cas présenté à la figure 23, où la stabilisation par enrochement mise en place pour protéger la route près du PK35 semble avoir exacerbé l'érosion de berge en aval de l'enrochement.

- 2) **De minimiser les activités humaines à l'intérieur du chenal, en particulier dans les sections identifiées comme dynamiques.** Des preuves d'accès aux véhicules dans le lit mineur ont été observées tout au long du secteur à l'étude. Les implications potentielles de ces activités dépendront du contexte géomorphologique d'un tronçon particulier. Par exemple, à la figure 21A, des traces de roues de véhicules motorisés ont été identifiés sur un grand banc d'accumulation au centre du chenal près du PK11, ce qui peut contribuer à déstabiliser cette forme fluviale qui joue un rôle majeur dans le stockage de sédiments. Le passage de véhicules motorisés dans ce contexte déstabilise le banc d'accumulation et entrave la croissance de la végétation, qui peut accroître la cohésion du banc et ainsi diminuer les risques d'érosion. En revanche, certains tronçons qui sont naturellement stables, par exemple près de PK8 dans la figure 21B où le gradient est contrôlé par un affleurement rocheux, paraissent mieux adaptés pour supporter ces traverses à gué ad hoc de véhicules.
- 3) **D'améliorer la conception des fossés de route le long des tributaires avec de fortes pentes.** Comme illustré dans les figures 24 et 25, beaucoup de routes non pavées ont été aménagées dans des sous-bassins versants de la rivière Bulstrode. Plusieurs de ces tributaires et sous-bassins versants ont des pentes fortes et des puissances spécifiques élevées, ce qui accroît le potentiel des fossés de route de transporter des charges élevées de sédiments. Il s'agit d'un cas où l'installation de seuils pour capter les sédiments durant les événements majeurs de ruissellement pourrait s'avérer une bonne mesure de mitigation pour décroître le volume de sédiments qui atteint le réservoir Beaudet, dans la mesure où l'entretien de ces seuils peut être garanti.

RÉFÉRENCES

- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Ouellet, M.-A., Choné, G., Cloutier, C.-A., Needleman, M. 2013a. Espace de liberté: un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques, 125 p.
- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Demers, S., Olsen, T. 2013b. Improvement of streams hydrogeomorphological assessment using LiDAR DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 15, 1808-1821.
- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Choné, G., Cloutier, C.-A., Ouellet, M.-A., Demers, S., Olsen, T., Desjarlais, C., Eyquem, J. 2014 Freedom space for rivers: a sustainable management approach to enhance river resilience. *Environmental Management*, 54, 5, 1056-1073.
- Brookes, A. 1987. The distribution and management of channelized streams in Denmark. *Regulated Rivers*, 1, 3-16.
- Choné, G., Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T. 2018. Flood hazard mapping techniques with LiDAR in the absence of river bathymetry data. *Proceedings of River Flow 2018*, ninth international conference on fluvial hydraulics.
- Demers, S., Olsen, T., Buffin-Bélanger, T., Marchand, J.P., Biron, P.M., Morneau, F. 2014. L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid: l'exemple de la rivière Matane (Québec), *Physio-Géo*, 8, 1, 67-88
- Demers, S., Massé, S. , Besnard, C., Buffin-Bélanger, T. 2017. La représentation cartographique des processus hydrogéomorphologiques : cinq initiatives pour une meilleure gestion des aléas fluviaux au Québec. Laboratoire de géomorphologie fluviale, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité Publique.
- Duhamel, D. et Bariteau, L. 2012a. Étude du bassin versant de la rivière Bulstrode à l'amont du réservoir Beaudet, Victoriaville. Portrait global de l'érosion et de la dynamique sédimentaire présenté au Service de l'environnement de la Ville de Victoriaville. Poly-Géo Inc. Version finale. 17 août 2012. 29 p. + annexes.
- Duhamel, D. et Bariteau, L. 2012b. Projet de restauration du bassin versant de la rivière Bulstrode à l'amont du réservoir Beaudet. Analyse par photo-interprétation du segment central de la rivière et validation au terrain. Rapport préliminaire présenté au Service de l'environnement de la Ville de Victoriaville. Poly-Géo Inc. Version préliminaire. 24 août 2012. 25 p.
- England, J.F., Jr., Cohn, T.A., Faber, B.A., Stedinger, J.R., Thomas, W.O., Jr., Veilleux, A.G., Kiang, J.E. et Mason, R.R., Jr. 2019. Guidelines for determining flood flow frequency. Bulletin 17C. Chapter 5 of section B, Surface Water. Book 4, Hydrologic analysis and interpretation. Techniques and methods 4 B5. Version 1.1. May 2019. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (USGS). 148 p. <https://doi.org/10.3133/tm4B5>.
- HBA Environnement. 2004. Réaménagement du réservoir Beaudet. Ville de Victoriaville. Étude d'impact sur l'environnement déposée au ministère de l'Environnement. Rapport principal. No de référence HBA : 3003026. Septembre 2004. 111 p. + annexes.
- Idée-eau Environnement. 2017. Étude hydrologique préliminaire de la rivière Bulstrode. 10 p. + annexe.

Lachance, C. 2017. Sources de sédiments dans un réservoir d'eau potable par la technique de traçage de sédiments. Mémoire de maîtrise. Université Laval. 103 p. + annexes.

Les Services EXP inc. (EXP). 2019. Étude d'avant-projet définitif. Restauration du réservoir Beaudet. E2010-01-82683. Étape 5 : rapport final. Version finale. No de référence : VICV-00249762. 24 mai 2019. 51 p. + annexes.

Mackin, J.H. 1948. The concept of the graded stream. Geological Society of America Bulletin, 59, 463-511.

Malavoi, J.-R . 2003. Stratégie d'intervention de l'Agence de l'eau sur les seuils en rivière. Agence de l'eau Loire-Bretagne. http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace_documentaire/documents_en_ligne/guides_milieux_aquatiques/Etude_Seuil.pdf (page web consultée le 29 janvier 2020)

Massé, S., Demers, S., Besnard, C., Buffin-Bélanger, T., Biron, P.M., Choné, G., Massey, W. 2020. Development of a mapping approach encompassing most fluvial processes: lessons learned from the freedom space for rivers concept in Quebec (Canada). River research and applications. Sous presse.

Parish Geomorphic. 2004. Belt Width Delineation Procedures. Report 98-023 submitted to the Toronto and Region Conservation Authority.
[En ligne] <https://sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2013/01/Belt-Width-Delineation-Procedures.pdf> (page web consultée le 29 janvier 2020)

Piégay, H., Darby, S.E., Mosselman, E., Surian, N. 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. River Research and Applications, vol. 21, no 7, p. 773-789.

Pons, F., Delgado, J.-L., Guero, P., Berthier, E., Kerloc'h, B., Piney, S., Felts, D. 2010. Une contribution à l'évaluation de l'aléa inondation par ruissellement et crues soudaines. SimHydro 2010 : Hydraulic modeling and uncertainty, 2-4 June 2010, Sophia Antipolis.

U.S. Department of the Interior, Geological Survey (USGS). 1982. Guidelines for determining flood flow frequency. Bulletin #17B of the Hydrology subcommittee. Revised September 1981, editorial corrections March 1982. Interagency advisory committee on water data. USGS, Office of water data coordination. Reston, Virginia, État-Unis d'Amérique. 14 chapitres.