

Mars 2023

**Développement de courbes de géométrie hydraulique adaptées à différents contextes
physiographiques au Québec**

Livrable 4 : Rapport final

Présenté à :

*Direction de l'agroenvironnement et du milieu hydrique (DAEMH)
Direction générale des politiques de l'eau (DGPE)*

**Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de
la Faune et des Parcs (MELCCFP)**

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi


LERGA
Laboratoire d'expertise et de
recherche en géographie appliquée
UQAC

 **UNIVERSITÉ
Concordia
UNIVERSITY**

Équipe de réalisation

MELCCFP :

Stéphane Valois, M. Sc. Biologie
Conseiller scientifique en protection
des milieux hydriques

Superviseurs :

Maxime Boivin, Ph. D. Géographie
Hydrogéomorphologue
Université du Québec à Chicoutimi

Pascale Biron, Ph. D. Géographie
Hydrogéomorphologue
Université Concordia

Professionnel de recherche :

Yan Boulet, B. Sc. Géographie
Candidat à la maîtrise
Université du Québec à Rimouski
Université du Québec à Chicoutimi

Étudiants :

Olivier Boudreault, B. Sc. Géographie
Université du Québec à Chicoutimi

Marie-Joëlle Lauzier, B. Sc. Géographie
Université du Québec à Chicoutimi

David Bilodeau, B. Sc. Géographie
Université du Québec à Chicoutimi

Anthony Fontaine B. Sc. Géographie
Université du Québec à Rimouski

Référence à citer :

Boulet Yan, Boivin Maxime et Biron Pascale. 2023. Rapport final sur le développement de courbes de géométrie hydraulique adaptées à différents contextes physiographiques au Québec présenté au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Laboratoire d'expertise et de recherche en géographie appliquée (LERGA-UQAC). 36 pages et annexes.

Table des matières

Table des figures	iii
Table des tableaux.....	v
1. Contexte	1
1.1 Principes de la géométrie hydraulique	1
1.1.1 Relations à une section vs amont-aval.....	2
1.2 La géométrie hydraulique dans un contexte de restauration	4
2. Objectifs.....	7
3. Méthodologie	7
3.1 Données disponibles au Québec.....	7
3.1.1 Données de l'IRDA.....	8
3.1.2 Données de la DPPHC	8
3.1.3 Données de l'UQAR.....	9
3.2 Données recueillies par l'UQAC (LERGA).....	9
3.2.1 Caractérisation des sites	9
3.2.2 Traitement des données.....	12
4. Résultats	16
4.1 Relations de géométrie hydraulique avec le débit plein bord estimé.....	16
4.2 Relations de géométrie hydraulique avec l'aire de drainage.....	19
5. Discussion.....	21
5.1 L'utilisation de l'aire de drainage	21
5.2 Limites de l'utilisation de l'équation de Manning	22
5.2.1 Biais potentiel de l'opérateur	22
5.2.2 Évaluation du niveau plein bord	22
5.2.3 Coefficient de Manning et incertitude	23
5.3 Comparaison avec d'autres études	23
5.3.1 Au Canada.....	23

5.3.2	Aux États-Unis.....	26
5.4	Impact de la linéarisation sur la géométrie hydraulique	28
5.4.1	Ajustement des cours d'eau (exposants).....	28
5.4.2	Boucle d'entretien des cours d'eau agricoles.....	29
6.	Conclusion	30
6.1	Retour sur les objectifs.....	30
6.2	Principaux messages	31
6.3	Recommandations	31
	Bibliographie.....	33
	Annexe 1 : Données pour les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord.....	37
	Annexe 2 : Données pour les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud.....	39
	Annexe 3 : Données pour le Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	41
	Annexe 4 : Données pour les Appalaches.....	43

Table des figures

Figure 1. Schématisation des deux approches de géométrie hydraulique: à une section de rivière et de l'amont vers l'aval, adaptée de Gleason (2015).....	3
Figure 2. Morphologie des chenaux dans les plans d'ingénierie et des chenaux correspondant au concept de chenaux stables, tirée de Volmar et al. (2017).....	5
Figure 3. Représentation schématique d'un cours d'eau trapézoïdal (A) et d'un cours d'eau à deux niveaux (B).....	6
Figure 4. Carte de localisation des sites.....	10
Figure 5. Coefficient de rugosité de Manning en fonction de la région physiographique.....	12
Figure 6. Aire de drainage de tous les sites en fonction de la région physiographique.....	13
Figure 7. Utilisation du sol en fonction de la région physiographique pour les données de l'UQAC. L'axe vertical a été ajusté de 0 à 20% pour la rangée du bas pour mieux visualiser la distribution des données.....	14
Figure 8. Pente du tronçon pour tous les sites.....	14
Figure 9. Profondeurs et largeurs du niveau plein bord des cours d'eau de tous les sites en fonction de la région physiographique.....	15
Figure 10. Distribution de la classification des types de cours d'eau par région physiographique.....	16
Figure 11. Courbes de géométrie hydraulique pour chaque région physiographique ainsi qu'une courbe composite pour la province en relation avec le débit plein bord estimé.....	17
Figure 12. Courbes de géométrie hydraulique pour chaque région physiographique ainsi qu'une courbe composite pour la province en relation avec le débit plein bord estimé.....	20
Figure 13. Valeurs du coefficient de rugosité en fonction des différents opérateurs (YB, AF, JD et OB) pour chaque région physiographique.....	22
Figure 14. Courbes de géométrie hydraulique des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord. Variable indépendante : aire de drainage.....	37
Figure 15. Courbes de géométrie hydraulique des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord. Variable indépendante : débit plein-bord estimé.....	37
Figure 16. Courbes de géométrie hydraulique des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud. Variable indépendante : aire de drainage.....	39

Figure 17. Courbes de géométrie hydraulique des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud. Variable indépendante : débit plein-bord estimé	39
Figure 18. Courbes de géométrie hydraulique du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Variable indépendante : aire de drainage	41
Figure 19. Courbes de géométrie hydraulique du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Variable indépendante : débit plein-bord estimé	41
Figure 20. Courbes de géométrie hydraulique des Appalaches. Variable indépendante : aire de drainage.....	43
Figure 21. Courbes de géométrie hydraulique des Appalaches. Variable indépendante : débit plein-bord estimé.....	43

Table des tableaux

Tableau 1. Composantes du coefficient de rugosité de Manning (Arcement et Schneider 1989)	11
Tableau 2. Exposants et coefficients des relations de géométrie hydraulique (largeur (b) et profondeur (f)) issus des régressions linéaires avec le débit plein bord estimé. En rouge : relations non significatives	17
Tableau 3. Exposants et coefficients des relations de géométrie hydraulique (largeur (b) et profondeur (f)) issus des régressions linéaires avec l'aire de drainage. En rouge : relations non significatives	20
Tableau 4. Comparaison des exposants de géométrie hydraulique de cette étude avec ceux de Leclerc et Lapointe (1994) dans les Bois-Francs (variable indépendante : débit plein bord). En rouge : relations non significatives	24
Tableau 5. Exposants des courbes de géométrie hydraulique de cette étude comparés à ceux de Chandler et Amirault (2019) en Ontario (variable indépendante : aire de drainage). Une courbe composite sans les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord a aussi été développée considérant que la courbe de profondeur pour cette région n'était pas significative. En rouge : relations non significatives	25
Tableau 6. Sources utilisées par Bieger et al. (2015) pour leur étude sur les relations de géométrie hydraulique au niveau plein bord.....	27
Tableau 7. Exposants des courbes de géométrie hydraulique issues de la littérature aux États-Unis en comparaison avec ceux de cette étude (variable indépendante : aire de drainage). En rouge : relations non significatives	28
Tableau 8. Base de données des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord	38
Tableau 9. Base de données des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud	40
Tableau 10. Base de données du Saguenay-Lac-Saint-Jean	42
Tableau 11. Base de données des Appalaches	44

1. Contexte

Par l'adoption de la *Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques* (LCMHH) en 2018, le gouvernement du Québec s'est engagé à freiner la dégradation et la perte des milieux humides et hydriques sur son territoire. Le principe d'aucune perte nette a été placé au cœur de cette loi afin de conserver, voire augmenter, les superficies de milieux humides et hydriques et les services écosystémiques qui en découlent (MDELCC 2018). Ainsi, il importe de tenir compte des processus hydrogéomorphologiques soutenant notamment la création d'habitats aquatiques en s'assurant que les travaux d'aménagement et de restauration de cours d'eau soient durables dans le temps (équilibre dynamique) et permettent la restauration des principales fonctions écologiques. Il existe un besoin pour guider ces travaux, surtout concernant la dimension des lits à reconstruire, que ce soit dans les projets de restauration de cours d'eau réalisés dans le cadre du *Programme de création et restauration de milieux humides et hydriques* (PRCMHH), les travaux de contournement et les travaux d'entretien de cours d'eau majoritairement en milieux agricoles. Afin de guider adéquatement ces travaux d'aménagement et de restauration, il est nécessaire de connaître les caractéristiques géométriques des cours d'eau à l'état naturel selon les différentes régions physiographiques du Québec.

1.1 Principes de la géométrie hydraulique

Inspirée de la théorie du régime, développée au XIX^e siècle dans des canaux d'irrigation en Inde, la théorie de la géométrie hydraulique est proposée par Leopold et Maddock (1953) puis documentée par de nombreux auteurs dont Dunne et Leopold (1978) et Hey et Thorne (1986) (Malavoi et Bravard 2010). La géométrie hydraulique décrit les relations observables dans un cours d'eau entre la dimension du chenal (largeur et profondeur) et la vitesse d'écoulement (variables dépendantes) avec un débit donné (variable indépendante), ou encore selon l'aire de drainage qui est fortement corrélé avec le débit et plus simple à obtenir (Leopold et Maddock 1953; Wohl 2020). Ces relations s'expriment selon des fonctions de puissance :

$$(1) W = aQ^b$$

$$(2) Y_m = cQ^f$$

$$(3) V_m = kQ^m$$

Où W est la largeur du cours d'eau (m), Y_m est la profondeur moyenne de l'écoulement (m), V_m est la vitesse moyenne de l'écoulement (m/s) et Q est le débit (m³/s). Le produit des coefficients

a , c et k et la somme des exposants b , f et m sont égaux à 1 puisque, selon le principe de la continuité des équations, le produit des trois composantes du débit est égal au produit des trois équations de puissances (eq. 1, 2 et 3) :

$$(4) \quad Q = W * Y_m * V_m = aQ^b * cQ^f * kQ^m$$

1.1.1 Relations à une section vs amont-aval

Ces modèles permettent de quantifier et d'analyser les changements morphologiques selon deux approches distinctes : à une section de rivière (*at-a-station*) ou de l'amont vers l'aval d'un cours d'eau ou d'un bassin versant (*downstream*) (Figure 1). L'approche à une section de rivière permet d'observer les variations temporelles des variables morphométriques selon les fluctuations du débit (Knighton 1998). Depuis Ferguson (1986), on considère que les relations de géométrie hydraulique à une section de rivière sont fonction de la forme de la section transversale et donc déterminées par les changements de la résistance à l'écoulement. L'approche de l'amont vers l'aval permet d'observer les variations spatiales, c'est-à-dire comment s'ajuste la forme du chenal vers l'aval avec l'augmentation du débit à une fréquence donnée, par exemple le débit plein-bord d'une récurrence d'environ 2 ans (Leopold et Maddock 1953; Knighton 1998). Les relations de la géométrie hydraulique de l'amont vers l'aval ne sont pas encore bien comprises (Gleason 2015). On estime que les relations sont déterminées par la façon dont le système fluvial maintient son équilibre dynamique selon les processus d'érosion, de transport et de sédimentation (Knighton 1998; Eaton 2013). L'étude de la géométrie hydraulique se concentre principalement sur l'analyse des exposants, et les recherches s'intéressent davantage aux variations de la largeur et de la profondeur (Eaton 2013). Les exposants révèlent la nature et l'intensité des changements et permettent la comparaison entre les cours d'eau de différentes régions du monde. Généralement plus variables, les coefficients représentent la valeur absolue de W , Y_m et V_m par unité de débit pour une région physiographique donnée (Rhoads 1991; Reid et al. 2010). Cette variabilité reflète la multiplicité des paramètres ayant un contrôle sur l'évolution de la forme du chenal (Knighton 1998). Certains auteurs ont intégré d'autres variables pour préciser les relations de géométrie hydraulique, notamment Hey et Thorne (1986) avec la végétation riveraine, la granulométrie et la charge sédimentaire ou Lee et Julien (2006) avec la pente du lit et la granulométrie.

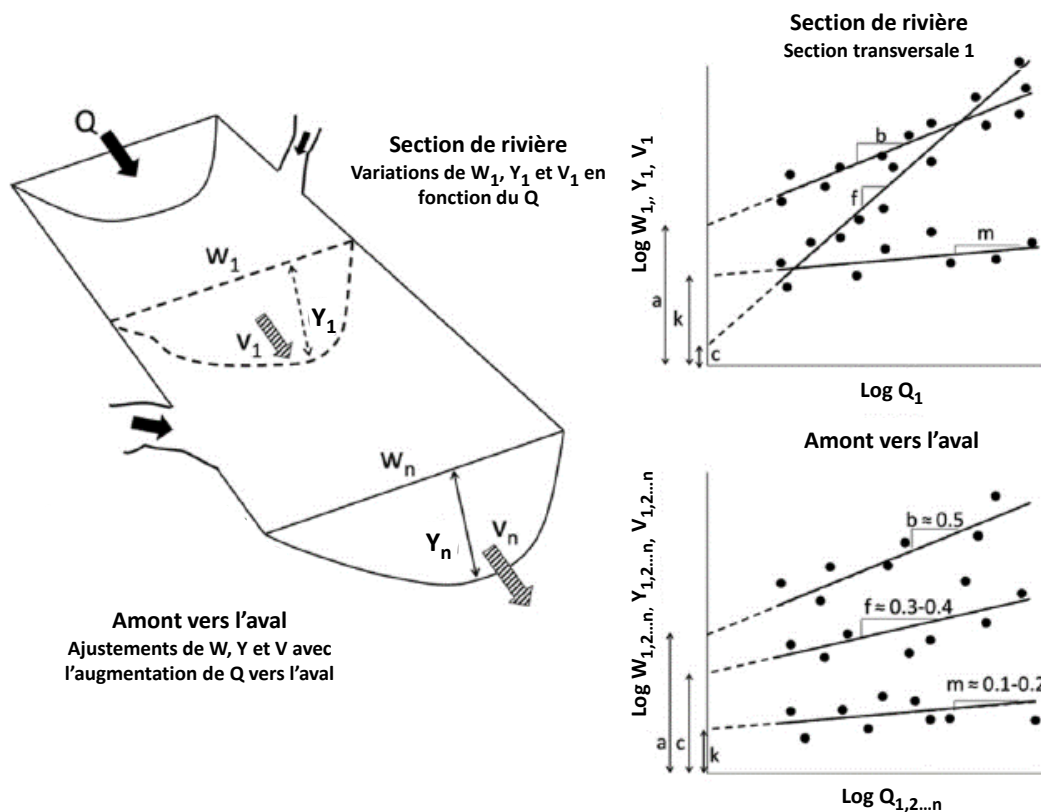


Figure 1. Schématisation des deux approches de géométrie hydraulique: à une section de rivière et de l'amont vers l'aval, adaptée de Gleason (2015)

Dans son étude sur des données de géométrie hydraulique de différentes régions à travers le monde, Park (1977) a observé des tendances générales différentes selon l'approche d'analyse employée. À une section de rivière, il a observé une augmentation plus rapide de la vitesse avec l'augmentation du débit ainsi qu'une faible variation de la largeur. De l'amont vers l'aval, il décrit une augmentation plus rapide de la largeur que de la profondeur avec l'augmentation du débit ainsi qu'une faible augmentation de la vitesse vers l'aval. Il importe de considérer les particularités locales et régionales pour expliquer adéquatement la variabilité des exposants : le type de matériel composant le lit et les berges du cours d'eau (Schumm 1960; Knighton 1974), la rugosité du périmètre mouillé (Ferguson 1986), la charge sédimentaire en suspension (Leopold et Maddock 1953), la charge sédimentaire de fond (Wilcock 1971; Hey et Thorne 1986), la magnitude des crues (Rhoads 1991), la forme du chenal ou le style fluvial (Knighton 1974; 1975; Richards 1976), la végétation riveraine (Andrews 1984; Bergeron et Roy 1985; Hey et Thorne 1986), l'utilisation

du territoire (Doll et al. 2002; Shepherd et al. 2011), l'environnement hydro-climatique (Park 1977; Anderson, Bledsoe, et Hession 2004) et la présence de processus fluvio-glaciels (Bergeron et Roy 1988; Dubé et Buffin-Bélanger 2006).

1.2 La géométrie hydraulique dans un contexte de restauration

Les courbes régionales de géométrie hydraulique représentent un outil important dans la compréhension des processus et des facteurs dominants dans l'évolution des systèmes fluviaux. Elles peuvent être un outil de planification, notamment pour la gestion par bassin versant (Anderson et al. 2004; Yuce et al. 2019) et l'évaluation d'habitats aquatiques (Jowett 1998), en apportant des connaissances quant à la morphologie moyenne des cours d'eau (Eaton 2013). Toutefois, les courbes peuvent avoir un large degré de variabilité dans une région où les conditions hydroclimatiques sont plus variables (Anderson et al. 2004). Les courbes de géométrie hydraulique sont aussi utilisées dans le cadre de projets de restauration de tronçons de rivières (Copeland et al. 2001; Shields et al. 2003; Bora et Goswami 2017), mais peu d'études se sont attardées au développement des courbes de géométrie hydraulique pour établir les formes de chenaux à restaurer à l'échelle d'une région ou d'une province. Récemment, en Ontario, Chandler et Amirault (2019) ont développé des courbes pour certaines régions physiographiques du sud de l'Ontario afin d'établir une méthode pour appliquer ces courbes à la restauration des cours d'eau. Au Québec, il n'existe pas actuellement de courbes régionales disponibles permettant d'établir des seuils de restauration. Seuls Dubé et Buffin-Bélanger (2006) et Leclerc et Lapointe (1994) se sont intéressés au développement de courbes régionales de géométrie hydraulique pour le Bas-Saint-Laurent et la région des Bois-Francs, respectivement.

Dans le contexte actuel, il est nécessaire d'élaborer des courbes régionales de géométrie hydraulique pour appuyer les travaux d'aménagement et de restauration de cours d'eau à prévoir. Avec l'entrée en vigueur de la LCMHH et son principe d'aucune perte nette des milieux humides et hydriques, on peut s'attendre à une augmentation de la fréquence des projets de restauration, particulièrement pour les cours d'eau en milieu agricole. En effet, ceux-ci ont fait l'objet d'un grand chantier depuis le début du 20e siècle. Environ 30 000 km de cours d'eau à méandres ont été linéarisés dans la vallée du Saint-Laurent et 14 000 km de chenaux linéaires de forme trapézoïdale ont été créés (Beaulieu 2007; Rousseau et Biron, 2009). Ces travaux ont permis d'améliorer la rentabilité des entreprises agricoles, mais représentent annuellement un

investissement considérable en matière d'entretien. En 2012 par exemple, 400 km linéaires de cours d'eau ont été entretenus (dragage) afin d'améliorer ou pour maintenir la capacité de drainage des terres agricoles. Il faut aussi souligner la récurrence de ces travaux où la moyenne provinciale est estimée à 30 ans (MDELCC et MFFP 2015). La linéarisation des cours d'eau entraîne une diminution de la rugosité, une homogénéisation des formes fluviales, une augmentation de la pente, de la vitesse et donc la compétence de l'écoulement, favorisant l'incision des cours d'eau et l'érosion de berges en période de crue (Frothingham et al.2002; Rousseau et Biron 2009). Il faut aussi souligner la détérioration de la qualité de l'eau et des habitats en raison du manque d'hétérogénéité morphologique, de l'augmentation de la charge sédimentaire en suspension et la perte de la végétation riveraine (Frothingham et al. 2002). En s'intéressant à la conception et l'entretien des cours d'eau agricoles au Québec, les observations de Volmar et al. (2017) mettent en lumière le fait que les dimensions des chenaux trapézoïdaux ne se basent pas sur des données scientifiques et ne respectent pas la morphologie des chenaux attendus pour une aire de drainage donnée (Figure 2). En effet, cette étude a permis de constater que la largeur des chenaux n'est pas ajustée en fonction de l'aire drainée (ou du débit) dans les plans de conception (Volmar et al. 2017).

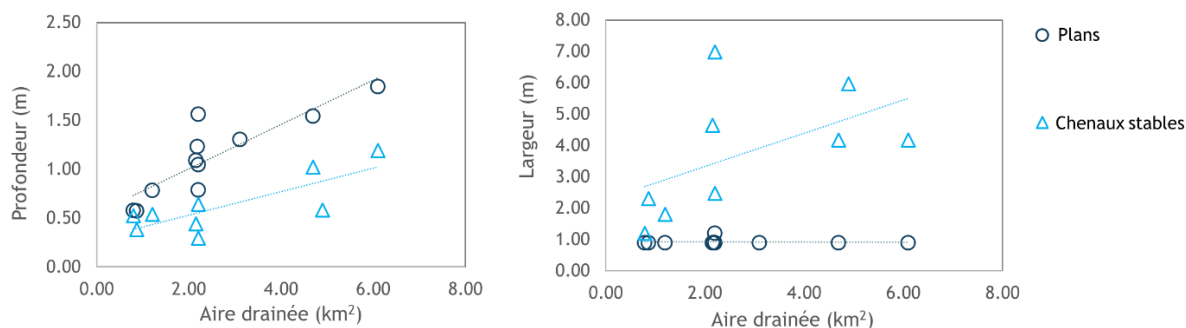


Figure 2. Morphologie des chenaux dans les plans d'ingénierie et des chenaux correspondant au concept de chenaux stables, tirée de Volmar et al. (2017)

Comme la conception des chenaux ne tient pas compte des lois de la géométrie hydraulique, l'aire de la section transversale peut être sous-évaluée ou surévaluée. En effet, une section transversale conçue trop petite peut entraîner un surcreusement à la base des structures alors qu'une conception

trop grande peut causer de l'aggradation ou de l'incision dans le chenal (Rhoads et Massey 2012; D'Ambrosio et al. 2014). Une approche de conception alternative, soit celle des chenaux à deux niveaux (Figure 3), représente un moyen de maintenir la fonction de drainage dans les champs et de restaurer une partie des services écosystémiques du milieu, ainsi qu'améliorer la stabilité du chenal sur le long terme (Powell et al. 2007; Rhoads et Massey 2012).

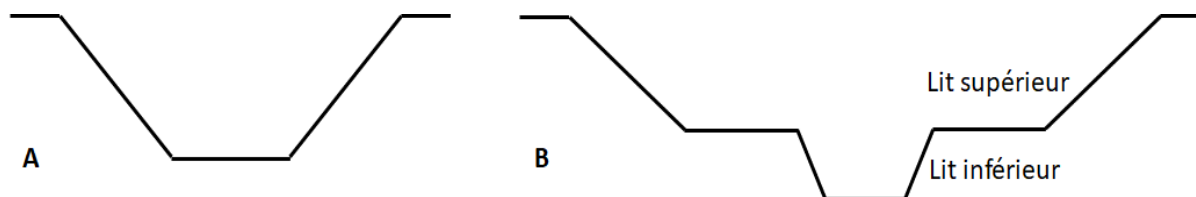


Figure 3. Représentation schématique d'un cours d'eau trapézoïdal (A) et d'un cours d'eau à deux niveaux (B)

L'intégration des connaissances en hydrogéomorphologie est un élément nécessaire pour garantir la pérennité et une certaine logique des interventions dans les milieux hydriques. Le développement des courbes de géométrie régionales permet d'établir, à partir des données de terrain, les dimensions adaptées au contexte physiographique selon le débit ou l'aire de drainage. Ainsi, il est possible de réduire les risques d'erreurs dans la conception des travaux de restauration (Chandler et Amirault, 2019). De plus, les courbes régionales devraient aider à réduire les coûts d'entretien, assurer une uniformité dans les travaux de restauration, améliorer la cohérence entre les projets, et engendrer des taux de réussite de conception à long terme plus élevés par rapport aux travaux récurrents nécessaires dans les cours d'eau aménagés (Chandler et Amirault, 2019). De plus, par le nouveau *Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement* (REAFIE) entré en vigueur en décembre 2020, le gouvernement du Québec reconnaît le fait et l'importance de maintenir ou rétablir le profil d'équilibre dynamique des cours d'eau en intégrant la notion de géométrie hydraulique pour les travaux d'entretien. Cela montre la pertinence de développer des courbes régionales pour guider le plus adéquatement possible les travaux en milieux hydriques au Québec.

2. Objectifs

L'objectif général de ce projet de recherche consiste à établir les courbes de géométrie hydraulique amont – aval pour trois régions physiographiques différentes, soit les Basses-Terres du Saint-Laurent, les Appalaches et la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, afin de soutenir les acteurs de l'eau dans la conservation et la restauration des milieux hydriques. Les courbes de géométrie hydraulique ont été développées dans des cours d'eau naturels (non anthropisés) et des cours d'eau modifiés (linéarisés et/ou dragués par exemple). Les courbes régionales seront particulièrement utiles dans les petits bassins versants en milieux agricoles où l'on retrouve peu de stations de jaugeage au Québec. Ultiment, ces données pourront servir de références dans les projets de restauration de cours d'eau en indiquant les dimensions d'équilibre (largeur et profondeur) des chenaux pour une région physiographique donnée.

Le projet de recherche comprend trois objectifs spécifiques permettant d'atteindre l'objectif général :

- 1) Récupérer et valoriser l'ensemble des données disponibles (débit, largeur, profondeur, vitesse, pente, granulométrie) et exploitables au Québec pour établir les courbes régionales de géométrie hydraulique pour une gamme de tailles de cours d'eau;
- 2) Établir des courbes régionales pour des cours d'eau naturels et anthropisés dans les trois régions physiographiques et dans différents contextes d'aménagement du territoire;
- 3) Effectuer une analyse des différences au niveau de la géométrie hydraulique des cours d'eau naturels versus anthropisés afin d'émettre des recommandations de restauration selon la région.

3. Méthodologie

Cette section présente d'abord les données concernant la géométrie hydraulique disponibles au Québec et pourquoi elles sont utilisables ou non. Ensuite, la méthode utilisée lors des campagnes terrain à l'été 2021 et 2022 est exposée. Le post-traitement appliqué aux données figure à la fin de cette section.

3.1 Données disponibles au Québec

Pour orienter les campagnes de terrain et les besoins pour le développement des courbes de géométrie hydraulique, une recension des données disponibles au Québec a été réalisée auprès des

acteurs potentiels détenant ce type de données. Bien qu'elles soient éparses et rares, il existe certaines données pour développer des courbes de géométrie hydraulique au Québec. Les travaux de recherche de l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) forment une bonne source de données pour les zones agricoles. La Direction principale des prévisions hydriques et de la cartographie (DPPHC) du Québec a également développé des relations de géométrie hydraulique à une station à proximité de certaines de leurs stations hydrométriques (Larouche-Tremblay et al. 2017). Aussi, Jérôme Dubé, auxiliaire d'enseignement et de recherche à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), a fourni les courbes amont – aval qu'il a développées dans trois bassins versants du Bas-Saint-Laurent ainsi que les données recueillies lors de son mémoire de Baccalauréat (Dubé et Buffin-Bélangier 2006).

3.1.1 Données de l'IRDA

Les données de l'IRDA proviennent de recherches sur la qualité des eaux de surface (Michaud et al. 2009a; 2017a; 2017b), la caractérisation hydrologique de ruisseaux (Michaud et al. 2020), le suivi de bassins versants expérimentaux (Michaud et al. 2009b) et le développement d'une méthode de prédiction du ruissellement et des débits de pointe (Michaud et al. 2014).

Malheureusement, les bases de données transmises sont difficilement utilisables pour les intégrer aux courbes de géométrie hydraulique. Les coordonnées géographiques des stations ne sont pas assez précises pour pouvoir les situer précisément dans l'espace, il y a des erreurs dans la toponymie des stations (p. ex. station qui portent le nom d'une autre, fichiers dans le mauvais dossier), ce qui engendre des erreurs potentielles trop élevées lors du traitement des données. Ainsi, il n'a pas été possible d'utiliser les bases de données récupérées auprès de l'IRDA, malgré les nombreux échanges en début de projet.

3.1.2 Données de la DPPHC

Les données de la DPPHC proviennent du projet sur la protection des prises d'eau potable (Larouche-Tremblay et al. 2017) dans lequel l'approche par la géométrie hydraulique à une station a été utilisée pour tenter de classifier les relations débit – vitesse. Les relations qui ont été développées ne sont cependant pas utilisables dans le présent projet puisqu'elles ont été calculées dans des sections transversales stables près de stations hydrométriques. Ces dernières sont souvent installées à proximité d'ouvrages anthropiques (p. ex. barrages, ponts) et dans des sections de rivières stables, c'est-à-dire avec absence de mobilité et d'ajustement des chenaux naturels. Pour

éviter un biais, ces données n'ont pas été utilisées dans les analyses. De plus, des données recueillies pour une analyse à une station ne sont pas nécessairement utilisables pour établir des relations de géométrie hydraulique amont – aval.

3.1.3 Données de l'UQAR

Dans le cadre de son mémoire de baccalauréat en géographie en 2006, Jérôme Dubé a développé des modèles régionaux de géométrie hydraulique pour trois bassins versants du Bas-Saint-Laurent. L'étude s'est concentrée sur l'ajustement des seuils graveleux en utilisant une approche amont-aval à l'échelle des bassins versants. Au total, 59 sections transversales ont été réalisées dans 11 rivières différentes situées dans les bassins versants des rivières Trois-Pistoles, Rimouski et Mitis. Ces données permettent d'obtenir un large éventail d'aires de drainages, allant de 10 km² à 1805 km². Elles ont été incluses dans nos analyses.

3.2 Données recueillies par l'UQAC (LERGA)

Dans le cadre de ce projet, les campagnes de terrain de 2021 et 2022 ont permis de visiter et caractériser 171 sites à l'échelle de la province. De ces sites, 65 sont situés dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, 34 au Saguenay-Lac-Saint-Jean et 72 dans les Appalaches. Les sites visités comprennent autant des segments de cours d'eau « naturels » que des segments linéarisés en contexte agricole. Pour des raisons de différence dans la géologie et la lithologie des rives nord et sud du fleuve Saint-Laurent, la région des Basses-Terres-du-Saint-Laurent a été scindée en deux parties, soit les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord (32 sites) et les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud (33 sites). La Figure 4 présente la localisation des sites de l'UQAC (LERGA) et de l'UQAR qui ont été utilisés dans les analyses et la production des courbes de géométrie hydraulique.

3.2.1 Caractérisation des sites

Pour chaque site, un tronçon ayant les mêmes paramètres de contrôle et processus dominants a été délimité. En s'inspirant de la méthodologie présentée par Reid et al. (2010), plusieurs (≥ 3 lorsque c'est possible) sections transversales systématiquement distancées d'une valeur correspondant à deux fois la largeur du chenal au niveau plein bord ont été mesurées à l'intérieur du tronçon. Le niveau plein bord a été identifié à partir d'indices morphologiques tels que les encoches d'érosion, les laisses de crues ou la mise en surplomb de la végétation riveraine.

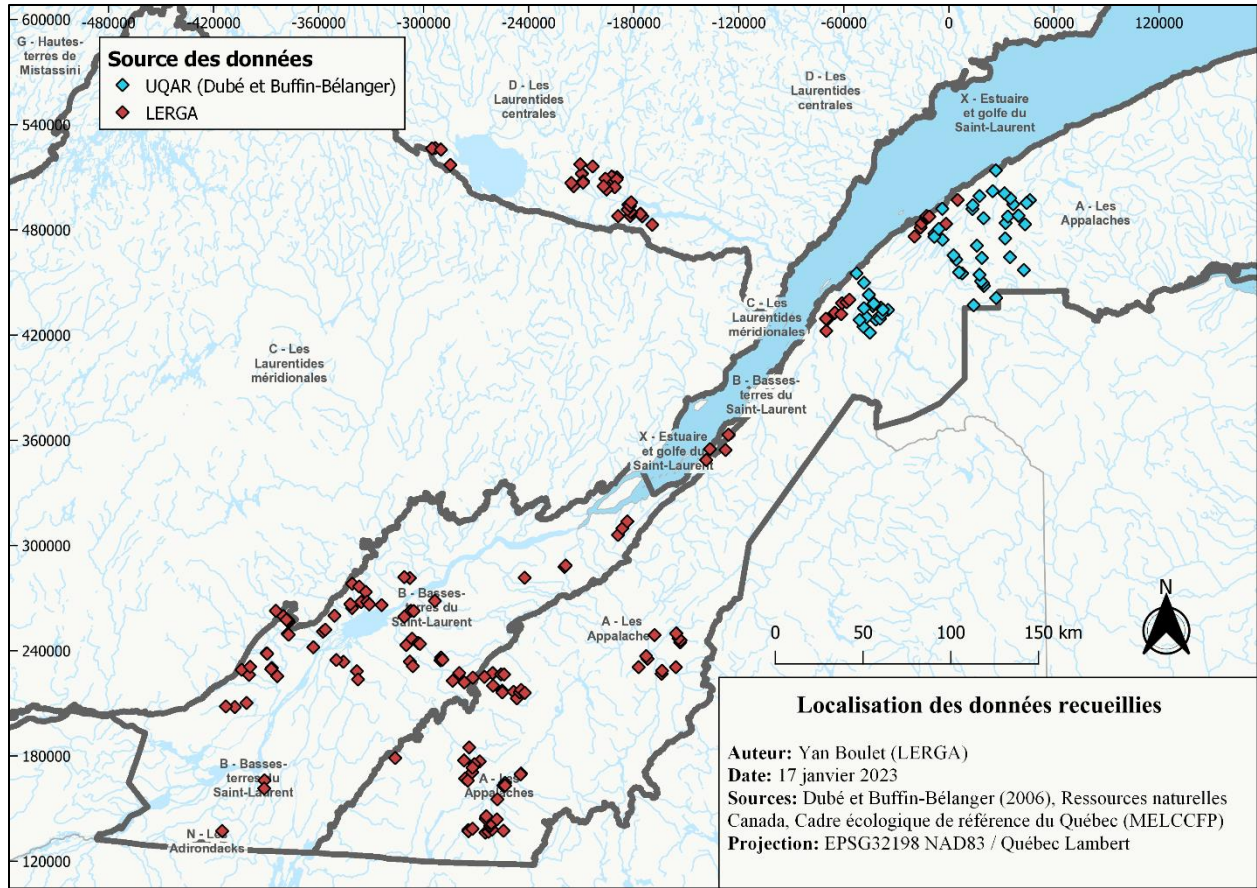


Figure 4. Carte de localisation des sites

Dans un cours d'eau naturel, le débit plein bord (Q_{pb}) est équivalent au débit efficace, considéré comme étant le débit dominant (récurrence de 1,5 à 2 ans), soit celui auquel s'ajuste la forme du chenal (débit potentiellement morphogène). La forme de chaque section transversale a été relevée à l'aide d'un GPS différentiel (DGPS), permettant d'obtenir la valeur moyenne de la largeur (W_{pb}) et la profondeur moyenne (Y_m) au niveau plein-bord du tronçon. Pour l'ensemble du tronçon, les différentes composantes du coefficient de rugosité ont été évaluées pour pouvoir calculer la vitesse moyenne de l'écoulement à partir du coefficient n de Manning :

$$(5) \quad V_m = \frac{Rh^{2/3} \times S^{1/2}}{n}$$

Où V_m est la vitesse moyenne (m/s), Rh le rayon hydraulique (m), S la pente du cours (m/m) d'eau et n le coefficient de rugosité de Manning. Il est possible de calculer le n de Manning à partir des composantes présentées dans le Tableau 1 avec l'équation suivante :

$$(6) (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * n_5$$

Les valeurs de n en fonction de la région physiographiques sont présentées dans la Figure 5.

Tableau 1. Composantes du coefficient de rugosité de Manning (Arcement et Schneider 1989)

Caractéristiques	Composante	Valeurs
Matériel	Terre	0.020
	Roc	0.025
	Gravier fin	0.024
	Gravier grossier	0.028
Irrégularités	Absentes	0.000
	Faibles	0.005
	Modérées	0.010
	Importantes	0.020
Variations de la section	Graduelles	0.000
	Alternance occasionnelle	0.005
	Alternance fréquente	0.01 - 0.015
Obstructions	Négligeables	0.000
	Faibles	0.010 - 0.015
	Appréciables	0.020 - 0.030
	Importantes	0.040 - 0.060
Végétation	y < 3-4 hauteur de végétation	0.005 - 0.010
	y < 2 hauteur de végétation	0.010 - 0.025
	y = 1 hauteur de végétation	0.025 - 0.050
	y < 1/2 hauteur de végétation	0.050 - 0.100
Degré de sinuosité	Faible 1.0 - 1.2	1.00
	Modéré 1.2 - 1.5	1.15
	Sévère > 1.5	1.30

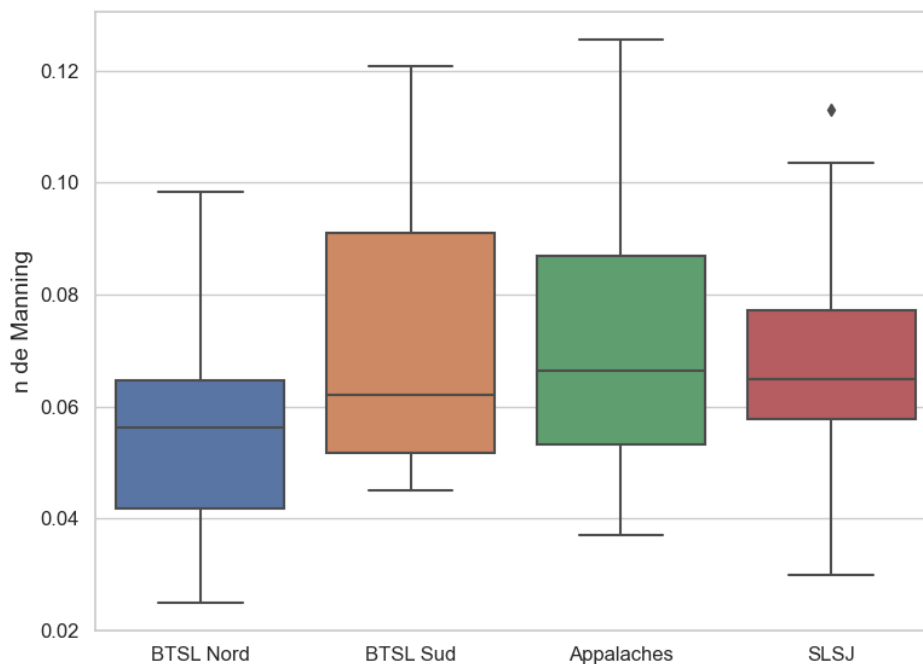


Figure 5. Coefficient de rugosité de Manning en fonction de la région physiographique

3.2.2 Traitement des données

L'aire de drainage (Figure 6) de chacun des sites a été calculée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) issu des données LiDAR du ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) qui ont été rééchantillonnées à 5 mètres de résolution et le réseau hydrologique de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ). Ce sont les outils provenant de *Whitebox Tools* (Lindsay 2014) qui ont été utilisés pour le prétraitement des MNT et le calcul de l'aire drainée :

1. *Fillburn* pour brûler le réseau hydrologique de la GRHQ
2. *BreachDepressions* pour briser les cuvettes
3. *D8pointer* pour obtenir la direction de l'écoulement
4. *D8FlowAccumulation* pour ajuster la localisation des sites sur le réseau hydrographique et corriger les erreurs sur le MNT
5. *Watershed* pour délimiter l'aire de drainage en amont des sites

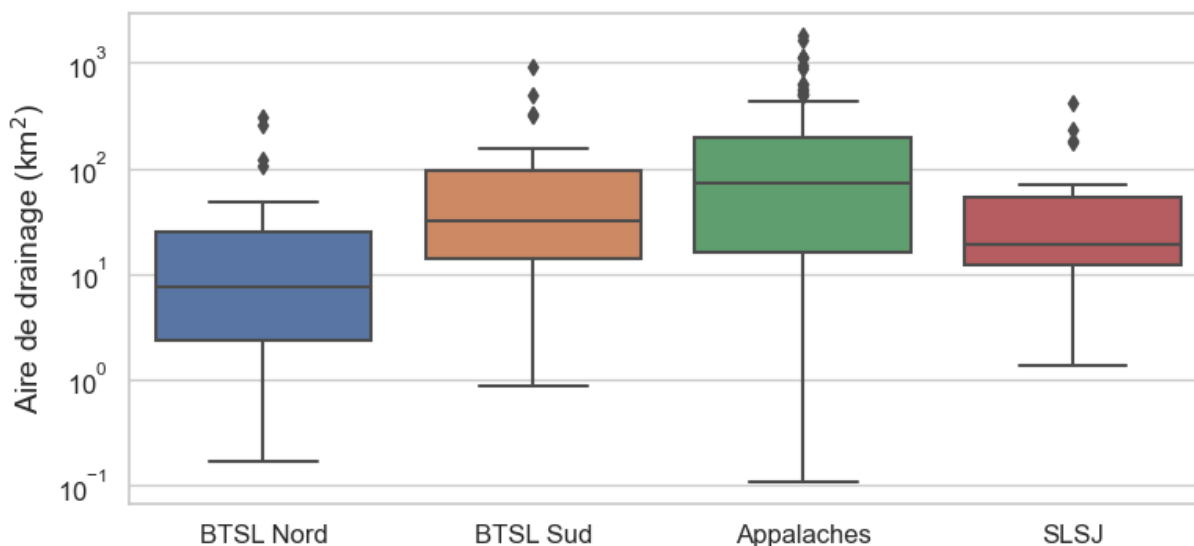


Figure 6. Aire de drainage de tous les sites en fonction de la région physiographique

Ensuite, pour chaque polygone généré, les données d'utilisation du sol du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) ont été extraites et le pourcentage de chacune des classes calculé (Figure 7). Les classes sont issues d'un rééchantillonnage des valeurs originales pour obtenir uniquement les classes pertinentes pour le projet de recherche. Par exemple, la classe « forestier (faible) » correspond aux arbustaies, friches, coupes et régénérations.

Pour l'ensemble du tronçon, la valeur de la pente (Figure 8) a été extraite de la base de données du cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) lorsque la donnée était disponible, autrement elles ont été calculées à partir des données LiDAR du ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) à une résolution de 1 mètre.

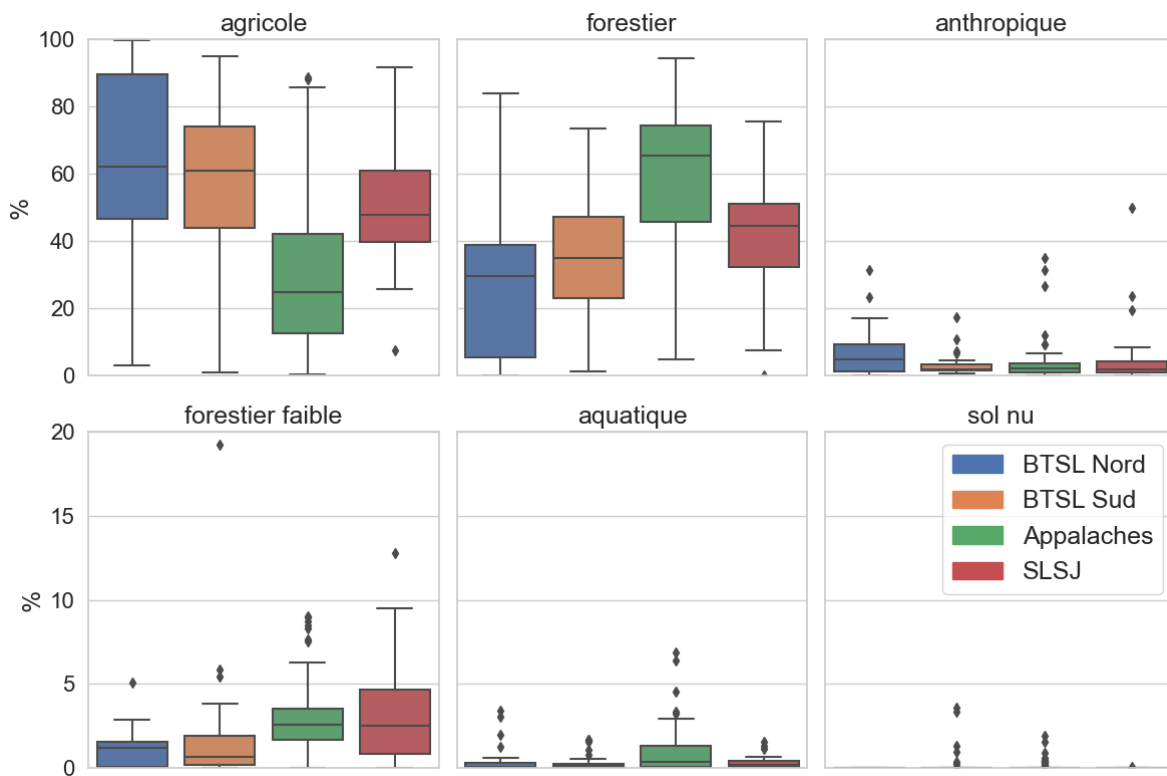


Figure 7. Utilisation du sol en fonction de la région physiographique pour les données de l'UQAC. L'axe vertical a été ajusté de 0 à 20% pour la rangée du bas pour mieux visualiser la distribution des données

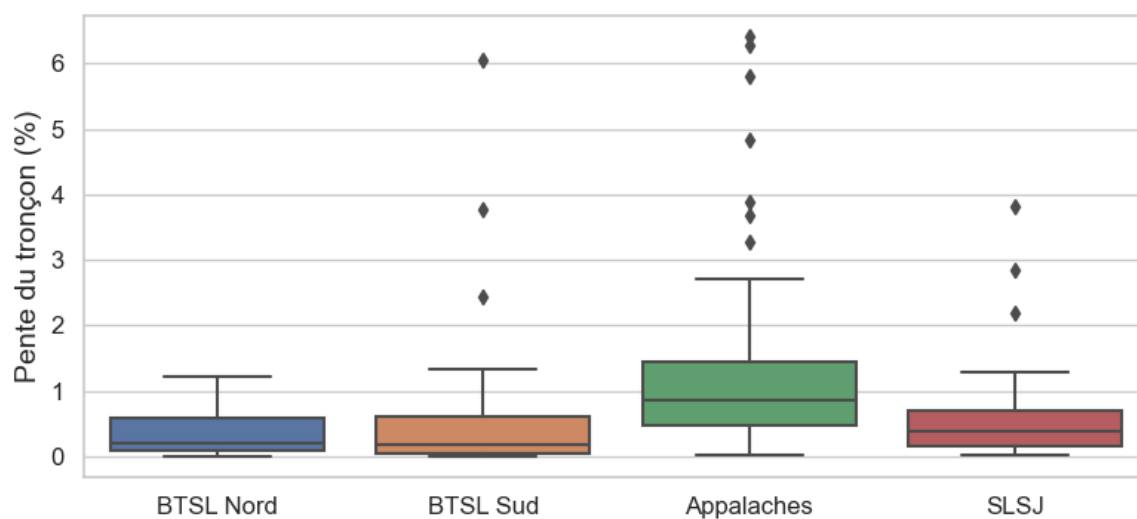


Figure 8. Pente du tronçon pour tous les sites

Les profils des sections transversales ont été calculés par référencement linéaire dans le logiciel QGIS à partir des données mesurées au DGPS. La valeur moyenne des variables morphométriques de tous les transects a été calculée pour obtenir une valeur pour chaque site (Figure 9).

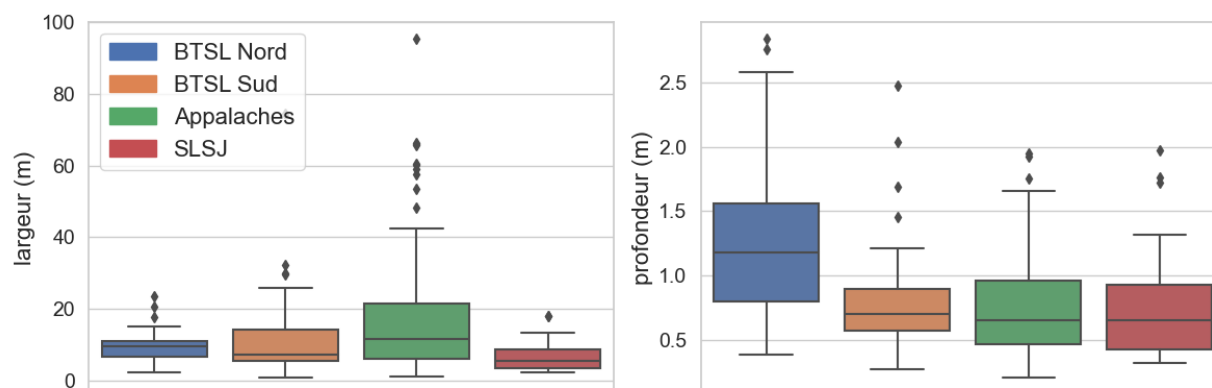


Figure 9. Profondeurs et largeurs du niveau plein bord des cours d'eau de tous les sites en fonction de la région physiographique

Le cours d'eau de chacun des sites a été classifié comme étant soit linéarisé ou non-linéarisé pour pouvoir les distinguer dans les relations de géométrie hydraulique. Le terme non-linéarisé a été préféré au terme « naturel » pour qualifier les cours d'eau n'ayant pas été linéarisés puisqu'il ne s'agit pas d'un milieu complètement naturel dans la plupart des cas. Par exemple, dans certains cours d'eau qualifiés de non-linéarisés, la bande riveraine est absente ou insuffisante, ce qui pourrait avoir un impact sur la géométrie du chenal. La Figure 10 présente la distribution des classes en fonction de la région physiographique.

Les courbes de géométrie hydraulique peuvent être développées à partir du débit plein bord ou de l'aire de drainage, car ces deux variables sont fortement corrélées. Il existe toutefois des avantages et des désavantages à présenter les résultats en fonction de l'aire drainée ou du débit, alors les deux types de courbes sont présentés dans la section des résultats. Les courbes issues de l'aire de drainage devraient tout de même être préférées à celles issues des débits estimés puisque l'aire drainée a été mesurée alors que le débit a été estimé à partir de l'équation de Manning et les incertitudes qui y sont associées. De plus, le débit estimé par l'équation de Manning inclut la profondeur moyenne, ce qui crée un problème d'autocorrélation.

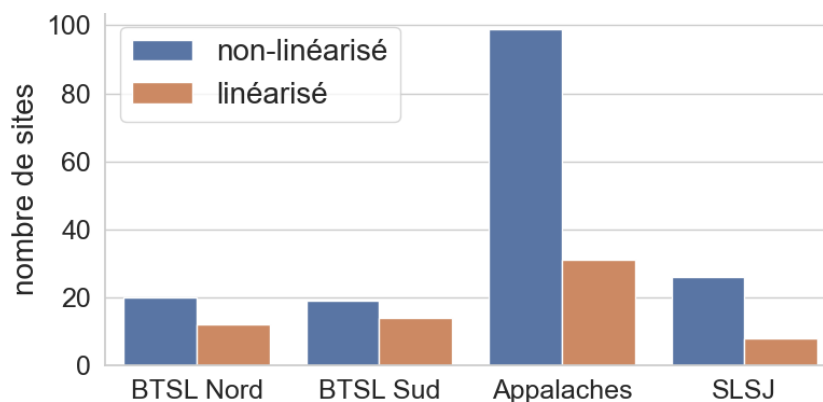


Figure 10. Distribution de la classification des types de cours d'eau par région physiographique

4. Résultats

4.1 Relations de géométrie hydraulique avec le débit plein bord estimé

Cette section présente les courbes de géométrie hydraulique calculées à partir du débit plein bord estimé par l'équation de Manning pour la largeur et la profondeur dans chaque région physiographique. Le Tableau 2 présente la valeur des exposants, des coefficients des équations, du coefficient de détermination (R^2) et de la valeur-p des courbes de puissance obtenues par la régression linéaire des logarithmes des paramètres de la géométrie hydraulique. La Figure 11 illustre les courbes de géométrie hydraulique en faisant la distinction entre les cours d'eau linéarisés et non-linéarisés pour chaque région physiographique ainsi qu'une courbe de toutes les régions physiographiques combinées. Des figures illustrant les courbes de chacune des régions figurent aussi en annexe du rapport.

La région des Appalaches est celle où le nombre de sites est le plus élevé à la fois pour les cours d'eau non-linéarisés que pour ceux qui sont linéarisés. Pour les deux dimensions (largeur et profondeur) et pour les deux types de cours d'eau (linéarisé et non-linéarisé), les relations entre la dimension et le débit plein bord estimé sont statistiquement significatives (valeur-p < 0,05). Dans cette région physiographique, les coefficients des deux dimensions sont plus élevés pour les cours d'eau non-linéarisés. Pour ce qui est des exposants, celui de la largeur est plus faible dans les cours d'eau non-linéarisés alors que celui de la profondeur est similaire, peu importe le type de cours d'eau.

Tableau 2. Exposants et coefficients des relations de géométrie hydraulique (largeur (b) et profondeur (f)) issus des régressions linéaires avec le débit plein bord estimé. En rouge : relations non significatives

Région	dimension	n	non-linéarisé				linéarisé				
			coeff	exp	R ²	p	n	coeff	exp	R ²	p
App	largeur	99	5,587	0,428	0,75	0,000	31	4,044	0,480	0,63	0,000
	profondeur		0,455	0,220	0,62	0,000		0,417	0,223	0,37	0,000
BTSLN	largeur	20	5,881	0,273	0,27	0,019	12	5,046	0,226	0,68	0,001
	profondeur		0,646	0,357	0,58	0,000		0,577	0,308	0,77	0,000
BTSLS	largeur	19	6,505	0,489	0,80	0,000	14	5,825	0,227	0,27	0,056
	profondeur		0,578	0,254	0,54	0,000		0,654	0,192	0,42	0,012
SLSJ	largeur	26	5,040	0,463	0,48	0,000	8	3,672	0,511	0,69	0,011
	profondeur		0,527	0,514	0,62	0,000		0,540	0,245	0,36	0,116
Prov	largeur	164	5,526	0,430	0,73	0,000	65	4,500	0,297	0,50	0,000
	profondeur		0,545	0,201	0,43	0,000		0,504	0,281	0,57	0,000

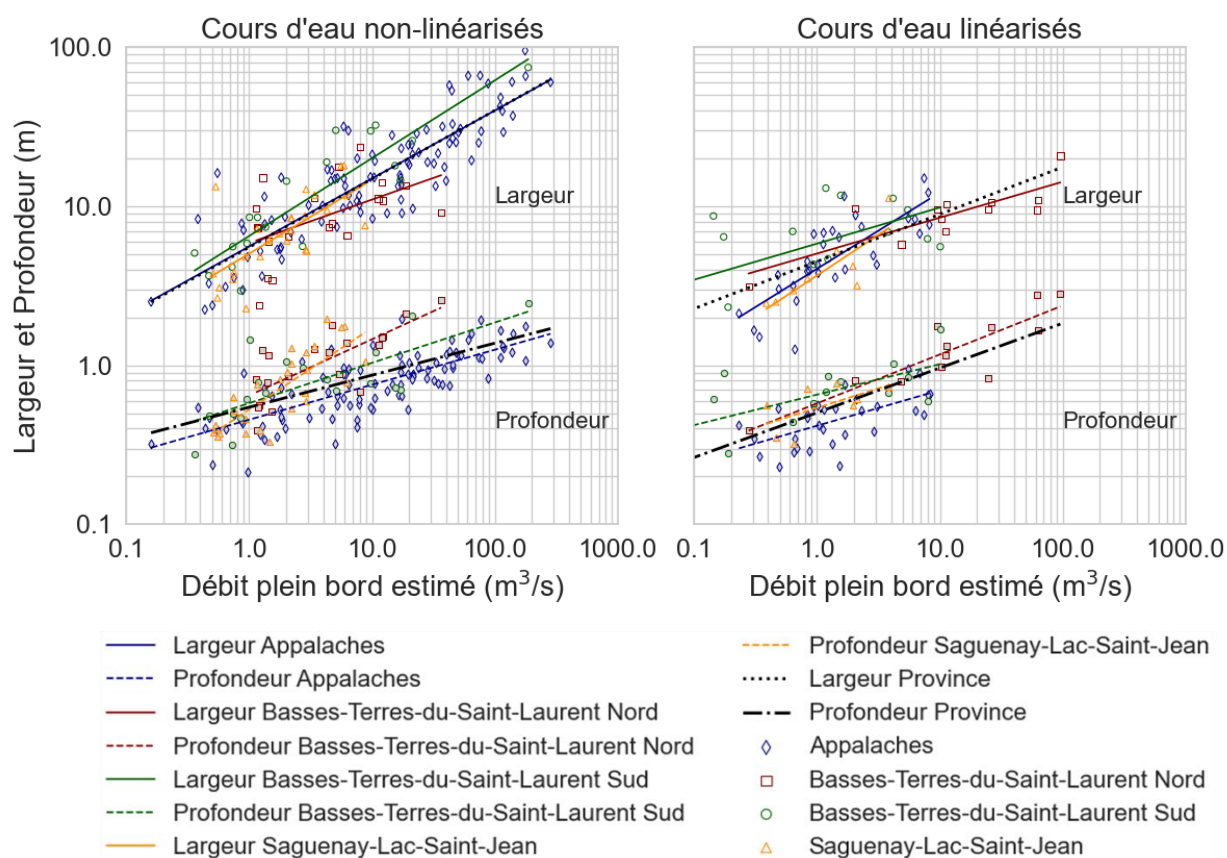


Figure 11. Courbes de géométrie hydraulique pour chaque région physiographique ainsi qu'une courbe composite pour la province en relation avec le débit plein bord estimé

Les données mesurées dans la région des Basses-Terres-du-Saint-Laurent sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent donnent des relations mitigées. Le coefficient de détermination (R^2) pour la relation entre la largeur des cours d'eau non-linéarisés et le débit plein bord estimé est faible en comparaison aux autres régions physiographiques. Néanmoins, à l'instar des Appalaches, les relations sont statistiquement significatives dans tous les cas. De plus, les coefficients sont ici aussi plus élevés dans les cours d'eau non-linéarisés que dans les cours d'eau linéarisés, ce qui indique que dans ces derniers cas la vitesse augmente plus rapidement de l'amont vers l'aval (puisque la somme des exposants est de 1). À l'inverse des Appalaches, les exposants sont plus élevés dans les cours d'eau non-linéarisés ce qui veut dire qu'à la base, les cours d'eau sont plus larges et plus profonds (coefficients) et que ces dimensions augmentent plus rapidement avec l'augmentation du débit que les cours d'eau linéarisés (exposants).

Dans le cas des Basses-Terres-du-Saint-Laurent sur la rive sud du fleuve, les relations sont significatives pour la largeur et la profondeur des cours d'eau non-linéarisés et pour la profondeur des cours d'eau linéarisés. Toutefois, la relation avec la largeur des cours d'eau linéarisés n'est pas significative, bien que la valeur-p soit proche du seuil de 0,05. Cela est causé probablement par la dispersion des données de part et d'autre de la courbe (R^2 de 0,27). Le coefficient de la largeur est plus élevé et celui de la profondeur plus faible pour les cours d'eau non-linéarisés. Pour la largeur et la profondeur, les exposants sont plus élevés dans les cours d'eau non-linéarisés. Les cours d'eau sont donc généralement plus larges et moins profonds au départ (coefficient), mais s'élargissent et s'incisent plus rapidement avec l'augmentation du débit plein bord estimé (exposants) dans les cours d'eau non-linéarisés.

Au Saguenay-Lac-Saint-Jean, les relations entre les dimensions du cours d'eau et le débit plein bord estimé sont significatives dans tous les cas sauf pour la profondeur des cours d'eau linéarisés. Dans cette région physiographique, le coefficient de la relation pour la largeur est plus élevé dans les cours d'eau non-linéarisés alors que celui de la profondeur est équivalent dans les deux types de cours d'eau. L'exposant de la relation avec la largeur est plus faible dans les cours d'eau non-linéarisés alors que celui de la profondeur est plus élevé. Il semble donc que les cours d'eau non-linéarisés du Saguenay-Lac-Saint-Jean aient tendance à s'inciser plutôt que de s'ajuster en largeur avec l'augmentation du débit lorsqu'on les compare à ceux des autres régions physiographiques.

Il y a deux régions physiographiques où les exposants des relations avec la largeur sont plus faibles que ceux des relations avec la profondeur : les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord et le Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les cours d'eau de ces régions s'ajustent plus rapidement en profondeur qu'en largeur, alors que ceux des Appalaches et des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud s'ajustent en largeur plus rapidement qu'en profondeur avec l'augmentation du débit. En général, les coefficients sont plus élevés dans les cours d'eau non-linéarisés que dans les cours d'eau linéarisés.

Pour ce qui est des courbes de géométrie hydraulique combinées, les relations sont d'abord fortes et significatives (valeur- $p < 0,001$). Comme dans les relations issues de chaque région physiographique, les coefficients sont plus élevés à la fois pour la largeur et pour la profondeur des cours d'eau non-linéarisés. L'exposant de la relation entre la largeur et le débit plein bord estimé est plus élevé dans les cours d'eau non-linéarisés alors que celui de la profondeur est plus faible. Il semble donc qu'au Québec les cours d'eau non linéarisés aient tendance à s'élargir avec l'augmentation du débit alors que les cours d'eau linéarisés ont tendance à s'inciser plus que les cours d'eau non-linéarisés.

4.2 Relations de géométrie hydraulique avec l'aire de drainage

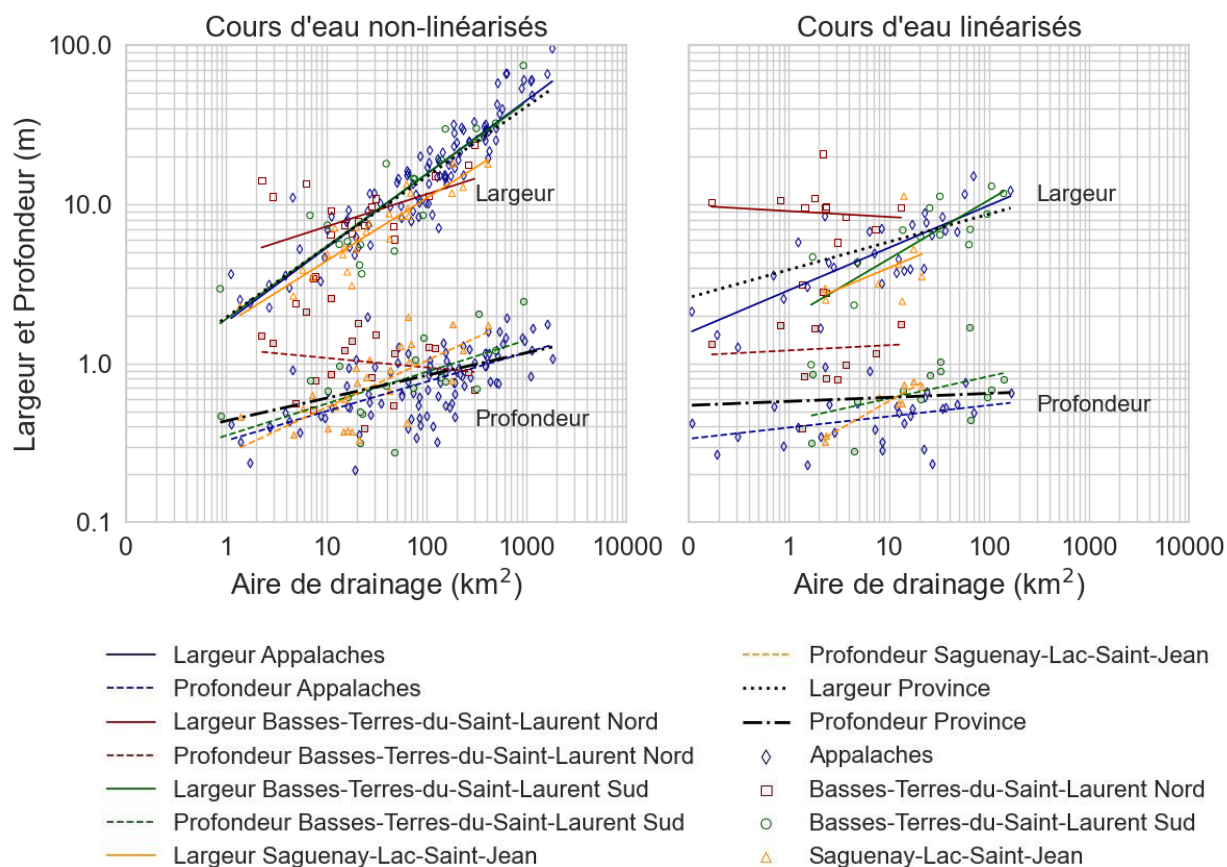
Cette section contient les courbes de géométrie hydraulique développées en fonction de l'aire de drainage en amont de chacun des sites. Les coefficients et les exposants obtenus figurent dans le Tableau 3.

La principale différence avec les courbes issues des débits plein bord estimés vient du fait que les valeurs- p sont plus élevées (donc moins significatives) dans presque toutes les relations des cours d'eau linéarisés. Seule les relations de largeur dans les Appalaches et les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud et la profondeur dans le Saguenay Lac-Saint-Jean sont significatives. Cependant, à l'exception de la profondeur des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord, toutes les relations sont statistiquement significatives pour les cours d'eau non-linéarisés.

Alors que les coefficients des relations de géométrie hydraulique avec le débit plein bord estimé des cours d'eau non-linéarisés ont tendance à être plus élevés que ceux des cours d'eau linéarisés, l'inverse se produit pour les relations calculées à partir de l'aire de drainage. Les exposants suivent toutefois la même tendance en étant plus élevés dans les cours d'eau non-linéarisés, comme observé dans les relations avec le débit.

Tableau 3. Exposants et coefficients des relations de géométrie hydraulique (largeur (b) et profondeur (f)) issus des régressions linéaires avec l'aire de drainage. En rouge : relations non significatives

Région	dimension	n	non-linéarisé				linéarisé				
			coeff	exp	R ²	p	n	coeff	exp	R ²	p
App	largeur	99	1,827	0,464	0,86	0,000	31	2,881	0,267	0,63	0,000
	profondeur		0,327	0,185	0,42	0,000		0,394	0,070	0,12	0,057
BTSLN	largeur	20	4,537	0,203	0,24	0,027	12	9,061	-0,036	0,01	0,783
	profondeur		1,239	-0,060	0,03	0,491		1,206	0,033	0,00	0,846
BTSLS	largeur	19	1,903	0,455	0,75	0,000	14	1,931	0,371	0,64	0,001
	profondeur		0,352	0,200	0,36	0,006		0,437	0,139	0,20	0,111
SLSJ	largeur	26	1,769	0,396	0,85	0,000	8	2,170	0,264	0,21	0,248
	profondeur		0,268	0,294	0,49	0,000		0,254	0,357	0,89	0,000
Prov	largeur	164	1,949	0,442	0,79	0,000	65	3,878	0,175	0,22	0,000
	profondeur		0,435	0,143	0,22	0,000		0,577	0,025	0,01	0,555



Il est difficile de comparer les cours d'eau non-linéarisés à ceux qui sont linéarisés puisque plus de la moitié des courbes sont non significatives pour ces derniers. Toutefois, certaines régions physiographiques se distinguent des autres pour les cours d'eau non-linéarisés. Par exemple, pour les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord, l'exposant de la courbe de largeur est deux fois plus faible que ceux des autres régions alors que son coefficient est deux fois plus élevé. Aussi, l'exposant de la courbe de profondeur du Saguenay-Lac-Saint-Jean est plus de 30% plus élevé que ceux des autres régions physiographiques. Il semble que les cours d'eau des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord soient plus larges que les autres en amont, mais l'ajustement de la largeur avec l'augmentation de l'aire de drainage est plus faible que dans les autres régions physiographiques. Les cours d'eau du Saguenay-Lac-Saint-Jean ont plutôt tendance à s'ajuster plus rapidement en profondeur qu'ailleurs au Québec.

Pour ce qui est des courbes provinciales, elles sont toutes significatives sauf pour la profondeur des cours d'eau linéarisés. Les coefficients des courbes sont plus faibles et les exposants plus élevés dans les cours d'eau non-linéarisés que dans les cours d'eau linéarisés. Il semble que les cours d'eau non-linéarisés aient tendance à ajuster leurs dimensions plus rapidement que les cours d'eau linéarisés avec l'augmentation de l'aire de drainage.

5. Discussion

Cette section présente les raisons justifiant l'utilisation des courbes de géométrie hydraulique développées à partir de l'aire de drainage plutôt que du débit plein bord estimé, compare les relations obtenues avec d'autres études et discute de l'impact de la linéarisation des cours d'eau sur la géométrie hydraulique.

5.1 L'utilisation de l'aire de drainage

Les courbes régionales de géométrie hydraulique qui sont proposées dans ce rapport pour les projets de restauration sont celles qui ont été développées en fonction de l'aire de drainage. C'est d'abord parce que l'erreur dans l'aire de drainage est moindre que celle du débit, particulièrement dans les petits cours d'eau en milieu agricole où il y a très peu de stations de jaugeage. Dans ces contextes où l'installation de stations demande des efforts considérables, la seule option est d'employer l'équation de Manning, mais il y a une part de subjectivité importante dans l'estimation du n de Manning. De plus, cela engendre un problème d'autocorrélation dans les relations avec le débit, car le débit est égal à la largeur multipliée par la profondeur et les vitesses d'écoulement.

Ainsi, cette vitesse est estimée à partir du coefficient de rugosité qui comporte des incertitudes, du rayon hydraulique qui dépend du périmètre mouillé (et donc des dimensions du chenal utilisées dans les courbes de géométrie hydraulique) et de la pente. C'est en partie ce qui explique le plus grand nombre de courbes statistiquement significatives avec le débit qu'avec l'aire drainée.

5.2 Limites de l'utilisation de l'équation de Manning

5.2.1 Biais potentiel de l'opérateur

L'estimation du coefficient de rugosité (n) est dépendante de l'expérience de l'opérateur qui l'évalue. Comme les valeurs du coefficient ont été obtenues par quatre personnes différentes, il peut y avoir un biais dans certaines composantes en fonction de qui était présent sur le terrain, comme illustré à la Figure 13. De plus, il peut être difficile de déterminer précisément le n , particulièrement pour les cours d'eau de petite et moyenne tailles (Kim et al. 2010). Lorsque la pente est inférieure à 1%, un changement de 25% dans le coefficient de rugosité peut faire varier le débit calculé de 20% (Wohl 1998).

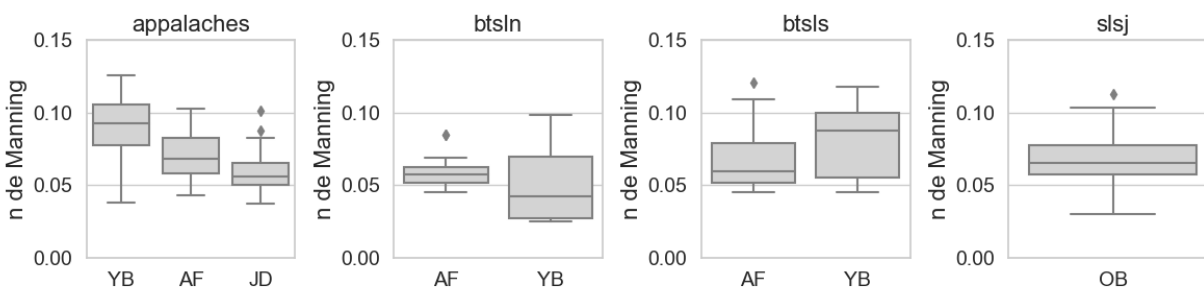


Figure 13. Valeurs du coefficient de rugosité en fonction des différents opérateurs (YB, AF, JD et OB) pour chaque région physiographique

5.2.2 Évaluation du niveau plein bord

Les cours d'eau étudiés pour développer les courbes de géométrie hydraulique ont une taille relativement modeste puisque l'objectif est d'appuyer les projets de restauration de cours d'eau qui concernent en général les petits cours d'eau; une distribution des tailles de bassin versant qui répond à cet objectif était donc nécessaire. Les différents marqueurs physiques du niveau plein bord sont plus difficiles à identifier dans les petits cours d'eau puisqu'ils ont tendance à avoir une

plus grande variabilité dans leurs dimensions hydrauliques au niveau plein bord que les plus grands cours d'eau (Mulvihill et al. 2009). Les indices sont alors généralement moins évidents et plus diffus, rendant l'identification du niveau plein bord complexe. Pour obtenir le débit plein bord à partir de l'équation de Manning, le coefficient de rugosité a été évalué pour un niveau plein bord. L'identification de ce niveau représente l'étape la plus cruciale du calcul de la vitesse. L'incertitude associée à l'évaluation du niveau plein bord s'ajoute donc à celle du coefficient de rugosité et se répercute sur l'utilisation de l'équation de Manning pour le calcul de la vitesse d'écoulement au niveau plein bord.

5.2.3 Coefficient de Manning et incertitude

Une des composantes importantes de l'équation de Manning est le coefficient de rugosité. Puisque celui-ci découle de l'identification du niveau plein bord et de l'évaluation des paramètres de rugosité, les incertitudes qui y sont associées peuvent être grandes. Les vitesses d'écoulement calculées à partir de la formule de Manning sont exactes par un facteur de deux, c'est-à-dire que la valeur réelle se situe entre la moitié et le double de ce qui est calculé à partir de l'équation, dans seulement 52% des cas selon certains auteurs (Ferguson 2010). La combinaison de tous les facteurs énumérés ci-haut fait en sorte que dans un contexte où il n'y a pas de station de jaugeage pour estimer le débit, l'utilisation des courbes de géométrie hydraulique découlant de l'aire de drainage est, selon nous, plus fiable. De plus, il s'agit généralement de la méthode recommandée pour le développement de courbes de géométrie hydraulique dans les contextes de restauration de cours d'eau (Chandler et Amirault 2019).

5.3 Comparaison avec d'autres études

Cette sous-section présente une comparaison des résultats obtenus dans d'autres études effectuées au Canada et aux États-Unis afin de positionner les courbes québécoises comparativement à d'autres courbes de régions similaires.

5.3.1 Au Canada

Les exposants des courbes de géométrie hydraulique peuvent être comparés à ceux obtenus dans différentes régions. Bien que la littérature soit assez limitée au Québec, des courbes prédictives amont – aval ont été développées dans la région des Bois-Francs pour prédire les largeurs et profondeurs des chenaux en fonction du débit (Leclerc et Lapointe 1994). Cette étude souligne entre autres que l'identification du niveau plein bord constitue la source principale d'erreur dans

les mesures des chenaux, que la variabilité climatique et géologique de chacune des régions physiographiques a un impact sur le développement des équations et que l'aire de drainage donne des relations équivalentes lorsqu'utilisée comme variable indépendante. Puisque leurs courbes ont été développées au Québec, l'environnement est similaire à ce que l'on retrouve dans le présent projet. Le Tableau 4 compare les exposants obtenus dans la région des Bois-Francs à ceux issus des relations de géométrie hydraulique que nous avons développées.

Tableau 4. Comparaison des exposants de géométrie hydraulique de cette étude avec ceux de Leclerc et Lapointe (1994) dans les Bois-Francs (variable indépendante : débit plein bord). En rouge : relations non significatives

	n	largeur		profondeur	
		exposant	r2	exposant	r2
<i>Ce projet (2023)</i>					
Appalaches	99	0,428	0,75	0,220	0,62
Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord	20	0,273	0,27	0,354	0,58
Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud	19	0,489	0,80	0,254	0,54
Saguenay-Lac-Saint-Jean	26	0,463	0,48	0,514	0,62
<i>Leclerc et Lapointe (1994)</i>					
Bois-Francs	20	0,660	0,96	0,360	0,80

La région des Bois-Francs est située de part et d'autre de la faille Logan qui délimite les Basses-Terres-du-Saint-Laurent et les Appalaches. On pourrait donc s'attendre à avoir des valeurs d'exposant qui se situent entre celles qui ont été obtenues pour ces deux régions. Ce n'est pourtant pas le cas. Cette différence pourrait être due à la méthode utilisée pour estimer le débit plein bord à partir du coefficient de rugosité. Étant donné que les sites d'étude étaient situés dans des cours d'eau un peu plus larges, il était possible d'utiliser des stations de jaugeage à proximité pour obtenir des débits plus fiables. On sait aussi que la superficie drainée joue un rôle dans la géométrie des chenaux et que les cours d'eau étudiés par Leclerc et Lapointe (1994) ont une taille qui se situe entre 83 et 10 016 km² avec une médiane à 916 km². En comparaison, les superficies des cours d'eau étudiés dans ce projet se situent entre 0,1 et 1805 km² avec une médiane à 31,5 km², largement en deçà des leurs. Cette disparité dans les exposants obtenus à partir du débit plein bord

estimé par le n de Manning renforce le message que l'utilisation de l'aire de drainage est préférable dans ce cas-ci. Ce constat renforce aussi l'idée que des stations de mesures de débits dans les petits cours d'eau au Québec sont manquantes et des efforts devraient être mis en place afin de mieux documenter ce type d'environnement fluvial.

Une étude récente effectuée dans des cours d'eau alluviaux et semi-alluviaux de petite et moyenne tailles (0,5-100 km²) dans le sud de l'Ontario présente des relations de géométrie hydraulique dans trois régions différentes, soit celles de Waterloo, de Peel et de York-Durham (Chandler et Amirault 2019). Même si le climat et la géologie étaient similaires dans les trois régions, les exposants obtenus diffèrent grandement. Selon les auteurs, la dispersion des données (R^2) serait due à la nature des berges, particulièrement le type de végétation qui y est implantée. Le Tableau 5 compare les relations obtenues à celles de cette étude.

Tableau 5. Exposants des courbes de géométrie hydraulique de cette étude comparés à ceux de Chandler et Amirault (2019) en Ontario (variable indépendante : aire de drainage). Une courbe composite sans les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord a aussi été développée considérant que la courbe de profondeur pour cette région n'était pas significative. En rouge : relations non significatives

	n	largeur		profondeur	
		exposant	r^2	exposant	r^2
<i>Ce projet (2023)</i>					
Appalaches	99	0,464	0,86	0,185	0,42
Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord	20	0,203	0,24	-0,060	0,03
Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud	19	0,455	0,75	0,200	0,36
Saguenay-Lac-Saint-Jean	26	0,396	0,85	0,294	0,49
Composite avec BTSLN (QC)	164	0,442	0,79	0,143	0,22
Composite sans BTSLN (QC)	144	0,471	0,84	0,187	0,39
<i>Chandler et Amirault (2019)</i>					
Waterloo	8	0,46	0,86	0,300	0,67
Peel	9	0,37	0,94	0,330	0,91
York-Durham	7	0,28	0,91	0,420	0,94
Composite (ON)	24	0,38	0,87	0,330	0,82

Les régions de Peel et York-Durham consistent en une plaine, à l'instar des Basses-Terres-du-Saint-Laurent et du Saguenay-Lac-Saint-Jean, alors que celle de Waterloo a un relief plus marqué

qui peut être comparé aux Appalaches. Les exposants indiquent que les cours d'eau du Québec s'élargissent plus rapidement avec l'augmentation de l'aire drainée et s'approfondissent plus lentement que ceux du sud de l'Ontario. Les régions au relief plus important ont des cours d'eau s'ajustant en largeur plus qu'en profondeur et c'est ce que les résultats montrent pour les Appalaches et la région de Waterloo.

5.3.2 Aux États-Unis

Les courbes de géométrie hydraulique sont largement utilisées aux États-Unis. En effet, Bieger et al. (2015) ont recensé un peu plus de cinquante rapports réalisés durant les cinquante dernières années pour un total de 1310 sites dans l'objectif d'obtenir des courbes de géométrie hydraulique pour chaque division physiographique des États-Unis (Tableau 6).

De plus, différents états choisissent d'améliorer les courbes existantes à l'aide des MNT provenant des données LiDAR. C'est notamment le cas du Vermont qui a financé un projet pour bonifier les courbes de géométrie hydraulique existantes pour améliorer la conception d'ouvrages comme les ponts et ponceaux (Underwood et al. 2021). Ce type de projet devrait produire un meilleur rapport coûts – bénéfices à long terme pour les ouvrages nouvellement construits ou à construire. Le Tableau 7 présente les exposants obtenus de la revue de littérature de Bieger et al. (2015) et du rapport de Underwood et al. (2021) pour les comparer avec ceux obtenus au Québec.

Les exposants obtenus au Québec semblent être comparables à ceux obtenus à l'échelle nationale aux États-Unis. La seule différence est pour la profondeur au Québec, où l'augmentation avec l'aire de drainage est inférieure comparativement aux États-Unis. Il semble que les cours d'eau aient moins tendance à s'inciser et semblent plutôt s'ajuster en largeur lorsque l'aire de drainage augmente au Québec comparativement aux cours d'eau des États-Unis.

Tableau 6. Sources utilisées par Bieger et al. (2015) pour leur étude sur les relations de géométrie hydraulique au niveau plein bord

References	Number of Sites	States
Andrews (1984)	24	Colorado
Babbit (2005)	10	Tennessee
Brockman (2010)	29	Kentucky
Castro and Jackson (2001)	75	Idaho, Oregon, Washington
Chaplin (2005)	52	Maryland, Pennsylvania
Cinotto (2003)	14	Maryland, Pennsylvania
Doll <i>et al.</i> (2003)	16	North Carolina
Dudley (2004)	10	Maine
Dutnell (2000)	48	Kansas, Missouri, Oklahoma, Texas
Eash (1993)	111	Iowa
Elliott and Cartier (1986)	18	Colorado
Emmett (1975)	39	Idaho
Harman <i>et al.</i> (1999)	13	North Carolina
Harman <i>et al.</i> (2000)	14	North Carolina
Haucke and Clancy (2011)	12	Wisconsin
Howell (2009)	8	California
Jaquith and Kline (2006)	20	Vermont
Johnson and Padmanabhan (2010); Padmanabhan and Johnson (2010)	22	Minnesota, North Dakota
Keaton <i>et al.</i> (2005)	41	Maryland, Virginia, West Virginia
King <i>et al.</i> (2004)	33	Idaho
Krstolic and Chaplin (2007)	8	Maryland, Virginia
Lawlor (2004)	41	Montana
Leopold and Wolman (1957)	19	Maryland, Montana, Nebraska, Wyoming
Lotspeich (2009)	17	Virginia
Mater <i>et al.</i> (2009)	20	Kentucky
McCandless (2003a)	14	Maryland, Pennsylvania
McCandless (2003b)	14	Delaware, Maryland
McCandless and Everett (2002)	25	Maryland
McPherson (2011)	16	Tennessee
Messinger (2009)	37	West Virginia
Metcalf (2004)	26	Alabama, Florida, Georgia
Mistak and Stille (2008)	5	Michigan, Wisconsin
Moody <i>et al.</i> (2003)	183	Arizona, New Mexico, Navajo Nation
Mulvihill and Baldigo (2007)	12	New York
Mulvihill <i>et al.</i> (2005)	14	New York
Mulvihill <i>et al.</i> (2006)	10	New York
Mulvihill <i>et al.</i> (2007)	16	New York
Miller and Davis (2003); Mulvihill <i>et al.</i> (2009)	14	New York
Osterkamp <i>et al.</i> (1982)	17	Kansas
Parola <i>et al.</i> (2005a)	13	Kentucky
Parola <i>et al.</i> (2005b)	5	Kentucky
Parola <i>et al.</i> (2007)	20	Kentucky
Parrett <i>et al.</i> (1983)	209	Montana
Pruitt (2001)	6	Georgia
Pugh <i>et al.</i> (2008)	9	Arkansas
Rachol and Boley-Morse (2009)	40	Michigan
Sherwood and Huitger (2005)	50	Ohio
Sweet and Geratz (2003)	24	North Carolina
Vesely <i>et al.</i> (2008)	26	Kentucky
Westergard <i>et al.</i> (2005)	16	New York
Williams (1978)	51	Arizona, Colorado, Kentucky, Massachusetts, New Mexico, North Dakota, Oregon, Pennsylvania, Tennessee, Utah, West Virginia, Wisconsin, Wyoming

Tableau 7. Exposants des courbes de géométrie hydraulique issues de la littérature aux États-Unis en comparaison avec ceux de cette étude (variable indépendante : aire de drainage). En rouge : relations non significatives

	<i>n</i>	largeur		profondeur	
		<i>exposant</i>	<i>r2</i>	<i>exposant</i>	<i>r2</i>
<i>Ce projet (2023)</i>					
Appalaches	99	0,464	0,86	0,185	0,42
Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord	20	0,203	0,24	-0,060	0,03
Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud	19	0,455	0,75	0,200	0,36
Saguenay-Lac-Saint-Jean	26	0,396	0,85	0,294	0,49
Composite avec BTSLN (QC)	164	0,442	0,79	0,143	0,22
Composite sans BTSLN (QC)	144	0,471	0,84	0,187	0,39
<i>Underwood et al (2021)</i>					
Vermont	30	0,448	0,89	0,331	0,81
<i>Bieger et al (2015)</i>					
Laurentian Upland	6	0,308	0,54	0,202	0,37
Atlantic Plain	61	0,363	0,84	0,323	0,75
Appalachian Highlands	387	0,415	0,87	0,287	0,77
Interior Plains	425	0,351	0,75	0,191	0,38
Interior Highlands	7	0,121	0,27	0,267	0,52
Rocky Mountain System	288	0,435	0,76	0,225	0,49
Intermontane Plateau	88	0,415	0,62	0,329	0,58
Pacific Mountain System	48	0,399	0,74	0,294	0,50
Composite Bieger et al (2021) (É-U)	1310	0,352	0,66	0,213	0,43

5.4 Impact de la linéarisation sur la géométrie hydraulique

5.4.1 Ajustement des cours d'eau (exposants)

Pour toutes les courbes statistiquement significatives développées à partir de l'aire de drainage, l'ensemble des exposants de largeurs sont plus élevés pour les cours d'eau non-linéarisés. Pour la profondeur, seul le Saguenay-Lac-Saint-Jean a une valeur d'exposant plus élevée pour les cours d'eau linéarisés. Les cours d'eau au tracé naturel s'ajustent par des processus

hydrogéomorphologiques alors que les cours d'eau nécessitant des interventions fréquentes pour les maintenir linéaires s'ajustent plus lentement à cause de ces interventions.

5.4.2 Boucle d'entretien des cours d'eau agricoles

Les résultats montrent que le chenal d'un cours d'eau linéarisé n'a pas les mêmes dimensions que celui d'un cours d'eau au tracé « naturel » pour une même aire de drainage. Puisque les dimensions ne représentent pas ce qui se trouve naturellement sur le territoire, ces cours d'eau doivent subir des interventions fréquentes pour maintenir leur forme dans un état constant de déséquilibre, puisque les processus naturels reprendraient inévitablement le dessus si on cessait d'intervenir. L'abandon de ces interventions répétées pourrait potentiellement mener au rétablissement du cours d'eau dans lequel elles ont été effectuées (Jerin et al. 2023).

Les impacts négatifs de la linéarisation des cours d'eau agricoles sont bien connus. Non seulement les interventions sont onéreuses, mais elles causent aussi une perte de la biodiversité (Brooker 1985; Kennedy et Turner 2011), une augmentation de la vitesse d'écoulement favorisant les processus d'érosion (Srivastava et al. 2017), une diminution de la recharge en eau souterraine (Schoof 1980) et augmentent le risque d'inondation pouvant causer des pertes de cultures et des dommages substantiels aux infrastructures situées en aval du chenal linéarisé (Schoof 1980).

Il est important de limiter ces impacts en accompagnant les agriculteurs dans la création et le maintien d'une bande riveraine saine tout en limitant les interventions de linéarisation de cours d'eau pour préserver la qualité de l'eau et des habitats, protéger les terres agricoles situées en aval des aléas fluviaux tout en maintenant leur productivité et leur fertilité sur le long terme.

Néanmoins, il est parfois inévitable dans le contexte actuel de devoir modifier la morphologie d'un cours d'eau. C'est le cas par exemple lorsque les drains des terres agricoles se jettent directement dans le chenal et que ce dernier subit de l'aggradation. Ces travaux récurrents font en sorte que les cours d'eau s'ajustent constamment à partir d'un écoulement qui n'est pas naturel. Il n'est alors jamais en « équilibre dynamique ». Dans le cas où il est nécessaire de creuser dans le cours d'eau, il est indispensable d'utiliser tous les outils disponibles pour limiter les impacts des travaux. Les courbes de géométrie hydraulique permettent de calculer les dimensions adaptées au contexte plutôt que de revenir aux plans d'origine qui étaient souvent basés sur des considérations pratiques, par exemple la largeur de 3 pieds d'une pelle mécanique (Volmar et al., 2017).

6. Conclusion

Cette conclusion fait un bref retour sur les objectifs du projet, résume les principaux résultats et présente des recommandations pour les suites potentielles à ce projet.

6.1 Retour sur les objectifs

L'objectif principal du projet, soit de développer des courbes de géométrie hydraulique amont – aval pour différentes régions physiographiques du Québec, a été atteint. Les courbes de géométrie hydraulique issues de ce projet procurent des informations essentielles sur le fonctionnement des cours d'eau, en fournissant des modèles que les acteurs de l'eau pourront dorénavant utiliser dans le cadre de différents projets, d'analyses de site et/ou pour la restauration des cours d'eau selon la région physiographique. Ces courbes peuvent donc être utilisées pour améliorer les projets de conservation et de restauration des milieux hydriques et répondre à un besoin concret pour les gestionnaires de cours d'eau.

En revanche, le premier objectif spécifique pour la recension des données au Québec n'a pas été atteint à la hauteur de ce qui était désiré. Les données pour développer des courbes de géométrie hydraulique existent au Québec, mais elles sont de multiples sources qui ont des façons différentes d'organiser l'information et la mise en commun de ces données s'est avérée impossible. Des erreurs figuraient dans certaines bases de données alors qu'il était impossible de situer d'autres données dans l'espace, ou alors les données nécessaires au développement des courbes étaient tout simplement absentes. Il est donc primordial de développer une base de données commune pour recenser et uniformiser l'ensemble des données touchant aux rivières du Québec.

Aussi, l'installation de stations de jaugeage sur une trentaine de sites d'études n'a pas pu être réalisée étant donné le contexte sanitaire (Covid) en début de projet. En effet, ce contexte ne permettait pas l'organisation de formations pour les organismes régionaux sur l'entretien et la collecte des données. La méthode utilisée pour estimer le débit plein bord avec l'équation de Manning est utile en l'absence de données mesurées, mais elle ne semble pas assez précise dans le contexte de ce projet où les sites d'étude étaient majoritairement dans des aires de drainage plus faibles. Cependant, comme l'objectif des courbes de géométrie au Québec est la création et la restauration des milieux hydriques, l'utilisation de l'aire de drainage est appropriée et facilitante pour les acteurs de l'eau.

Finalement, les deux autres objectifs spécifiques ont été atteints, soit d'établir les courbes régionales pour des cours d'eau naturels et anthropisés et d'analyser les différences au niveau de la géométrie hydraulique pour émettre des recommandations adaptées.

6.2 Principaux messages

Trois principaux messages découlent de ce projet de recherche:

- 1) Il y a une différence marquée dans les courbes de géométrie hydraulique entre les cours d'eau non-linéarisés et linéarisés. Cette différence est causée surtout par les interventions répétées qui maintiennent les cours d'eau dans des dimensions qui ne sont pas en équilibre avec les conditions naturelles.
- 2) Même pour les cours d'eau non-linéarisés, les coefficients de détermination peuvent être faibles lorsqu'on utilise le débit ou l'aire drainée. C'est particulièrement le cas dans les zones agricoles des Basses-Terres-du-Saint-Laurent. Malheureusement, il s'agit d'une des régions où les courbes devraient être utilisées plus fréquemment considérant que ce sont des cours d'eau souvent ciblés pour les projets de restauration. Dans le contexte de projets futurs pour le développement des courbes de géométrie hydraulique, un effort devra être fait pour améliorer les courbes obtenues dans les zones agricoles où les pentes sont relativement faibles, entraînant une incertitude plus grande dans la délimitation de l'aire de drainage.
- 3) Les courbes de géométrie hydraulique présentées sont similaires à celles qu'on trouve en Ontario ou aux États-Unis. Comme c'est le cas ailleurs, elles devraient être utilisées comme un outil parmi d'autres pour améliorer la conception des ouvrages ou des chenaux lors des projets de restauration de cours d'eau.

6.3 Recommandations

Les courbes de géométrie hydraulique représentent un outil pour déterminer les dimensions qu'un chenal devrait avoir pour un débit donné, une aire de drainage ou lors d'un projet de restauration par exemple. Une analyse des processus locaux et des caractéristiques du cours d'eau à restaurer devrait accompagner l'utilisation des courbes lors de la conception des projets. Il s'agit donc de modèles pouvant aider à la prise de décision pour la restauration des morphologies fluviales pour une région donnée. L'augmentation du nombre de sites pour certaines régions et le développement

de courbes dans des régions non couvertes par ce projet permettraient de développer des outils plus précis pour les projets de restauration.

Il existe aussi des données LiDAR topo-bathymétriques qui comblent les lacunes du LiDAR traditionnel en utilisant une longueur d'onde supplémentaire (laser infrarouge classique et un laser vert en plus) qui pénètre plus facilement dans l'eau. Les communautés métropolitaines de Montréal (CMM) et de Québec (CMQ) ont acquis ce type de données sur leur territoire. Celles-ci pourraient être testées et exploitées pour développer des courbes de géométrie hydraulique adaptées à des milieux ou des tailles de bassin versant spécifiques.

L'absence de données de débits dans les petits cours d'eau est un obstacle qui devra être surmonté pour améliorer les analyses hydrologiques à l'échelle provinciale. L'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCC 2022) est un pas dans la bonne direction, mais les données qui y figurent sont limitées aux cours d'eau de plus de 50 km². Il faudrait idéalement développer des approches pour l'estimation des mesures de débits dans les petits cours d'eau (stations gérées par les OBV, MRC, DPPHC, méthodes alternatives par caméra vidéo par exemple).

Aussi, de nouvelles données de largeur seront disponibles sous peu dans la base de données du CRHQ : celles du lit mineur et du niveau plein bord. Ces données, combinées à celles pouvant être obtenues par LiDAR topobathymétrique, ainsi qu'une validation terrain adéquate, pourraient grandement améliorer la méthode et le nombre de cours d'eau utilisés pour le développement de nouvelles courbes de géométrie hydraulique améliorées.

Avec ces nouvelles courbes de géométrie hydraulique, le Québec se dote d'un outil supplémentaire pour la restauration des cours d'eau et pour appuyer les acteurs de l'eau dans la gestion intégrée des bassins versants. Il serait pertinent de poursuivre le développement des courbes de géométrie hydraulique afin de couvrir d'autres régions au Québec et pour améliorer le niveau de précision de certaines courbes. Il s'agit réellement de données majeures pour le Québec et qui permettront de répondre à plusieurs enjeux liés à nos milieux hydriques.

Bibliographie

- Anderson, R. J., B. P. Bledsoe, et W. C. Hession. 2004. « Width of Streams and Rivers in Response to Vegetation, Bank Material, and Other Factors1 ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 40 (5): 1159-72. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01576.x>.
- Andrews, E. D. 1984. « Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado ». *GSA Bulletin* 95 (3): 371-78. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<371:BEAHGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<371:BEAHGO>2.0.CO;2).
- Arcement, George J., et Verne R. Schneider. 1989. « Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains ». USGS Numbered Series 2339. *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. Vol. 2339. Water Supply Paper. U.S. G.P.O. ; For sale by the Books and Open-File Reports Section, U.S. Geological Survey,. <https://doi.org/10.3133/wsp2339>.
- Beaulieu, R. 2008. « Historique de l'aménagement des cours d'eau agricoles ». Saint-Hyacinthe.
- Bergeron, N., et A. Roy. 1985. « Le rôle de la végétation sur la morphologie d'un petit cours d'eau ». *Géographie physique et Quaternaire* 39 (3): 323-26. <https://doi.org/10.7202/032613ar>.
- Bergeron, Normand et Roy, André G. 1988. « Les effets d'un embâcle sur la morphologie du lit d'une confluence de cours d'eau ». *Géographie physique et Quaternaire* 42 (2): 191-96. <https://doi.org/10.7202/032725ar>.
- Bieger, Katrin, Hendrik Rathjens, Peter M. Allen, et Jeffrey G. Arnold. 2015. « Development and Evaluation of Bankfull Hydraulic Geometry Relationships for the Physiographic Regions of the United States ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 51 (3): 842-58. <https://doi.org/10.1111/jawr.12282>.
- Bora, M., et D. C. Goswami. 2017. « Channel morphology and hydraulic geometry of River Kolong, Nagaon district, Assam, India: a study from the standpoint of river restoration ». *Current Science* 113 (4): 743-51. <https://doi.org/10.18520/cs/v113/i04/743-751>.
- Brooker, M. P. 1985. « The Ecological Effects of Channelization ». *The Geographical Journal* 151 (1): 63-69. <https://doi.org/10.2307/633280>.
- Chandler, Trevor, et Heather Amirault. 2019. « Regional curves to support stream restoration initiatives in Southern Ontario ». *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 44 (1): 65-78. <https://doi.org/10.1080/07011784.2018.1503067>.
- Copeland, R. R., D. N. McComas, C. R. Thorne, P. J. Soar, et M. M. Jonas. 2001. « Hydraulic Design of Stream Restoration Projects ». Engineer Research and Development Center, Vicksburg MS Coastal and Hydraulicslab.
- D'Ambrosio, J. L., L. R. Williams, M. G. Williams, J. D. Witter, et A. D. Ward. 2014. « Geomorphology, Habitat, and Spatial Location Influences on Fish and Macroinvertebrate Communities in Modified Channels of an Agriculturally-Dominated Watershed in Ohio, USA ». *Ecological Engineering* 68 (juillet): 32-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.037>.
- Doll, Barbara A., D. E. Wise-Frederick, C. M. Buckner, S. D. Wilkerson, W. A. Harman, R. E. Smith, et J. Spooner. 2002. « Hydraulic Geometry Relationships for Urban Streams Throughout the Piedmont of North Carolina ». *Journal of the American Water Resources Association* 38 (3): 641-51. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb00986.x>.
- Dubé, J., et T. Buffin-Bélanger. 2006. « Courbes régionales de géométrie hydraulique pour les rivières du Bas-St-Laurent, Québec ».

- Dunne, T., et L. B. Leopold. 1978. *Water in environmental planning*. Macmillan.
- Eaton, B. C. 2013. « Hydraulic geometry: empirical investigations and theoretical approaches ». *Treatise on geomorphology* 9: 313-29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00243-8>.
- Ferguson, R. I. 1986. « Hydraulics and Hydraulic Geometry ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 10 (1): 1-31. <https://doi.org/10.1177/030913338601000101>.
- Ferguson, Rob. 2010. « Time to Abandon the Manning Equation? » *Earth Surface Processes and Landforms* 35 (15): 1873-76. <https://doi.org/10.1002/esp.2091>.
- Frothingham, K. M., B. L. Rhoads, et E. E. Herricks. 2002. « A Multiscale Conceptual Framework for Integrated Ecogeomorphological Research to Support Stream Naturalization in the Agricultural Midwest ». *Environmental Management* 29 (1): 16-33. <https://doi.org/10.1007/s00267-001-0038-7>.
- Gleason, C. J. 2015. « Hydraulic Geometry of Natural Rivers: A Review and Future Directions ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 39 (3): 337-60. <https://doi.org/10.1177/0309133314567584>.
- Hey, R. D., et C. R. Thorne. 1986. « Stable Channels with Mobile Gravel Beds ». *Journal of Hydraulic Engineering* 112 (8): 671-89. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:8\(671\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:8(671)).
- Jerin, Tasnuba, Robert T. Pavlowsky, Marc R. Owen, Joshua W. Hess, Hannah N. Alkier, et Katie A. Grong. 2023. « Anthropogenic Channel Network Development in Forested Watersheds by Recent Stream Channelization Practices in Mark Twain National Forest, Missouri Ozarks ». *Geomorphology* 426 (avril): 108601. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108601>.
- Jowett, I. G. 1998. « Hydraulic Geometry of New Zealand Rivers and Its Use as a Preliminary Method of Habitat Assessment ». *Regulated Rivers: Research & Management* 14 (5): 451-66. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199809\)14:5<451::AID-RRR512>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199809)14:5<451::AID-RRR512>3.0.CO;2-1).
- Kennedy, Thomas L., et Thomas F. Turner. 2011. « River Channelization Reduces Nutrient Flow and Macroinvertebrate Diversity at the Aquatic Terrestrial Transition Zone ». *Ecosphere* 2 (3): art35. <https://doi.org/10.1890/ES11-00047.1>.
- Kim, Ji-Sung, Chan-Joo Lee, Won Kim, et Yong-Jeon Kim. 2010. « Roughness Coefficient and Its Uncertainty in Gravel-Bed River ». *Water Science and Engineering* 3 (2): 217-32. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.010>.
- Knighton, A. D. 1974. « Variation in Width-Discharge Relation and Some Implications for Hydraulic Geometry ». *GSA Bulletin* 85 (7): 1069-76. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1974\)85<1069:VIWRAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1974)85<1069:VIWRAS>2.0.CO;2).
- . 1975. « Variations in at-a-station hydraulic geometry ». *American Journal of Science* 275 (février): 186-218. <https://doi.org/10.2475/ajs.275.2.186>.
- . 1998. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. 2^e éd. London: Routledge.
- Larouche-Tremblay, François, Charles Poirier, Frédéric Côté, Simon Lachance-Cloutier, Simon Ricard, Richard Turcotte, et Jean-François Cyr. 2017. « Classification de relations débit-vitesse dans l'objectif de leur distribution en cours d'eau non-jaugées: approche par la géométrie hydraulique ». *Projet sur la protection des prises d'eau potable*. Direction de l'expertise hydrique.

- Leclerc, René, et Michel F. Lapointe. 1994. « Hydraulic Geometry of Alluvial Rivers in the Bois-Francs Region of Southern Québec ». *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 19 (3): 237-52. <https://doi.org/10.4296/cwrj1903237>.
- Lee, J-S., et P. Y. Julien. 2006. « Downstream Hydraulic Geometry of Alluvial Channels ». *Journal of Hydraulic Engineering* 132 (12): 1347-52. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:12\(1347\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:12(1347)).
- Leopold, L. B., et T. Maddock. 1953. *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. U.S. Government Printing Office.
- Lindsay, John. 2014. « The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS ». Dans .
- Malavoi, J-R., et J-P. Bravard. 2010. *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. Onema.
- MDELCC, et MFFP. 2015. « Bilan des travaux d'entretien de cours d'eau en milieu agricole réalisés en 2011 et 2012 ».
- MELCC. 2022. « Données de l'Atlas hydroclimatique méridional 2022 ». Québec: Direction de l'expertise hydrique.
- Michaud, A. R., J. Desjardins, M. Dubuc, A. Drouin, et M. Grenier. 2017a. « Rapport final de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles pour le réseau d'étude de la rivière Champlain, en Mauricie ». Québec, Canada: IRDA, MAPAQ.
- Michaud, A. R., J. Desjardins, M. Dubuc, A. Drouin, et M. Grenier. 2017b. « Rapport final de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles pour le réseau Tomifobia, Estrie. » Québec, Canada: IRDA, MAPAQ.
- Michaud, A. R., J. Desjardins, R. Lauzier, et M. Grenier. 2009. « Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et Aux Castors ». IRDA, Québec.
- Michaud, A. R., J. Deslandes, J. Desjardins, et M. Grenier. 2009. « Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. » IRDA, Québec.
- Michaud, A. R., N-R. Medrano, R. Lagacé, et A. Drouin. 2014. « Développement et validation de méthodes de prédiction du ruissellement et des débits de pointe en support à l'aménagement hydro-agricole ». IRDA, Québec.
- Michaud, A. R., M. A. Niang, A. Blais-Gagnon, et W. Huertas. 2020. « Caractérisation hydrologique des cours d'eau de Saint-Zotique (Grand Marais, Dix-huit Arpents et Six Arpents). Rapport final. » IRDA, Québec.
- Mulvihill, Christiane I., Barry P. Baldigo, Sarah J. Miller, Douglas DeKoskie, et Joel DuBois. 2009. « Bankfull Discharge and Channel Characteristics of Streams in New York State ». 2009-5144. *Scientific Investigations Report*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20095144>.
- Park, C. C. 1977. « World-Wide Variations in Hydraulic Geometry Exponents of Stream Channels: An Analysis and Some Observations ». *Journal of Hydrology* 33 (1): 133-46.
- Powell, G. E., A. D. Ward, D. E. Mecklenburg, et A. D. Jayakaran. 2007. « Two-Stage Channel Systems: Part 1, a Practical Approach for Sizing Agricultural Ditches ». *Journal of Soil and Water Conservation* 62 (4): 277-86.
- Reid, D., E. Hickin, et S. C. Babakaiff. 2010. « Low-flow hydraulic geometry of small, steep mountain streams in southwest British Columbia ». *Geomorphology* 122 (octobre): 39-55.
- Rhoads, B. L. 1991. « A Continuously Varying Parameter Model of Downstream Hydraulic Geometry ». *Water Resources Research* 27 (8): 1865-72. <https://doi.org/10.1029/91WR01363>.

- Rhoads, B. L., et K. D. Massey. 2012. « Flow Structure and Channel Change in a Sinuous Grass-Lined Stream within an Agricultural Drainage Ditch: Implications for Ditch Stability and Aquatic Habitat ». *River Research and Applications* 28 (1): 39-52. <https://doi.org/10.1002/rra.1430>.
- Richards, K. S. 1976. « Complex width-discharge relations in natural river sections ». *GSA Bulletin* 87 (2): 199-206. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<199:CWRINR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<199:CWRINR>2.0.CO;2).
- Rousseau, Y., et P. M. Biron. 2009. « Geomorphological Impacts of Channel Straightening in an Agricultural Watershed, Southwestern Québec ». *Northeastern Geographer* 1: 91-113.
- Schoof, Russell. 1980. « Environmental Impact of Channel Modification1 ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 16 (4): 697-701. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1980.tb02451.x>.
- Schumm, S. A. 1960. « The Effect of Sediment Type on the Shape and Stratification of Some Modern Fluvial Deposits ». *American Journal of Science* 258 (3): 177-84. <https://doi.org/10.2475/ajs.258.3.177>.
- Shepherd, S. L., J. C. Dixon, R. K. Davis, et R. Feinstein. 2011. « The Effect of Land Use on Channel Geometry and Sediment Distribution in Gravel Mantled Bedrock Streams, Illinois River Watershed, Arkansas ». *River Research and Applications* 27 (7): 857-66.
- Shields, F. D., R. R. Copeland, P. C. Klingeman, M. W. Doyle, et A. Simon. 2003. « Design for Stream Restoration ». *Journal of Hydraulic Engineering* 129 (8): 575-84. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:8\(575\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:8(575)).
- Srivastava, Anurag, Joan Wu, William Elliot, Erin Brooks, et Dennis Flanagan. 2017. « Modeling Streamflow in a Snow-Dominated Forest Watershed Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model ». *Transactions of the ASABE* 60: 1171-87. <https://doi.org/10/gbv6vr>.
- Underwood, Kristen L, Donna M Rizzo, Arne Bomblies, Mandar M Dewoolkar, et Transportation Infrastructure Durability Center. 2021. « Leveraging High-Resolution LiDAR and Stream Geomorphic Assessment Datasets to Expand Regional Hydraulic Geometry Curves for Vermont ».
- Volmar, E., P. M. Biron, et S. Gaskin. 2017. « Une évaluation de la conception et des travaux d'entretien des cours d'eau en milieu agricole au Québec ». Présenté à La recherche en hydrologie au Québec: Gestion et évolution du risque inondation, Québec.
- Wilcock, D. N. 1971. « Investigation into the Relations between Bedload Transport and Channel Shape ». *GSA Bulletin* 82 (8): 2159-76. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[2159:IITRBB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[2159:IITRBB]2.0.CO;2).
- Wohl, E. 2020. *Rivers in the Landscape*. John Wiley & Sons.
- Wohl, Ellen E. 1998. « Uncertainty in Flood Estimates Associated with Roughness Coefficient ». *Journal of Hydraulic Engineering* 124 (2): 219-23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:2\(219\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:2(219)).
- Yuce, M. I., M. Esit, et M. C. Karatas. 2019. « Hydraulic Geometry Analysis of Ceyhan River, Turkey ». *SN Applied Sciences* 1 (7): 763. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0800-1>.

Annexe 1 : Données pour les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord

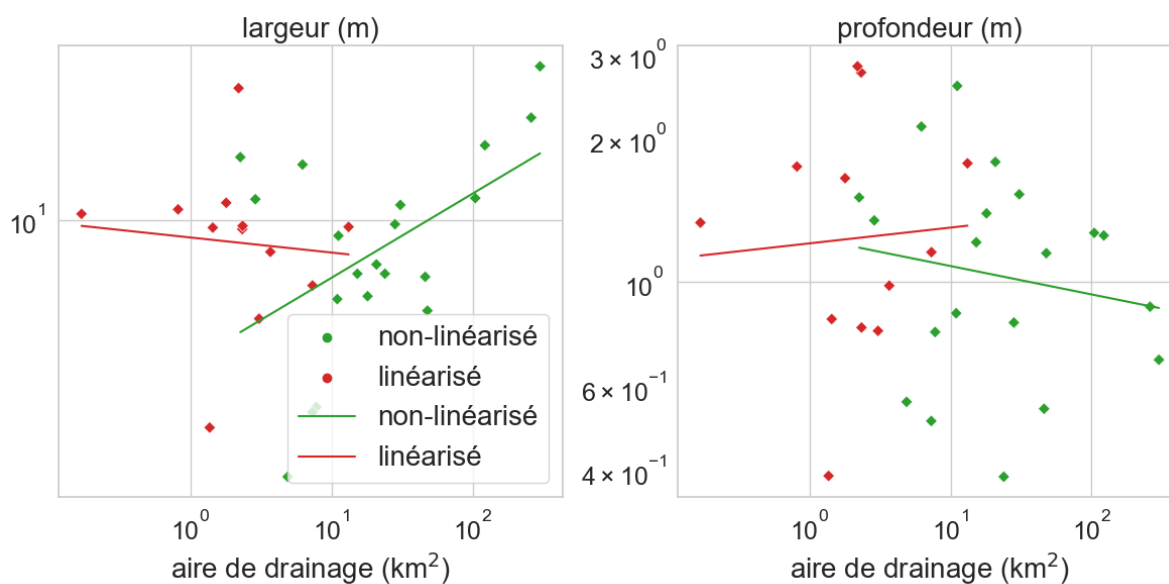


Figure 14. Courbes de géométrie hydraulique des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord. Variable indépendante : aire de drainage

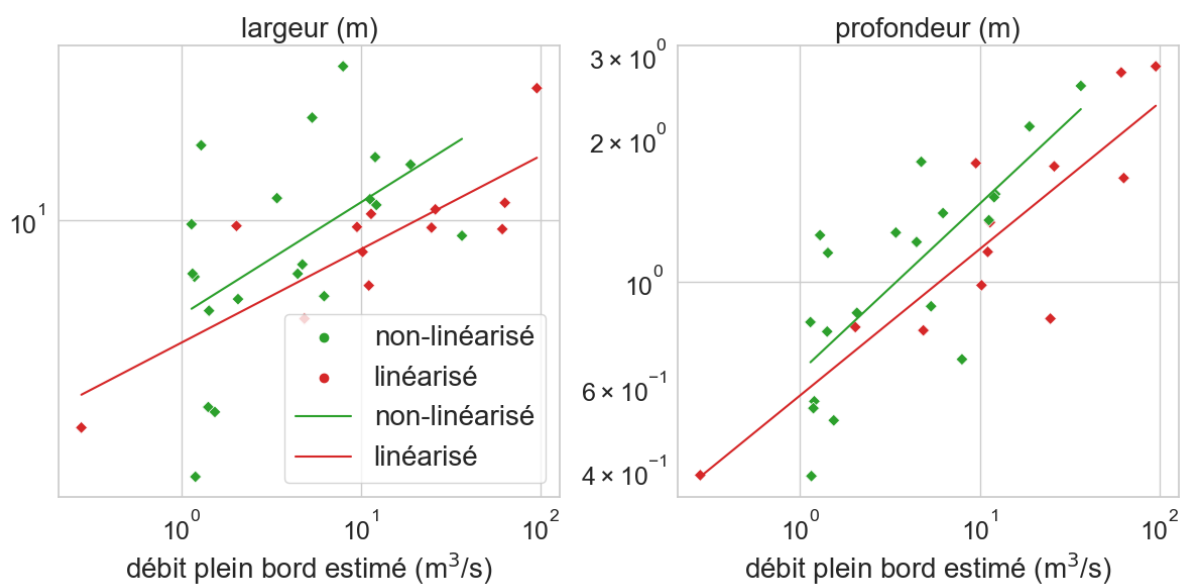


Figure 15. Courbes de géométrie hydraulique des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord. Variable indépendante : débit plein-bord estimé

Tableau 8. Base de données des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Nord

site	nom	réghy	source	opérateur	aire BV (km ²)	tracé fluvial	pente (%)	x (EPSG3215)	y (EPSG3215)	z (m)	larg (m)	prof (m)	aire section (m ²)	vitpb (m/s)	pmouillé (m)	rayhyd (m)	n0	n1	n2	n3	n4	n5	n	mannir	débit pb (m ³ /s)
ASS01	ruisseau Noir	BTSLN	UQAC	AF	7.78	non-linéarisé	0.2642	-386742.03	230149.45	4.41	3.53	0.79	2.77	0.51	4.52	0.43	0.02	0.005	0	0	0.025	1.15	0.0575	1.41	
ASS02	ruisseau Joseph-Gaudet	BTSLN	UQAC	AF	10.97	non-linéarisé	0.3203	-387068.54	229492.53	2.44	6.43	0.86	5.53	0.37	4.08	0.23	0.02	0.005	0.005	0.01	0.01	1.15	0.0575	2.07	
ASS04	ruisseau Saint-Georges	BTSLN	UQAC	AF	28.16	non-linéarisé	0.0248	-383614.02	225456.77	-14.15	9.76	0.82	8.02	0.14	8.25	0.49	0.02	0.005	0	0.01	0.025	1.15	0.069	1.14	
S01	ruisseau de la Fourche	BTSLN	UQAC	YB	30.76	non-linéarisé	0.1111	-403973.56	229120.53	69.37	10.86	1.53	16.60	0.73	11.07	0.91	0.02	0.0075	0.005	0	0.01	1	0.0425	12.20	
S02	cours d'eau Grégoire	BTSLN	UQAC	YB	3.68	linéarisé	0.1871	-399752.69	226221.04	54.94	8.36	0.98	8.22	1.24	8.99	0.61	0.02	0	0	0	0.005	1	0.025	10.23	
S04	affluent du ruisseau Saint-Esprit	BTSLN	UQAC	YB	7.32	linéarisé	0.1807	-399136.84	230831.75	71.74	6.94	1.16	8.02	1.38	8.54	0.85	0.02	0.0025	0	0	0.005	1	0.0275	11.08	
S05	affluent de la rivière Rouge	BTSLN	UQAC	YB	15.24	non-linéarisé	0.0865	-389676.78	238600.47	52.46	7.41	1.21	8.98	0.50	8.36	0.89	0.02	0.0025	0.005	0.0175	0.01	1	0.055	4.45	
S06	décharge du Rang Double	BTSLN	UQAC	YB	2.32	linéarisé	0.5639	-389392.27	238292.50	53.35	9.50	2.76	26.17	2.35	10.58	1.14	0.02	0.005	0.005	0	0.005	1	0.035	61.39	
S07	Le Grand Ruisseau	BTSLN	UQAC	YB	1.79	linéarisé	0.7821	-363021.14	241967.40	10.49	10.99	1.65	18.16	3.49	11.10	0.98	0.02	0	0	0	0.005	1	0.025	63.42	
S08	ruisseau Landry-Hénault	BTSLN	UQAC	YB	13.20	linéarisé	0.0749	-357523.31	250900.57	8.48	9.61	1.78	17.07	0.56	7.41	0.60	0.02	0.005	0.005	0	0.005	1	0.035	9.52	
S09	branche Trudel	BTSLN	UQAC	YB	0.17	linéarisé	0.0378	-356207.97	252008.93	10.25	10.33	1.33	13.78	0.83	10.70	1.10	0.02	0	0	0	0.005	1	0.025	11.41	
S11	ruisseau de Trompe-Souris	BTSLN	UQAC	YB	6.22	non-linéarisé	0.2230	-350964.98	259941.21	13.06	13.60	2.12	28.84	0.66	14.21	1.60	0.028	0.01	0.005	0.0175	0.025	1.15	0.098325	18.93	
S12	décharge des Acadiens	BTSLN	UQAC	YB	3.06	linéarisé	0.6252	-335685.16	267752.51	23.63	5.77	0.79	4.56	1.06	4.80	0.40	0.02	0.005	0.005	0	0.01	1	0.04	4.85	
S13	affluent de la rivière Chacoura	BTSLN	UQAC	YB	1.44	linéarisé	1.0666	-340908.17	264355.60	12.38	9.57	0.84	8.00	3.09	9.43	0.65	0.02	0	0	0	0.005	1	0.025	24.76	
S14	ruisseau Pelletier	BTSLN	UQAC	YB	11.17	non-linéarisé	1.2189	-341884.05	266545.04	14.25	9.15	2.58	23.63	1.55	9.60	0.73	0.028	0.0075	0.005	0	0.01	1.15	0.058075	36.58	
S15	affluent de la rivière du Loup	BTSLN	UQAC	YB	2.19	linéarisé	0.9577	-340825.20	278163.61	52.86	20.80	2.84	59.05	1.62	22.50	1.97	0.02	0.0075	0	0.0175	0.05	1	0.095	95.61	
S16	affluent de la petite rivière Yamachiche	BTSLN	UQAC	YB	2.88	non-linéarisé	0.8411	-336834.76	276565.49	61.44	11.21	1.35	15.10	0.74	7.28	0.45	0.02	0.005	0.005	0.0175	0.025	1	0.0725	11.24	
S17	affluent de La Petite Décharge	BTSLN	UQAC	YB	0.81	linéarisé	0.6379	-333065.01	273502.67	50.94	10.60	1.75	18.53	1.40	11.53	1.08	0.02	0.005	0.01	0	0.025	1	0.06	26.01	
S18	ruisseau de la Petite-Acadie	BTSLN	UQAC	YB	2.25	non-linéarisé	0.2709	-332281.99	267920.74	16.04	14.17	1.51	21.34	0.56	10.32	0.66	0.02	0.0025	0.005	0.0175	0.025	1	0.07	12.02	
S19	ruisseau des Seigneurs	BTSLN	UQAC	YB	2.34	linéarisé	0.1260	-324040.66	266011.60	19.51	9.67	0.80	7.76	0.26	8.73	0.61	0.02	0.005	0.005	0.0175	0.05	1	0.0975	2.03	
STFEL03	rivière Bayonne	BTSLN	UQAC	AF	104.60	non-linéarisé	0.1969	-380168.18	259672.45	83.80	11.28	1.27	14.31	0.24	3.31	0.31	0.02	0.005	0.005	0.01	0.025	1.3	0.0845	3.41	
STFEL04	ruisseau Frédéric	BTSLN	UQAC	AF	7.30	non-linéarisé	0.7090	-377681.60	249638.66	23.16	3.43	0.51	1.75	0.88	8.64	0.43	0.02	0.005	0.005	0	0.025	1	0.055	1.54	
STFEL05	branche de la rivière Bayonne	BTSLN	UQAC	AF	18.01	non-linéarisé	0.2616	-377152.27	249121.40	19.02	6.54	1.39	9.11	0.69	6.82	0.47	0.02	0	0	0	0.025	1	0.045	6.25	
STFEL07	affluent de la rivière Bayonne	BTSLN	UQAC	AF	4.88	non-linéarisé	0.2632	-377032.34	256382.17	75.39	2.39	0.56	1.34	0.89	10.80	0.69	0.02	0	0	0	0.025	1	0.045	1.20	
STFEL08	ruisseau Boucher	BTSLN	UQAC	AF	47.84	non-linéarisé	0.0650	-377438.03	257283.76	62.88	6.03	1.15	6.93	0.21	3.91	0.32	0.02	0.005	0	0	0.025	1.15	0.0575	1.43	
STFEL09	rivière Bayonne	BTSLN	UQAC	AF	122.38	non-linéarisé	0.0053	-378404.16	257647.10	78.00	15.14	1.25	18.96	0.07	3.46	0.34	0.02	0	0	0	0.025	1.15	0.05175	1.29	
TERR01	rivière Mascouche	BTSLN	UQAC	AF	301.20	non-linéarisé	0.1033	-401175.80	210204.76	-1.30	23.49	0.69	16.13	0.49	24.58	0.91	0.028	0	0	0	0.025	1.15	0.06095	7.96	
TERR02	ruisseau Noir	BTSLN	UQAC	AF	20.82	non-linéarisé	0.0984	-407867.78	207862.81	8.66	7.80	1.79	13.94	0.34	7.94	0.56	0.02	0	0	0.01	0.025	1.15	0.06325	4.72	
TERR03	affluent de la rivière Mascouche	BTSLN	UQAC	AF	1.36	linéarisé	0.2384	-413025.38	208212.88	17.19	3.15	0.39	1.23	0.23	3.42	0.25	0.02	0	0.005	0.01	0.05	1	0.085	0.28	
TR01	rivière Brûlée	BTSLN	UQAC	AF	46.13	non-linéarisé	0.0553	-307899.66	281477.37	-3.46	7.28	0.54	3.95	0.30	8.81	0.54	0.02	0	0	0	0.025	1.15	0.05175	1.18	
TR02	rivière Brûlée	BTSLN	UQAC	AF	23.88	non-linéarisé	0.1673	-311091.74	281940.03	8.31	7.41	0.39	2.89	0.40	7.98	0.43	0.02	0	0	0	0.025	1.3	0.0585	1.15	
TR03	rivière Yamachiche	BTSLN	UQAC	AF	260.72	non-linéarisé	0.0397	-331077.11	266399.34	-21.94	17.66	0.89	15.67	0.34	16.41	0.80	0.02	0.005	0	0	0.025	1	0.05	5.36	

Annexe 2 : Données pour les Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud

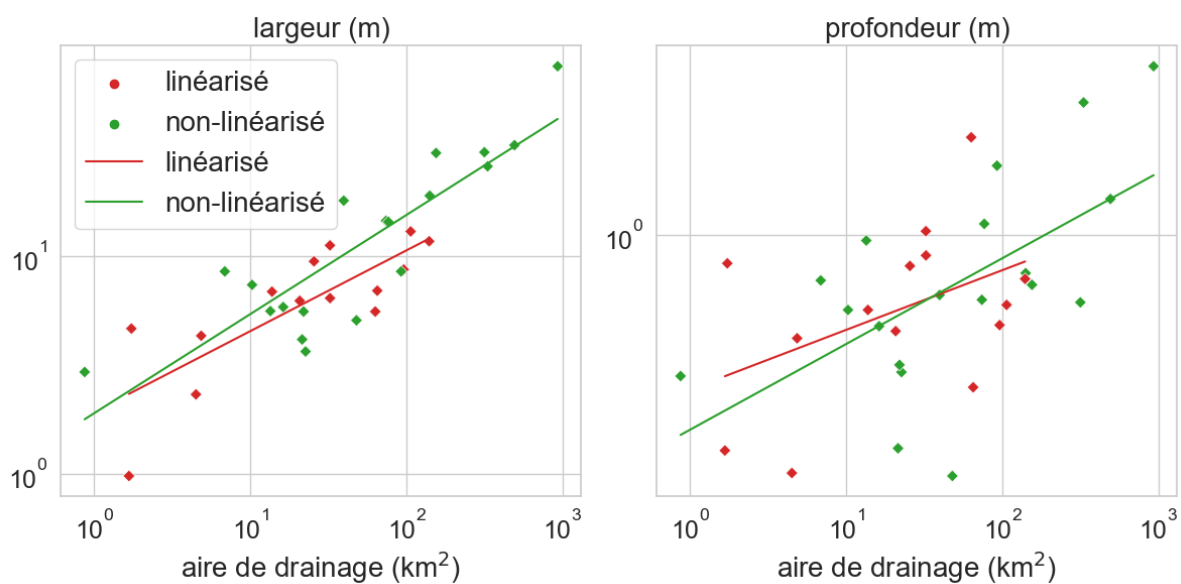


Figure 16. Courbes de géométrie hydraulique des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud. Variable indépendante : aire de drainage

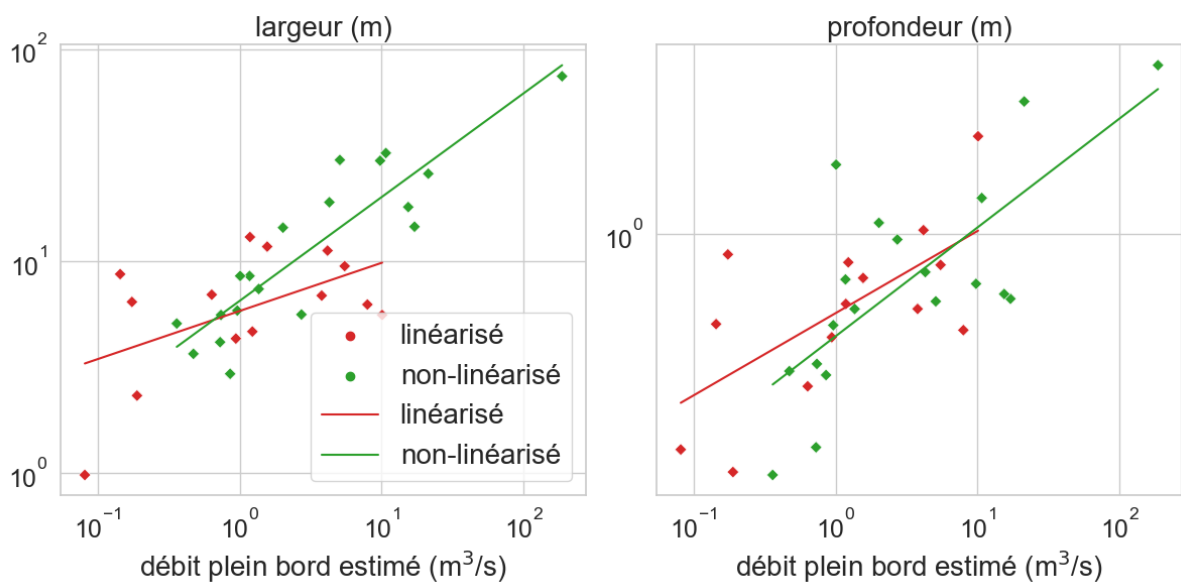


Figure 17. Courbes de géométrie hydraulique des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud. Variable indépendante : débit plein-bord estimé

Tableau 9. Base de données des Basses-Terres-du-Saint-Laurent Sud

site	nom	réghy	sourc	opérateur	aire BV (km2)	tracé fluvial	pente (%)	x (EPSG3215)	y (EPSG3215)	z (m)	larg (m)	prof (m)	aire section (m2)	vitpb (m/s)	pmouillé (m)	rayhyd (m)	n0	n1	n2	n3	n4	n5	n mannir	débit pb (m3/s)
BELL01	rivière Boyer	BTSL	UQAC	AF	64.89	linéarisé	0.0680	-189005.08	306016.66	35.85	6.95	0.44	3.07	0.21	6.66	0.35	0.024	0.005	0	0	0.025	1.15	0.0621	0.63
BELL02	rivière Boyer	BTSL	UQAC	AF	140.61	non-linéarisé	0.0553	-186491.51	309811.60	25.09	18.97	0.82	15.47	0.28	18.54	0.67	0.02	0.005	0	0	0.025	1.3	0.065	4.28
BELL03	ruisseau du Portage	BTSL	UQAC	AF	20.68	linéarisé	3.7793	-183708.85	313701.77	23.87	6.25	0.60	3.73	2.13	7.36	0.51	0.028	0	0.005	0	0.025	1	0.058	7.93
NIC17	rivière Carmel	BTSL	UQAC	YB	25.53	linéarisé	0.7986	-309939.89	243234.43	47.53	9.48	0.85	8.03	0.68	9.64	0.53	0.028	0.01	0.005	0.0175	0.025	1	0.0855	5.48
NIC19	ruisseau Domino-Levasseur	BTSL	UQAC	YB	10.25	non-linéarisé	0.2667	-306614.43	246785.03	49.47	7.39	0.67	4.95	0.27	7.78	0.43	0.028	0.01	0.005	0.025	0.025	1.15	0.10695	1.36
NIC22	affluent de la rivière Nicolet	BTSL	UQAC	YB	0.87	non-linéarisé	2.4385	-303157.35	244386.15	63.12	2.94	0.47	1.38	0.62	3.52	0.32	0.028	0.01	0.005	0.025	0.05	1	0.118	0.86
NIC23	ruisseau Alfred-Lemire	BTSL	UQAC	YB	4.48	linéarisé	0.6028	-302116.16	243866.76	60.98	2.32	0.28	0.65	0.29	2.82	0.23	0.02	0.005	0	0.025	0.05	1	0.1	0.19
NIC25	rivière des Saults	BTSL	UQAC	YB	154.34	non-linéarisé	0.5407	-307956.28	233787.68	49.29	29.79	0.77	22.82	0.43	28.88	0.39	0.025	0.02	0.0125	0.025	0.01	1	0.0925	9.75
NIC28	ruisseau des Généreux	BTSL	UQAC	YB	73.73	non-linéarisé	6.0537	-306227.27	231156.13	56.15	14.55	0.71	10.28	1.66	14.47	0.69	0.028	0.01	0.0125	0.025	0.025	1.15	0.115575	17.03
NIC36	ruisseau Gagnon	BTSL	UQAC	YB	1.73	linéarisé	0.0815	-290112.20	236088.83	81.36	4.66	0.86	4.00	0.31	6.50	0.65	0.02	0	0	0	0.05	1	0.07	1.23
NIC37	rivière Nicolet	BTSL	UQAC	YB	926.76	non-linéarisé	0.2648	-290401.16	234552.63	71.27	74.58	2.48	184.70	1.01	67.17	1.13	0.028	0.005	0.005	0	0.01	1.15	0.0552	186.67
NIC46	rivière à Pat	BTSL	UQAC	YB	32.34	linéarisé	0.0049	-283446.05	222859.83	101.69	6.43	0.90	5.76	0.03	6.45	0.23	0.028	0.005	0.0125	0.0175	0.025	1	0.088	0.17
NIC47	rivière des Rosiers	BTSL	UQAC	YB	139.42	linéarisé	0.0136	-279673.12	227249.85	102.15	11.72	0.79	9.26	0.17	12.68	0.61	0.02	0.005	0	0	0.025	1	0.05	1.56
NIC48	rivière des Rosiers	BTSL	UQAC	YB	106.14	linéarisé	0.0106	-276773.90	221921.34	105.61	13.00	0.69	8.94	0.13	14.01	0.51	0.02	0.005	0	0	0.025	1	0.05	1.18
NIC54	ruisseau Lemay	BTSL	UQAC	YB	1.67	linéarisé	0.4916	-271923.15	224635.99	121.79	0.98	0.31	0.31	0.26	1.91	0.19	0.02	0	0	0.0175	0.05	1	0.0875	0.08
NIC95	ruisseau Calixte-Hébert	BTSL	UQAC	YB	13.75	linéarisé	0.4279	-289255.00	234856.54	72.53	6.88	0.67	4.60	0.82	6.30	0.42	0.02	0.01	0.005	0	0.01	1	0.045	3.78
NOR04	rivière Noire	BTSL	UQAC	AF	95.79	linéarisé	0.0004	-415125.71	137181.98	16.17	8.69	0.62	5.36	0.03	9.31	0.56	0.02	0	0	0	0.025	1.15	0.05175	0.14
STFLA01	rivière aux Cèdres	BTSL	UQAC	AF	16.22	non-linéarisé	0.0908	-242336.34	281596.89	88.53	5.85	0.61	3.59	0.27	2.90	0.30	0.02	0.005	0	0	0.025	1	0.05	0.96
STGIL04	rivière Beauvillage	BTSL	UQAC	AF	314.81	non-linéarisé	0.0525	-219558.00	287775.35	84.12	30.04	0.70	20.94	0.24	10.15	0.47	0.02	0.005	0	0	0.025	1.15	0.0575	5.07
STGIL05	rivière Beauvillage	BTSL	UQAC	AF	490.55	non-linéarisé	0.1142	-218880.35	288596.37	82.44	32.37	1.21	39.30	0.27	4.99	0.35	0.024	0.005	0	0	0.025	1.15	0.0621	10.70
STJJP01	rivière Ferrée	BTSL	UQAC	AF	47.73	non-linéarisé	0.0747	-125923.09	363137.02	10.74	5.08	0.27	1.39	0.26	4.81	0.32	0.02	0.005	0	0	0.025	1	0.05	0.36
STJJP04	rivière Tortue	BTSL	UQAC	AF	63.02	linéarisé	1.0152	-138599.81	348734.14	-6.08	5.57	1.69	9.42	1.07	4.93	0.48	0.028	0.005	0	0	0.025	1	0.058	10.07
STJJP05	rivière Port-Joli	BTSL	UQAC	AF	39.56	non-linéarisé	1.3294	-136459.50	354998.52	-27.39	18.01	0.73	13.06	1.18	5.00	0.36	0.028	0.005	0	0	0.01	1.15	0.04945	15.39
STPHI01	rivière Saint-Jacques	BTSL	UQAC	AF	76.39	non-linéarisé	0.0321	-390939.56	166034.95	-10.23	14.40	1.06	15.30	0.13	12.05	0.55	0.02	0.01	0.005	0.01	0.025	1.3	0.091	2.02
STPHI03	ruisseau Saint-André	BTSL	UQAC	AF	6.85	non-linéarisé	0.0285	-391086.96	161410.20	1.11	8.52	0.78	6.68	0.18	5.85	0.49	0.02	0.005	0	0.01	0.025	1	0.06	1.17
TR04	cours d'eau Buisson	BTSL	UQAC	AF	4.84	linéarisé	0.1339	-307323.14	262730.21	-12.26	4.31	0.57	2.48	0.38	3.89	0.32	0.02	0	0	0	0.025	1	0.045	0.94
TR05	ruisseau Leblanc	BTSL	UQAC	AF	21.43	non-linéarisé	1.0328	-293609.37	268400.58	-15.74	4.15	0.32	1.32	0.55	5.17	0.29	0.025	0.005	0.005	0.01	0.025	1.15	0.0805	0.73
TR06	ruisseau Leblanc	BTSL	UQAC	AF	22.55	non-linéarisé	0.7339	-305710.81	262650.43	-11.42	3.66	0.48	1.75	0.27	3.52	0.20	0.024	0.01	0.005	0.02	0.025	1.3	0.1092	0.47
TR07	rivière Marguerite	BTSL	UQAC	AF	32.30	linéarisé	0.1690	-311080.33	259352.43	-16.52	11.22	1.02	11.46	0.36	12.73	0.57	0.028	0.005	0	0.01	0.025	1.15	0.0782	4.15
YAM01	rivière David	BTSL	UQAC	AF	330.13	non-linéarisé	0.4915	-338169.09	228300.18	-25.09	25.88	2.04	52.75	0.40	19.77	0.58	0.028	0.01	0.005	0	0.05	1.3	0.1209	21.30
YAM02	ruisseau des Chênes	BTSL	UQAC	AF	92.16	non-linéarisé	0.0023	-337518.91	223596.99	-9.80	8.52	1.45	12.37	0.08	10.14	1.00	0.02	0	0	0	0.025	1.3	0.0585	1.01
YAM04	ruisseau Saint-Thomas et Sainte-Sophie	BTSL	UQAC	AF	21.89	non-linéarisé	0.2070	-345845.65	233677.16	-23.69	5.57	0.50	2.78	0.27	6.08	0.39	0.02	0	0	0	0.025	1.3	0.091	0.74
YAM05	rivière Bellevue	BTSL	UQAC	AF	13.42	non-linéarisé	0.1916	-349903.44	234690.80	-26.55	5.60	0.97	5.44	0.50	5.71	0.37	0.02	0	0	0	0.025	1	0.045	2.72

Annexe 3 : Données pour le Saguenay-Lac-Saint-Jean

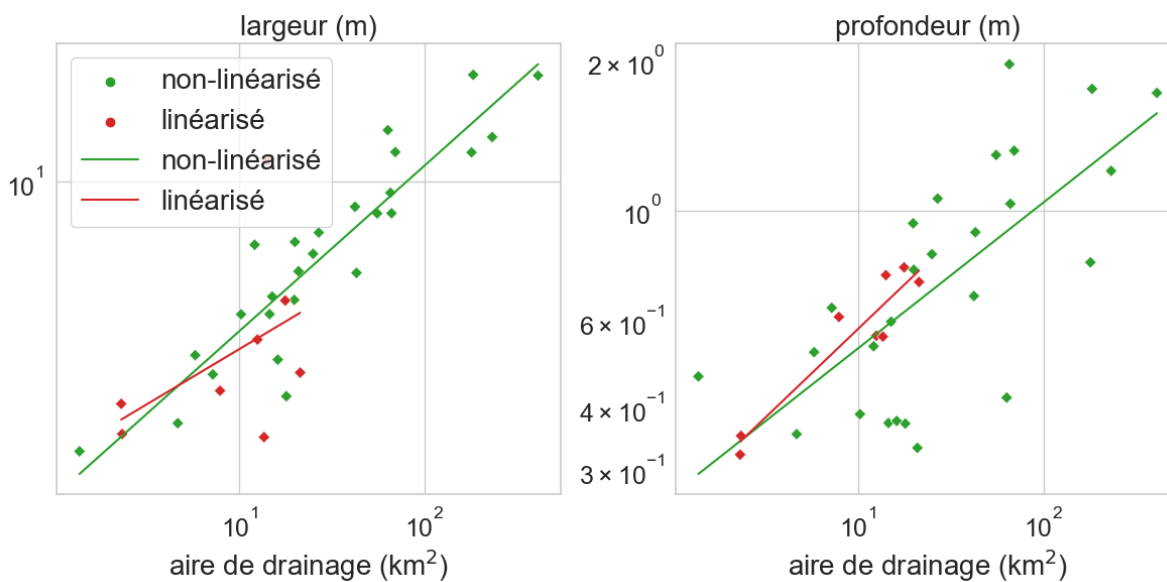


Figure 18. Courbes de géométrie hydraulique du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Variable indépendante : aire de drainage

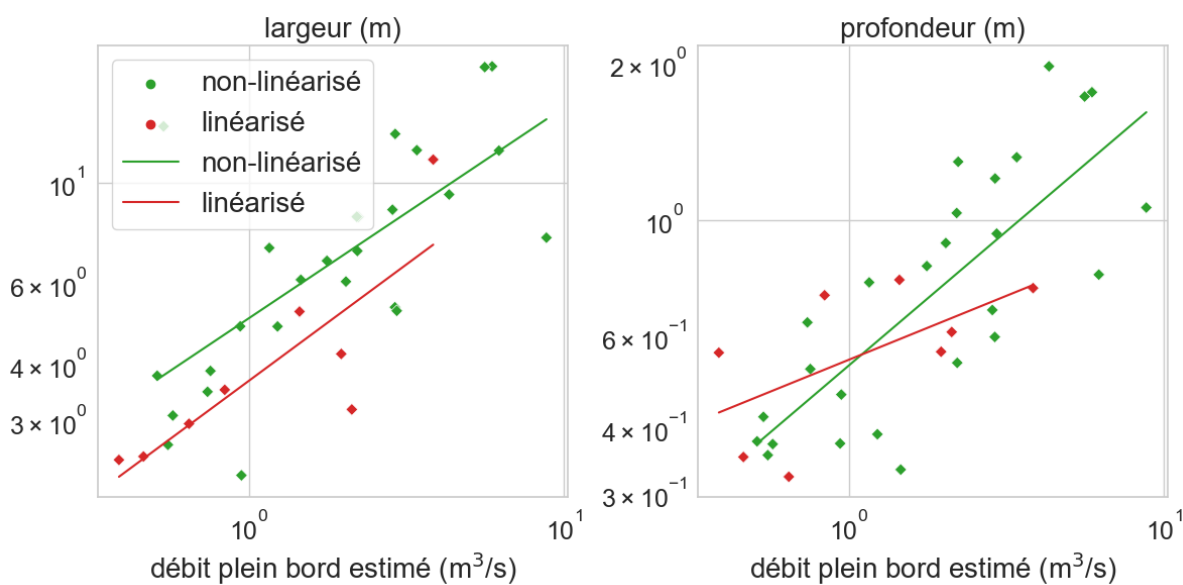


Figure 19. Courbes de géométrie hydraulique du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Variable indépendante : débit plein-bord estimé

Tableau 10. Base de données du Saguenay-Lac-Saint-Jean

site	nom	réghy	sourc	opérateur	aire BV (km2)	tracé fluvial	pente (%)	x (EPSG3215)	y (EPSG3215)	z (m)	larg (m)	prof (m)	aire section (m2)	vitpb (m/s)	pmouillé (m)	rayhyd (m)	n0	n1	n2	n3	n4	n5	n	mannir	débit pb (m3/s)
Sa01	rivière à Benjamin	SLSJ	UQAC	OB	20.89	non-linéarisé	0.7018	-175137.28	487703.10	-25.42	6.12	0.33	2.03	0.72	10.81	0.72	0.024	0.005	0.005	0.01	0.05	1	0.094	1.46	
Sa02	rivière à Benjamin	SLSJ	UQAC	OB	12.12	non-linéarisé	2.8365	-176165.20	489200.49	19.72	7.08	0.53	3.77	0.58	4.08	0.25	0.028	0.01	0.01	0.04	0.025	1	0.113	2.21	
Sa03	rivière à Benjamin	SLSJ	UQAC	OB	15.07	non-linéarisé	2.1836	-176206.29	489033.69	16.37	5.32	0.60	3.18	0.91	4.30	0.37	0.024	0.005	0	0.01	0.025	1.3	0.0832	2.90	
Sa04	ruisseau Roy	SLSJ	UQAC	OB	26.87	non-linéarisé	3.8142	-169442.07	482895.60	95.97	7.57	1.06	8.00	1.10	4.44	0.24	0.028	0.005	0.005	0.02	0.01	1	0.068	8.79	
Sa05	ruisseau Paradis	SLSJ	UQAC	OB	7.88	linéarisé	0.1899	-181941.57	487940.62	97.29	3.17	0.61	1.94	1.09	8.37	0.65	0.02	0	0	0	0.01	1	0.03	2.12	
Sa06	ruisseau Paradis	SLSJ	UQAC	OB	12.55	linéarisé	0.5251	-181419.16	489911.24	90.85	2.40	0.56	2.35	0.83	16.99	0.87	0.024	0.005	0	0	0.05	1	0.079	1.96	
Sa07	affluent de la rivière Paradis	SLSJ	UQAC	OB	2.31	linéarisé	0.6223	-181955.73	490343.62	91.68	2.95	0.32	0.95	0.68	9.20	0.47	0.02	0	0	0	0.05	1	0.07	0.64	
Sa08	affluent de la rivière Gauthier	SLSJ	UQAC	OB	5.79	non-linéarisé	0.1770	-183460.14	491528.19	85.25	3.86	0.52	2.00	0.38	29.89	0.82	0.02	0	0.005	0.01	0.05	1.15	0.09775	0.75	
Sa09	rivière Gauthier	SLSJ	UQAC	OB	42.17	non-linéarisé	0.3080	-183053.76	494305.33	4.18	8.72	0.67	5.87	0.49	9.86	0.33	0.024	0.005	0	0	0.025	1	0.054	2.85	
Sa10	ruisseau Paradis	SLSJ	UQAC	OB	19.98	non-linéarisé	0.2883	-182174.16	493624.77	67.29	7.19	0.76	5.46	0.21	2.51	0.15	0.02	0	0.005	0.02	0.025	1	0.07	1.16	
Sa11	rivière Gauthier	SLSJ	UQAC	OB	69.58	non-linéarisé	0.1175	-181458.50	495712.76	-25.26	11.79	1.32	15.56	0.22	2.50	0.23	0.02	0.005	0	0.01	0.01	1.3	0.0585	3.41	
Sa12	rivière Caribou	SLSJ	UQAC	OB	17.96	non-linéarisé	0.6713	-189552.79	509947.52	116.50	3.08	0.37	1.15	0.50	2.70	0.21	0.02	0.005	0	0	0.025	1.15	0.0575	0.57	
Sa14	ruisseau Pelletier	SLSJ	UQAC	OB	7.21	non-linéarisé	0.4930	-191779.49	509992.28	109.65	3.47	0.64	2.21	0.33	5.38	0.23	0.02	0.01	0.005	0.02	0.025	1	0.08	0.74	
Sa16	ruisseau Laprise	SLSJ	UQAC	OB	4.66	non-linéarisé	0.3867	-192619.28	510407.24	112.02	2.65	0.35	0.94	0.59	6.37	0.32	0.02	0.005	0	0	0.025	1	0.05	0.55	
Sa17	rivière aux Vases	SLSJ	UQAC	OB	25.03	non-linéarisé	0.1460	-196243.99	509140.60	93.88	6.73	0.82	5.50	0.32	2.45	0.19	0.02	0	0	0.01	0.01	1	0.04	1.77	
Sa18	rivière Caribou	SLSJ	UQAC	OB	55.56	non-linéarisé	0.1059	-191107.91	507571.75	100.19	8.41	1.29	10.88	0.20	6.67	0.25	0.02	0.01	0.005	0.01	0.01	1.15	0.06325	2.22	
Sa19	ruisseau Bilodeau	SLSJ	UQAC	OB	1.38	non-linéarisé	1.2860	-189801.24	508701.47	117.41	2.27	0.46	1.05	0.90	11.80	0.36	0.024	0.005	0	0.01	0.025	1	0.064	0.94	
Sa20	rivière Caribou	SLSJ	UQAC	OB	65.51	non-linéarisé	0.0877	-190850.14	504336.15	93.16	9.42	1.97	18.58	0.23	2.62	0.22	0.02	0.005	0.005	0	0.01	1.15	0.046	4.31	
Sa21	rivière Hood	SLSJ	UQAC	OB	14.59	non-linéarisé	0.4344	-195506.80	503024.86	70.77	4.83	0.37	1.80	0.52	4.29	0.37	0.02	0.02	0	0	0.025	1	0.065	0.94	
Sa22	rivière aux Vases	SLSJ	UQAC	OB	66.36	non-linéarisé	0.0742	-197257.66	504850.57	68.29	8.42	1.03	8.69	0.25	4.69	0.36	0.02	0	0	0.01	0.025	1	0.055	2.20	
Sa23	rivière à l'Ours	SLSJ	UQAC	OB	63.37	non-linéarisé	0.0321	-203486.65	516163.20	137.34	13.30	0.42	5.58	0.10	2.18	0.19	0.024	0.005	0	0	0.025	1.15	0.0621	0.53	
Sa24	rivière des Aulnaies	SLSJ	UQAC	OB	231.95	non-linéarisé	0.0997	-209548.39	512133.60	85.15	12.80	1.20	15.39	0.19	4.31	0.28	0.02	0.01	0	0	0.025	1.3	0.0715	2.91	
Sa25	décharge du lac Vert	SLSJ	UQAC	OB	13.62	linéarisé	0.2494	-209759.91	511957.57	84.84	2.46	0.56	1.37	0.28	4.35	0.25	0.02	0	0	0	0.05	1	0.07	0.39	
Sa26	rivière des Aulnaies	SLSJ	UQAC	OB	183.09	non-linéarisé	0.0705	-210601.71	517378.67	90.94	18.02	1.76	31.70	0.19	6.05	0.41	0.02	0.01	0.005	0	0.025	1.3	0.078	5.91	
Sa27	ruisseau Gaudreault	SLSJ	UQAC	OB	2.34	linéarisé	1.0367	-208959.50	507681.42	83.78	2.50	0.35	0.88	0.53	2.26	0.24	0.02	0.01	0	0.02	0.025	1	0.075	0.46	
Sa28	rivière des Aulnaies	SLSJ	UQAC	OB	409.75	non-linéarisé	0.0233	-208931.83	506968.25	82.00	17.95	1.73	30.98	0.18	6.93	0.33	0.02	0.005	0	0	0.01	1.15	0.04025	5.60	
Sa29	affluent de la rivière Saguenay	SLSJ	UQAC	OB	14.12	linéarisé	1.1532	-214329.29	504875.09	64.90	11.24	0.74	8.33	0.46	1.55	0.15	0.025	0.01	0.01	0.01	0.01	1	0.065	3.84	
Sa30	ruisseau Ludger-Harvey	SLSJ	UQAC	OB	16.15	non-linéarisé	0.4287	-215676.59	506748.84	90.12	3.76	0.38	1.42	0.36	2.06	0.19	0.02	0.01	0.005	0	0.025	1	0.06	0.51	
Sa31	affluent de la rivière du Moulin	SLSJ	UQAC	OB	10.24	non-linéarisé	0.4203	-188937.53	487814.11	113.04	4.83	0.39	1.88	0.66	19.95	0.53	0.02	0	0	0.02	0.025	1	0.065	1.23	
Sa32	petite rivière Eusèbe	SLSJ	UQAC	OB	42.94	non-linéarisé	0.3542	-290218.05	525843.50	74.20	6.06	0.90	5.48	0.37	8.28	0.52	0.02	0.01	0	0.01	0.05	1.15	0.1035	2.03	
Sa33	rivière à la Carpe	SLSJ	UQAC	OB	21.32	linéarisé	0.2055	-293356.28	526657.55	94.65	3.50	0.72	2.52	0.33	11.11	0.41	0.02	0.005	0	0	0.05	1	0.075	0.84	
Sa34	rivière à la Carpe	SLSJ	UQAC	OB	19.82	non-linéarisé	0.3931	-295219.35	526403.75	104.43	5.23	0.94	4.93	0.60	4.20	0.33	0.02	0.005	0	0	0.025	1	0.05	2.94	
Sa38	rivière aux Iroquois	SLSJ	UQAC	OB	179.34	non-linéarisé	0.7359	-284738.33	517051.40	89.57	11.76	0.79	9.25	0.67	5.80	0.33	0.028	0.005	0	0.01	0.01	1.15	0.06095	6.21	
Sa39	cours d'eau Germain	SLSJ	UQAC	OB	17.71	linéarisé	0.8711	-290134.57	525703.49	74.61	5.21	0.77	4.00	0.36	3.25	0.17	0.02	0.01	0	0	0.05	1	0.08	1.45	

Annexe 4 : Données pour les Appalaches

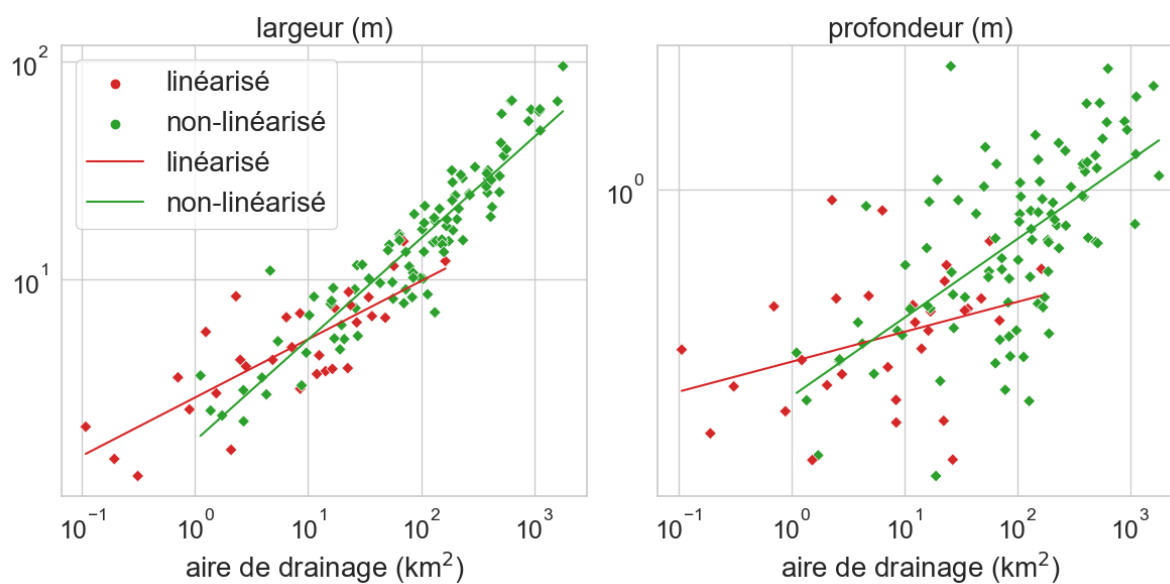


Figure 20. Courbes de géométrie hydraulique des Appalaches. Variable indépendante : aire de drainage

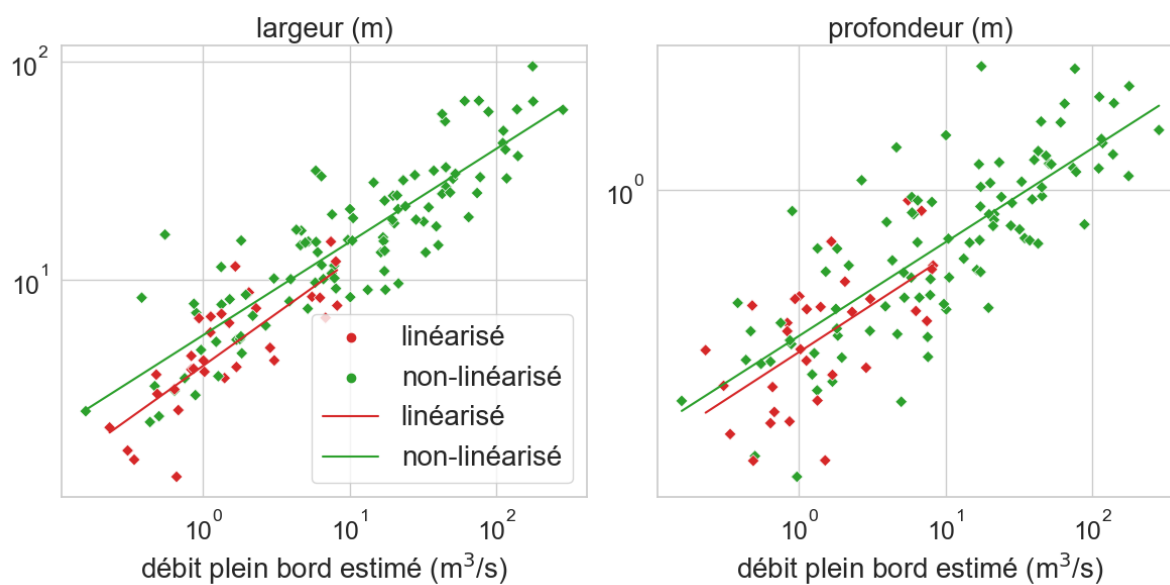


Figure 21. Courbes de géométrie hydraulique des Appalaches. Variable indépendante : débit plein-bord estimé

