



# **Crues, dissémination et impact de la renouée du Japon en milieux riverains**

**Mémoire**

**Rebecca Matte**

**Maîtrise en aménagement du territoire et développement régional - avec  
mémoire**

Maître en aménagement du territoire et développement régional (M.ATDR)

Québec, Canada

# **Crues, dissémination et impact de la renouée du Japon en milieux riverains**

**Mémoire**

**Rébecca Matte**

Sous la direction de :

Claude Lavoie, directeur de recherche  
Maxime Boivin (UQAC), codirecteur de recherche

## Résumé

Depuis plusieurs années, la renouée du Japon (*Reynoutria japonica s.l.*) est suspectée, sans preuve convaincante, d'accélérer l'érosion des berges des rivières. Les tiges de cette plante exotique envahissante meurent suite aux premiers gels automnaux, ce qui laisserait le sol sans protection lors des crues printanières. Au Québec, l'érosion des berges peut aussi être accentuée par les débâcles de glace. On a évalué l'influence de la renouée sur l'érosion des berges de la rivière Etchemin (Chaudière-Appalaches, Québec) en contexte de crues avec glaces. L'élévation le long de 120 profils transversaux de berges envahies ou non par la renouée a été mesurée avant et après la crue printanière de 2019. Il y avait en moyenne 3 cm de plus d'érosion (perte d'épaisseur du sol) dans les berges occupées par la renouée que dans celles sans renouée. L'érosion mesurée a probablement été particulièrement prononcée en 2019 en raison de la crue printanière qui fut exceptionnellement élevée cette année-là. L'érosion des berges et la crue des eaux favorisent la dissémination de la plante le long de la rivière Etchemin : les fragments de rhizomes arrachés par milliers lors de la crue sont transportés par l'eau et la glace, puis déposés un peu plus loin vers l'aval, sur les rives et la plaine inondable. Certains s'enracinent et forment de nouveaux clones, ce qui contribue à l'invasion des berges qui se poursuit localement sans interruption depuis 2003 (+ 813 % en superficie de rive occupée entre 2003 et 2018). Au fil des ans, les clones deviennent plus nombreux et étendus, ce qui engendre des pertes de sol plus importantes lors des crues, mais aussi un nombre de fragments plus élevé.

# Table des matières

|                                                                                             |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Résumé .....                                                                                | iii  |
| Table des matières .....                                                                    | iv   |
| Liste des figures.....                                                                      | v    |
| Liste des tableaux .....                                                                    | vii  |
| Remerciements .....                                                                         | viii |
| Introduction générale.....                                                                  | 1    |
| 1. Crues et dissémination : la propagation de la renouée du Japon en milieu riverain .....  | 9    |
| 1.1 Introduction.....                                                                       | 10   |
| 1.2 Méthodes.....                                                                           | 14   |
| 1.2.1 Aire d'étude .....                                                                    | 14   |
| 1.2.2 Répartition et historique de la renouée du Japon le long de la rivière Etchemin ..... | 17   |
| 1.2.3 Caméras de suivi.....                                                                 | 19   |
| 1.2.4 Inventaire des fragments de renouée du Japon.....                                     | 21   |
| 1.3 Résultats.....                                                                          | 23   |
| 1.3.1 Historique de la renouée du Japon le long de la rivière Etchemin .....                | 23   |
| 1.3.2 Crues et débâcles de glace captées par les caméras.....                               | 26   |
| 1.3.3 Inventaire des collets et fragments de rhizomes de renouée du Japon .....             | 28   |
| 1.4 Discussion .....                                                                        | 33   |
| 2. L'effet de la renouée du Japon sur l'érosion des berges .....                            | 37   |
| 2.1 Introduction.....                                                                       | 38   |
| 2.2 Méthodes.....                                                                           | 41   |
| 2.2.1 Aire d'étude .....                                                                    | 41   |
| 2.2.2 Mesures de l'érosion dans les berges .....                                            | 45   |
| 2.2.3 Caractérisation des berges .....                                                      | 50   |
| 2.2.4 Analyses statistiques.....                                                            | 53   |
| 2.3 Résultats.....                                                                          | 54   |
| 2.3.1 Mesures d'érosion dans les berges .....                                               | 54   |
| 2.3.2 Caractérisation des berges .....                                                      | 55   |
| 2.3.3 Érosion des berges .....                                                              | 56   |
| 2.4 Discussion .....                                                                        | 61   |
| Conclusion générale .....                                                                   | 65   |
| Bibliographie .....                                                                         | 71   |
| Annexe 1.....                                                                               | 83   |
| Annexe 2a.....                                                                              | 84   |
| Annexe 2b.....                                                                              | 85   |
| Annexe 3.....                                                                               | 86   |
| Annexe 4a.....                                                                              | 87   |
| Annexe 4b.....                                                                              | 88   |

## Liste des figures

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1.</b> Sol laissé à nu à l'emplacement d'un clone de renouée du Japon après la crue printanière sur les berges de la rivière Etchemin, Chaudière-Appalaches, Québec (photographie : Rébecca Matte). .....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4  |
| <b>Figure 2.</b> Fragment de rhizome de renouée du Japon trouvé sur les berges d'une rivière (photographie : Rébecca Matte). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 7  |
| <b>Figure 3.</b> Répartition de la renouée du Japon le long de la rivière Etchemin (Québec, Canada). La zone d'étude principale se trouve en amont du noyau villageois de Saint-Henri-de-Lévis. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                | 16 |
| <b>Figure 4.</b> Débits journaliers de la rivière Etchemin (Québec, Canada) à la hauteur du village de Saint-Henri-de-Lévis entre juillet 2018 et juin 2019 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020). On remarque les pics de crue un peu avant le 1 <sup>er</sup> janvier et vers la mi-avril (en rouge sur le graphique). Les données moyennes de débit pour la période 1981–2019 sont indiquées à titre comparatif. .... | 17 |
| <b>Figure 5.</b> Localisation, en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada), des caméras de surveillance (pointant toutes vers l'aval), des endroits où les glaces ont été déposées lors de la débâcle hivernale (du 22 au 24 décembre 2018) et printanière (du 14 au 30 avril 2019) et des zones de faible et de grand courant, disponibles pour le secteur aval seulement (source : Centre d'expertise hydrique du Québec, 2012). ....                                      | 20 |
| <b>Figure 6.</b> Collets de renouée de Japon trouvés en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada) (photographies A : Rébecca Matte, 2019; B et D : Élisabeth Groeneveld, 2018; C : Claude Lavoie, 2018). .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 21 |
| <b>Figure 7.</b> Évolution de la superficie occupée par la renouée du Japon (tendance linéaire : $R^2 = 0,99$ ) et du nombre de taches (un clone ou un ensemble de clones devenus coalescents; tendance linéaire : $R^2 = 0,93$ ) dans un tronçon de 22,7 km de long de la rivière Etchemin (Québec, Canada), entre 2003 et 2018. ....                                                                                                                                              | 24 |
| <b>Figure 8.</b> Évolution de la répartition de la renouée du Japon entre 2003 et 2018 pour un tronçon très envahi de la rivière Etchemin (Québec, Canada) situé en amont du noyau villageois de Saint-Henri-de-Lévis. ....                                                                                                                                                                                                                                                         | 25 |
| <b>Figure 9.</b> Montage séquentiel de photographies prises par une caméra (aval) filmant l'évolution du niveau d'eau et du couvert de glace de la rivière Etchemin (Québec, Canada) du 12 au 22 avril 2019. ....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 27 |
| <b>Figure 10.</b> Montage séquentiel de photographies prises par une caméra (aval) filmant l'évolution du niveau d'eau et du couvert de glace de la rivière Etchemin (Québec, Canada) du 2 au 12 avril 2020. ....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 28 |
| <b>Figure 11.</b> Collets et fragments de rhizomes de renouée du Japon inventoriés en mai et en juin 2019 dans un tronçon de la rivière Etchemin (Québec, Canada) en amont de Saint-Henri-de-Lévis. ....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 29 |
| <b>Figure 12.</b> Tiges mortes de renouée du Japon et sédiments alluviaux transportés par les glaces et l'eau pendant la débâcle de la rivière Etchemin (Québec, Canada) en avril 2019. La photographie a été prise le 24 avril, dans la plaine inondable, tout près du pied d'un embâcle (Rébecca Matte). ....                                                                                                                                                                     | 30 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 13.</b> Répartition spatiale en 2019 des collets de renouée du Japon et de la superficie des clones de la même espèce dans le tronçon de la rivière Etchemin (Québec, Canada) à l'étude, tronçon subdivisé en segments de 250 m de long (500 m si on additionne les deux rives), de l'amont vers l'aval. Les 319 collets présents sur un îlot (segment 251-500 m) ont été retirés de l'analyse, puisque les collets sur les autres îlots en aval n'ont pas été inventoriés, faute d'accessibilité. ....              | 31 |
| <b>Figure 14.</b> Distribution du nombre de collets de renouée du Japon déposés lors de la crue 2019 de la rivière Etchemin (Québec, Canada) par rapport à la distance (perpendiculaire) à la rive la plus proche. La distribution illustre également le poids des collets. Les classes de distance et de poids ont été déterminées avec la méthode des seuils naturels de Jenks, qui suivent la distribution naturelle inhérente aux données (Jenks et Caspall, 1971). ....                                                   | 32 |
| <b>Figure 15.</b> Répartition de la renouée du Japon le long de la rivière Etchemin (Québec, Canada) en 2017. La zone d'étude principale se trouve dans la municipalité de Saint-Henri-de-Lévis. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 43 |
| <b>Figure 16.</b> Débits journaliers de la rivière Etchemin (Québec, Canada) à la hauteur du village de Saint-Henri-de-Lévis entre juillet 2018 et juin 2019 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020). On remarque les pics de crue un peu avant le 1 <sup>er</sup> janvier et vers la mi-avril (en rouge sur le graphique). Les données moyennes de débit pour la période 1981–2019 sont indiquées à titre comparatif. ....                                           | 44 |
| <b>Figure 17.</b> Localisation des 40 segments avec transects de profil de berge dans le secteur de la rivière Etchemin (Québec, Canada) sélectionné pour l'étude de l'effet de la renouée du Japon sur l'érosion. Les segments sont regroupés par sites le long de la rivière. ....                                                                                                                                                                                                                                           | 47 |
| <b>Figure 18.</b> Exemple d'utilisation du DGPS pour réaliser des profils de berges par transect (en rouge), avec points d'échantillonnage (en jaune), dans les berges avec renouée du Japon (A) et sans renouée (B), en juin 2019 (photographies : Marianne Bouchard).....                                                                                                                                                                                                                                                    | 49 |
| <b>Figure 19.</b> Exemple des quatre types morphologiques de berges dans un tronçon de la rivière Etchemin (Québec, Canada). En vert : berge linéaire; en rouge : berge concave; en jaune : berge convexe; en bleu : berge d'îlot.....                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 51 |
| <b>Figure 20.</b> Relevés de terrain sur les berges de la rivière Etchemin (Québec, Canada) à l'été 2019 : relevés de végétation le long d'un transect en absence de renouée du Japon (A) et dénombrement des tiges de renouée dans un quadrat de 1 m <sup>2</sup> au bas d'une berge, où les tiges de renouée sont plus petites (B) (photographies : Rébecca Matte). ....                                                                                                                                                     | 52 |
| <b>Figure 21.</b> Deux exemples de profils de berges répétés (novembre 2018, juin 2019) dans deux transects, le premier (A : sans renouée) dans le site 8 de la rivière Etchemin (Québec, Canada; voir figure 17), le second (B : avec renouée) dans le site 12.....                                                                                                                                                                                                                                                           | 55 |
| <b>Figure 22.</b> Berges de la rivière Etchemin (Québec, Canada) au printemps (avril). Lorsque la renouée du Japon est absente, les berges sont souvent recouvertes de graminées qui sont déjà en croissance à la fin avril (couleur verte à droite dans la photographie A). Lorsque la renouée est présente (à gauche dans la photographie A et sur la photographie B), le sol peut-être complètement dénudé de végétation et montrer des signes évidents d'érosion (photographie A : Rébecca Matte; B : Claude Lavoie). .... | 57 |
| <b>Figure 23.</b> Distributions des valeurs de différence d'élévation (classes de 2 cm) entre novembre 2018 et mai – juin 2019 pour les points de mesure avec renouée du Japon (A) et sans renouée (B), mesures effectuées en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada). ....                                                                                                                                                                                                                                            | 58 |
| <b>Figure 24.</b> Modèle conceptuel du processus de transport des fragments de renouée lorsque la crue est en eau libre et lorsqu'il y a un embâcle de glace.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 67 |

## Liste des tableaux

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1.</b> Périodes de récurrence des débits de crues de la rivière Etchemin entre 1964 et 2019 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020) calculées avec la loi de log-Pearson type 3 (Griffins et Stedinger, 2007). Avec le débit observé en 2019, la période de récurrence serait de 50 ans (en rouge dans le tableau).<br>..... | 14 |
| <b>Tableau 2.</b> Proportion des points de relevés de végétation occupés par les deux classes de végétation (renouée du Japon et autre végétation) pour chacun des quatre types de morphologie de berge en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada).....                                                                                                                                  | 56 |
| <b>Tableau 3.</b> Modèle de régression multiple testant l'effet de la renouée du Japon sur la différence d'élévation (2019 vs 2018) des berges de la rivière Etchemin (Québec, Canada), et dont la variable indépendante binaire est la présence ou l'absence de la renouée. Le nombre d'observations (points de différence d'élévation) est de 11 952 et le $R^2$ du modèle est de 0,248. ....  | 60 |
| <b>Tableau 4.</b> Modèle de régression multiple testant l'effet de la densité des tiges de renouée du Japon sur la différence d'élévation (2019 vs 2018) des berges de la rivière Etchemin (Québec, Canada). Le nombre d'observations (points de différence d'élévation) est de 11 952 et le $R^2$ du modèle est de 0,265. ....                                                                  | 61 |

# Remerciements

Mon implication dans la recherche sur les plantes envahissantes, essentiellement sur la renouée du Japon, remonte à l'été 2017, lorsque j'ai été engagée par Claude Lavoie comme auxiliaire de recherche. Déjà, tout me plaisait : planifier une étude à mener à terme de manière autonome, le terrain sur les berges de la rivière Etchemin, l'identification de plantes avec ma collègue Élisabeth et, évidemment, l'encadrement de Claude. Je savais à ce moment qu'il me serait difficile de trouver un aussi bon directeur de recherche pour réaliser une maîtrise. Je tiens à le remercier sincèrement pour sa confiance, ses encouragements, sa rigueur, son sens critique aiguisé, ses excellentes idées, sa disponibilité et bien sûr sa passion pour les plantes envahissantes. Claude a aussi trouvé un codirecteur génial pour ce projet, Maxime Boivin, qui est chercheur à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) et spécialiste en hydrogéomorphologie. Maxime était toujours là pour m'éclairer sur des questions géomorphologiques ou méthodologiques malgré son horaire chargé et la distance. Je souhaite le remercier pour le partage de ses connaissances, sa grande générosité et son soutien. Je n'aurais pas pu rêver mieux comme encadrement venant de ces deux chercheurs exceptionnels.

Je voudrais remercier ces deux collègues qui m'ont aidé au cours des campagnes d'échantillonnage : Marianne Bouchard (UQAC), tout au long de l'été 2019 dans les clones de renouée immenses, et Maxime Maltais (UQAC), en novembre 2018 dans la neige et la rivière gelée. Merci aussi à ma collègue Élisabeth Groeneveld (Université Laval) pour son aide autant sur le terrain qu'au bureau. Ce fut un plaisir de partager réflexions, expériences, anecdotes et recettes. Je remercie aussi mon père Gaétan et mon amie Florence pour leur aide avec les fameuses caméras sur le terrain.

Je souhaite remercier Diego Andres Cardenas Morales et Jean Dubé (Université Laval) pour la réalisation des analyses statistiques. Leur patience, leur dévouement et leur enthousiasme sont à souligner. Je remercie aussi l'équipe du Centre GéoStat (Université Laval) pour leur appui, notamment avec les photographies aériennes historiques.

Merci à Thierry, à ma famille et mes amis pour leur support, leurs encouragements et leur intérêt tout le long de mes deux ultimes années d'étude.

Enfin, ce projet a été rendu possible grâce au financement du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (bourse de maîtrise à Rébecca Matte, subvention Établissement nouveau chercheur à Maxime Boivin), et à celui du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (subvention à la Découverte à Claude Lavoie).

# Introduction générale

## *Dissémination et impact des plantes envahissantes sur l'hydrogéomorphologie*

Les cours d'eau sont des entités géographiques qui disséminent de manière efficace de nombreuses espèces végétales et animales par l'écoulement des eaux. Plusieurs plantes aquatiques et riveraines profitent de l'hydrochorie, soit la dissémination des diaspores par l'eau, pour se propager rapidement (Pyšek et Prach, 1993; 1994; Planty-Tabacchi et al., 1996; Hood et Naiman, 2000; Jacquemyn et al., 2010; Aguiar et Ferreira, 2013; van Oorschot et al., 2017). La dynamique des crues dans les cours d'eau, avec la hausse du niveau d'eau et des débits, permet la dissémination rapide et sur de grandes distances de graines, de spores, de boutures ou d'autres organes de reproduction asexuée de l'amont vers l'aval (Planty-Tabacchi et al., 1996; Tickner et al., 2001; Richardson et al., 2007). Les diaspores sont ensuite et généralement déposées sur les berges là où l'écoulement de l'eau est plus calme et lors de la baisse des niveaux d'eau.

Les berges et les plaines inondables sont des environnements adéquats pour la germination et l'enracinement des espèces végétales riveraines (Hood et Naiman, 2000). La compétition végétale dans ces milieux peut être réduite par des processus hydrogéomorphologiques comme l'érosion, facilitant ainsi l'installation de nouvelles espèces arrivées par l'eau dans les habitats libres de végétation (Hood et Naiman, 2000; Martin, 2019). Toutefois, ces espèces végétales doivent être adaptées aux conditions particulières des zones riveraines : la variation du niveau d'eau (sécheresse lors de l'étiage et inondation lors des crues) est un stress que doivent tolérer les plantes pour survivre et se reproduire (Bottollier-Curtet et al., 2013). Certaines espèces auront un avantage sur les autres dans leur établissement en milieux riverains. C'est le cas si elles poussent rapidement, s'accaparent les ressources nutritives du sol et la lumière et arrivent à occuper un espace de manière prépondérante grâce à des mécanismes efficaces de propagation végétative ou grâce à la production d'un grand nombre de graines. Ces caractéristiques se trouvent chez les plantes envahissantes, indigènes ou exotiques, qui arrivent à coloniser ces milieux à un rythme rapide (Lavoie, 2019).

Un changement rapide de végétation, comme lors de l'invasion d'une berge par une plante envahissante, peut avoir des effets sur les processus hydrogéomorphologiques ayant cours dans une rivière (Rowntree, 1991; Corenblit et al., 2011). Les plantes, par leurs interactions avec les processus hydrologiques, sédimentologiques et biologiques, peuvent influencer la géomorphologie des cours d'eau (Schumm, 1968; Smith, 1976; Murray et Paola, 2003; Murray et al., 2008; Davies et Gibling, 2009; 2010; Corenblit et al., 2011). La végétation peut agir sur la morphologie fluviale en stabilisant les berges ou, au contraire, en favorisant leur érosion, ou même en formant des îlots par accumulation de matière organique et par captation de sédiments (Schumm, 1968; Smith, 1976; Elliott, 2000; Gurnell et al., 2001; Corenblit et al., 2011; Zhu et al., 2018). Quelques études effectuées un peu partout dans le monde montrent des changements dans la géomorphologie fluviale à la suite d'un envahissement par des espèces exotiques. Ce sont surtout les impacts négatifs qui attirent l'attention des chercheurs, les éventuels impacts positifs étant très peu documentés.

Parmi les espèces ayant un impact négatif sur la géomorphologie fluviale, il y a d'abord le lupin polyphylle (*Lupinus polyphyllus*), introduit dans les années 1990 en Patagonie, au Chili. La plante a colonisé des bancs de gravier en rivière n'ayant jusqu'alors jamais accueilli de végétation. Cette espèce réussit, lors des inondations, à piéger les sédiments fins grâce à son feuillage épais et au couvert dense que les tiges forment. Cela a pour effet de diminuer la rugosité des bancs de gravier et de réduire l'érosion des berges grâce à une meilleure cohésion du sol redevable aux racines des plantes. Ultimement, cela entraîne la formation de cours d'eau moins larges (Simon et Collison, 2002; Wynn et al., 2004; Meier et al., 2013).

Un cas similaire à celui du lupin est l'invasion des rivières par les tamaris (*Tamarix* ssp.) dans le sud-ouest des États-Unis. Le réseau racinaire des arbustes de genre *Tamarix* est plus robuste que celui des espèces indigènes locales. Il résiste plus facilement aux inondations subites et aux stress hydriques qui surviennent lorsque la quantité d'eau transpirée par la plante est supérieure à la quantité absorbée (Tickner et al., 2001). Les populations denses de tamaris ont le même effet que celles du lupin au Chili : elles captent les sédiments et le bois mort transportés par l'écoulement, ce qui augmente la quantité d'alluvions sur les berges (Birkeland, 1996). Un rétrécissement de 27 % de la largeur d'un cours d'eau a déjà été mesuré suite à une invasion, car cet arbuste a alors permis la création d'un chenal non mobile

en stabilisant davantage ses berges (Graf, 1978). Comme le lit du cours d'eau se rétrécit, mais que le débit ne change pas, les risques d'inondations peuvent augmenter (Tickner et al., 2001).

Certaines espèces envahissantes ont l'effet contraire de ceux décrits précédemment, comme la canne de Provence (*Arundo donax*) qui facilite l'érosion des berges en Californie (Stover et al., 2018). Cette espèce possède une couche de rhizomes de 10 à 20 cm d'épaisseur, en surface. Le sol des berges qui se trouve sous cette couche de rhizomes demeure très vulnérable à l'érosion. Lorsque le débit ou les vitesses d'écoulement du cours d'eau sont très élevés, il peut en résulter un phénomène de sapement basal : le sol sous le réseau des rhizomes est érodé, ce qui laisse pendre les blocs de sol avec rhizomes jusqu'à ce qu'ils s'écroulent sous l'effet de leur propre poids, faisant alors reculer la berge à chaque épisode de crue (Stover et al., 2018). L'impatiante glanduleuse (*Impatiens glandulifera*) serait aussi responsable d'une augmentation de l'érosion des berges. Le processus est toutefois différent : cette plante herbacée annuelle meurt rapidement suite au premier gel automnal, ce qui laisse le sol à nu et le rend plus susceptible d'être érodé durant les crues hivernales et printanières. Le taux d'érosion causé par l'impatiante équivaut, en Suisse, à un ajout annuel de 2 300 tonnes de sédiments fins par hectare de rive envahie (Greenwood et Kuhn, 2014).

L'impact de l'impatiante glanduleuse sur l'érosion des berges a été mis en parallèle avec celui de la renouée du Japon (*Reynoutria japonica* s.l., Polygonaceae), une autre plante envahissante – vivace celle-là – dont les tiges meurent aussi l'automne venu, laissant le sol à nu durant les fortes crues de l'automne et du printemps (figure 1) (van Oorschot et al., 2017). L'effet qu'aurait cette plante sur l'érosion est toutefois peu étudié, malgré le fait qu'il semble évident pour plusieurs qu'elle soit responsable de la perte de sol en bordure des cours d'eau. La colonisation rapide des bandes riveraines par la renouée dans les pays où elle a été introduite rend primordiale l'acquisition de connaissances quant à ses effets sur les écosystèmes et les processus fluviaux dans le but de savoir s'il s'agit d'un réel problème sur lequel les gestionnaires devraient s'investir sans tarder.



**Figure 1.** Sol laissé à nu à l'emplacement d'un clone de renouée du Japon après la crue printanière sur les berges de la rivière Etchemin, Chaudière-Appalaches, Québec (photographie : Rébecca Matte).

### *L'érosion des berges, ses impacts économiques et environnementaux*

Il est important de définir le processus d'érosion, son implication dans la dynamique des rivières et ses effets économiques et sur l'environnement. L'érosion est un phénomène naturel du recul et de la transformation du relief du sol par des agents externes comme le vent, la glace, l'eau ou l'action humaine. Dans les rivières alluviales, dont le lit est formé par le dépôt des sédiments transportés, l'érosion des berges est un processus fondamental. L'érosion influence la formation et la migration du chenal, l'ajustement de la géométrie hydraulique et l'apport sédimentaire (Hickin et Nanson, 1984; Lawler et al., 1997; Laubel et al., 2003; Henshaw et al., 2012; Jugie et al., 2018). Il s'agit d'un phénomène complexe qui survient suite à la combinaison de deux mécanismes principaux : le mouvement de masse, déclenché par la gravité en fonction de la composition de la berge, et l'érosion fluviale, causée par l'action hydraulique, surtout lors des crues, qui détache des sédiments de la berge (Hooke, 1979; Thorne et Tovey, 1981; Thorne, 1982; Lawler, 1992; Rinaldi et Darby, 2008).

Un troisième mécanisme peut contribuer à l'érosion des berges, mais ne fait pas l'unanimité chez les chercheurs (Thorne et Tovey, 1981; Thorne, 1982) et est souvent vu comme étant préparatoire aux deux autres mécanismes principaux d'érosion. Il s'agit des mouvements subaériens, qui fragilisent et altèrent la surface des berges par le déplacement des particules de sol associé aux conditions d'humidité de celles-ci (Prosser et al., 2000; Couper et Maddock, 2001; Couper, 2003; Hamel, 2012). Les cycles humidification-dessiccation (Green et al., 1999; Prosser et al., 2000; Robert, 2003), l'érosion par infiltration, par percolation ou par ruissellement de l'eau (Bryan, 2000), ainsi que les cycles gel-dégel (Lawler, 1993a; Couper, 2003) sont des exemples de mouvements subaériens pouvant prendre part aux processus d'érosion des berges.

Plusieurs conséquences économiques peuvent résulter de l'érosion des berges. Parmi celles-ci, il y a la perte de terrain, ce qui peut menacer les infrastructures présentes et faire diminuer la valeur des propriétés riveraines. La réduction des terres fertiles par l'érosion, surtout lorsque les bandes riveraines sont éliminées, constitue un enjeu important pour les rendements agricoles (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2014). Un effet direct de l'érosion des berges est l'ajout de sédiments dans les cours d'eau (Coldwell, 1957; Laubel et al., 1999; Walling, 2005). La sédimentation des cours d'eau peut notamment occasionner des problèmes de traitement de l'eau potable qui peuvent être dispendieux pour les municipalités (Lachance, 2017). De plus, l'aggradation du lit des rivières par l'accumulation de sédiments au fond de ceux-ci peut aussi engendrer des problèmes d'inondations en bloquant l'évacuation des eaux lors des crues (Biron et al., 2020).

Sur le plan environnemental, l'augmentation des sédiments dans l'eau engendre une augmentation de la turbidité. La transparence de l'eau est ainsi réduite et sa température augmente, puisque les fines particules en suspension absorbent la lumière du soleil, ce qui peut réduire la disponibilité en oxygène et ainsi affecter certains organismes (Paaijmans et al. 2008; Österling, 2015). La turbidité a été mise en relation avec une perte d'habitat pour les poissons ou une diminution de leur diversité (Mol et Ouboter, 2004). Une plus grande turbidité peut même engendrer des malformations physiques chez les individus (Reash et Berra, 1989). Les salmonidés sont particulièrement affectés par la sédimentation des rivières, puisque l'oxygène circule moins bien entre les fines particules déposées que dans les lits

graveleux qui sont habituellement utilisés comme frayères par ces poissons (Greig et al., 2005).

### *Écologie de la renouée du Japon*

La renouée du Japon est une plante pérenne à rhizomes qui croît rapidement au printemps et qui forme des massifs très denses. Ses tiges vertes tachetées de pourpre sont droites et creuses et peuvent atteindre de 2 à 3 m de haut. Elle fleurit de septembre à octobre et ses petites fleurs blanches sont disposées en grappes. Les parties aériennes de la plante meurent suite aux premiers gels d'automne, laissant sur place des tiges sèches et brunes. Les rhizomes, qui conservent les nutriments et les sucres pour la plante, sont pérennes et ligneux et peuvent s'étendre jusqu'à 2 m en profondeur dans le sol (Child et Wade, 2000).

La renouée du Japon, comme son nom l'indique, est originaire du Japon, mais aussi de Taiwan, de la Corée du Sud et du nord de la Chine où elle pousse dans des écosystèmes ayant des conditions très variées (Child et Wade, 2000). Elle a été introduite en Europe par un médecin néerlandais, Philipp von Siebold, au début des années 1830 (Beerling et al., 1994). Elle a ensuite été vendue un peu partout en Europe et en Amérique du Nord comme plante ornementale, étant donné son feuillage attrayant et sa floraison tardive et abondante (Child, 1999). Au Canada, les plus vieilles observations de renouée remontent à 1901 à Longueuil (Québec), Niagara Falls (Ontario) et Chilliwack (Colombie-Britannique) (Barney, 2006).

La renouée du Japon se propage essentiellement dans les écosystèmes urbains, ainsi que le long des cours d'eau, des routes et des chemins de fer (Lavoie, 2019). Ce sont des fragments de tiges ou de rhizomes transportés par l'eau ou par les humains, de manière accidentelle ou pour l'horticulture, qui initient les nouveaux clones (figure 2) (Pyšek et Prach, 1993; 1994; De Waal, 2001; Barney, 2006). Sa propagation est surtout rapide le long des rivières où les fragments peuvent être détachés du plant mère par l'eau ou la glace. Emportés par le courant, ils peuvent générer des clones lorsqu'ils sont redéposés sur les berges. En Amérique du Nord, il existe des preuves convaincantes que cette plante peut aussi produire des graines viables en abondance (Forman et Kesseli, 2003; Bram et McNair, 2004; Grimsby et al., 2007; Gammon et al., 2010; Groeneveld et al., 2014; Duquette et al., 2016). Les plantules issues d'une graine sont toutefois rarement trouvées en nature (Forman et Kesseli, 2003). Les

données génétiques les plus récentes récoltées au Québec (rivière Etchemin) ne fournissent aucun indice à l'effet que les graines propagent la renouée, étant donnée la très forte homogénéité génétique des clones en présence (C. Lavoie et F. Belzile, Université Laval, données non publiées).



**Figure 2.** Fragment de rhizome de renouée du Japon trouvé sur les berges d'une rivière (photographie : Rébecca Matte).

Une invasion par la renouée du Japon peut avoir plusieurs effets environnementaux. Elle entre en compétition avec les espèces végétales vasculaires indigènes en formant des clones si denses qu'ils ne laissent pas pénétrer la lumière jusqu'au sol, ce qui a pour effet de réduire la diversité végétale dans certains écosystèmes (Tokarska-Guzik et al., 2006; Gerber et al., 2008; Aguilera et al., 2010; Maurel et al., 2010; Stoll et al., 2012; Chmura et al., 2015). L'abondante production de biomasse de la renouée et la profondeur de ses rhizomes modifie la chimie du sol. Il peut en résulter une augmentation du ratio C/N et de l'épaisseur de l'horizon A et une diminution du pH, de l'humidité du sol et de la concentration en K et N inorganique au printemps (Kappes et al., 2007; Dassonville et al., 2007; 2011; Maurel et al., 2010; Tharayil et al., 2013; Mincheva et al., 2014). Bien que certaines espèces fauniques peuvent bénéficier de la présence de la renouée (Kappes et al., 2007; Lecerf et al., 2007; Topp et al., 2008), certains macroinvertébrés, microarthropodes, gastropodes (escargots), amphibiens (*Lithobates clamitans*) et oiseaux voient leur habitat altéré lorsque la plante envahissante est présente (Maerz et al., 2005; Gerber et al., 2008; Skubała et Mierny, 2009;

Stoll et al., 2012; Hajzlerová et Reif, 2014; Horáčková et al., 2014). Cela dit, les interactions entre la renouée et les écosystèmes riverains sont loin d'être bien comprises (Lavoie, 2017), surtout en ce qui concerne la géomorphologie fluviale et, plus précisément, l'impact qu'aurait cette plante envahissante sur l'érosion des berges.

### *Dynamique de la renouée du Japon en milieux riverains*

L'objectif général de ce mémoire est de mieux comprendre la dynamique spatio-temporelle de la renouée du Japon dans un milieu riverain influencé par des crues récurrentes et des débâcles de glace. De manière plus précise, la première partie du mémoire porte sur la description et la compréhension de la manière avec laquelle la renouée se propage lors d'une crue printanière. Je voulais savoir sur quelle distance les fragments de rhizomes étaient disséminés par l'eau et la glace au printemps et à quels endroits ils aboutissaient sur les berges et la plaine inondable. La seconde partie de mon mémoire s'intéresse à l'effet de la renouée sur l'érosion des berges. Il existe de nombreuses références à ce sujet dans la littérature scientifique, revue ou non par les pairs, mais un point commun de tous ces travaux est l'absence de données tissant un lien de cause à effet entre renouée et érosion (Child et Wade, 2000; Mummigatti, 2001; Larsen, 2013; Christopher, 2014; van Oorschot et al., 2017). Mon objectif était donc de mesurer, avec des instruments précis, l'effet réel de la renouée sur l'érosion des berges d'une rivière sujette à des crues récurrentes et à des débâcles de glace.

Les deux parties de mon mémoire sont intimement associées. Si la renouée du Japon favorise une plus forte érosion des berges, alors on peut s'attendre à ce qu'une portion des parties souterraines de la renouée (rhizomes) soit aussi arrachée du sol. Ces fragments de rhizomes détachés des clones seront emportés par l'écoulement de l'eau, puis déposés plus loin vers l'aval. Les fragments qui arriveront à s'enraciner et à croître formeront de nouveaux clones. Ainsi, la propagation de la plante se fera de manière encore plus rapide si la renouée favorise bel et bien l'érosion des berges. Éventuellement, un plus grand nombre de clones en milieux riverains pourraient engendrer de plus grandes pertes de sol, complétant cette boucle de rétroaction positive. De plus, l'intensité des événements de crues et de débâcles de glace pourrait avoir un effet autant sur l'érosion des berges envahies par la renouée que sur sa vitesse de dissémination le long des cours d'eau.

# 1. Crues et dissémination : la propagation de la renouée du Japon en milieu riverain

## *Résumé*

La renouée du Japon est une plante envahissante pérenne à rhizomes qui se propage rapidement sur les berges des milieux riverains où elle a été introduite. Bien que la plante puisse se reproduire par graines, elle se dissémine surtout par des fragments de rhizomes. L'objectif de ce chapitre est de décrire et de comprendre la dissémination par voie d'eau de la renouée du Japon, dans le contexte d'une rivière (Etchemin, Québec) sujette à des crues récurrentes et à l'influence de la glace. Les foyers d'invasions principaux se concentrent dans cette rivière dans la partie la plus en aval, près des agglomérations urbaines les plus importantes. J'ai mesuré, de 2003 à 2018, avec des images satellites et aériennes, une augmentation de 813 % de la superficie occupée par la renouée dans un tronçon de 23 km de la rivière Etchemin. Cette augmentation avait une tendance linéaire. Deux types de fragments ont été trouvés près de la rivière à la suite de la crue printanière de 2019 : des collets (amoncellement de terre incluant la base des tiges et des rhizomes) et des fragments de rhizomes enterrés sous les sédiments. En tout, 681 collets et de 634 fragments de rhizomes ont été trouvés lors d'inventaires dans un tronçon de 7 km de rivière. En plus de l'eau, les glaces qui raclent le sol des berges ont le potentiel d'arracher des fragments de renouée et de les transporter plus loin. Le poids moyen des collets était de 2,2 kg et la distance moyenne de leur déposition perpendiculairement à la rive était de 25 m. Les zones de déposition des fragments se concentraient sur les îlots, sur les berges linéaires, dans les courbes convexes des méandres et sur la plaine inondable. Bien qu'il soit difficile d'évaluer le taux de survie des fragments de renouée, il est à craindre que beaucoup d'entre eux génèrent de nouveaux clones à plus ou moins brève échéance. Au fil des ans, plus les clones de renouée deviennent nombreux et étendus, plus le nombre de collets et de fragments générés au printemps lors des crues est élevé, ce qui engendre encore plus de clones. Toutefois, on peut s'attendre à ce que la dissémination des fragments de renouée soit différente d'une année à l'autre selon l'intensité des crues.

## 1.1 Introduction

Les cours d'eau forment d'excellents corridors de dissémination pour de nombreuses espèces végétales comme animales. Plusieurs plantes, qu'elles soient aquatiques ou riveraines, profitent de l'écoulement des eaux pour propager rapidement leurs diaspores, que ce soit sous la forme de graines ou de fragments de tiges ou de racines (Pyšek et Prach, 1993; 1994; Planty-Tabacchi et al., 1996; Hood et Naiman, 2000; Jacquemyn et al., 2010; Aguiar et Ferreira, 2013; van Oorschot et al., 2017). Les perturbations naturelles et fréquentes que sont les crues favorisent cette propagation rapide (Planty-Tabacchi et al., 1996; Tickner et al., 2001; Richardson et al., 2007). La montée des eaux et les forts débits permettent le transport des diaspores sur de grandes distances, de l'amont vers l'aval. Ces diaspores sont ensuite déposées avec des alluvions parfois riches en nutriments sur les berges et sur les plaines inondables, qui constituent des habitats appropriés pour leur germination ou leur enracinement (Hood et Naiman, 2000). La dynamique hydrogéomorphologique propre aux cours d'eau (notamment l'érosion) peut aussi éliminer la végétation concurrente, ce qui peut faciliter l'établissement d'un certain contingent de plantes dans les habitats riverains ainsi découverts et où il n'y a pas de compétition végétale (Hood et Naiman, 2000; Martin, 2019). Ces plantes riveraines doivent toutefois tolérer le stress des fluctuations du niveau de l'eau, allant de la sécheresse lors de l'étiage, jusqu'à l'inondation lors des crues (Bottollier-Curtet et al., 2013). Si, de surcroît, elles poussent rapidement, accaparent les ressources nutritives du sol et occupent entièrement l'espace par des mécanismes efficaces de propagation végétative ou grâce à un nombre très élevé de graines, elles risquent de devenir envahissantes (Lavoie, 2019). Ces caractéristiques se trouvent chez la renouée du Japon (*Reynoutria japonica s.l.*, Polygonaceae).

La renouée du Japon est une plante envahissante asiatique particulièrement compétitive dans les milieux riverains en Amérique du Nord et en Europe (Pyšek et Prach, 1993; Barney, 2006; Colleran et Goodall, 2014; Groeneveld et al., 2014; Duquette et al., 2016). C'est une plante vivace à rhizomes qui croît rapidement au printemps et qui forme des massifs (clones) avec une densité de tiges élevée. Les rhizomes, qui conservent les nutriments et les sucres, sont pérennes et ligneux, et peuvent s'étendre jusqu'à 2 m en profondeur dans le sol (Child et Wade, 2000). Les tiges vertes tachetées de pourpre sont droites et creuses et peuvent atteindre

une hauteur de 2 à 3 m. Les feuilles vertes ont à peu près la dimension de la paume d'une main. La renouée fleurit de septembre à octobre et ses petites fleurs blanches sont disposées en grappes. Les parties aériennes de la plante meurent suite aux premiers gels automnaux. Cette plante pousse surtout en bordure des cours d'eau et sur les talus des routes et des chemins de fer. Elle est aussi fréquemment rencontrée dans les friches (Lavoie, 2019).

Comme son nom l'indique, la renouée est originaire du Japon, mais aussi de Taiwan, de la Corée du Sud et du nord de la Chine (Lavoie, 2019). Elle a été introduite en Europe par un médecin néerlandais, Philipp von Siebold, au début des années 1830 (Beerling et al., 1994). Elle a ensuite été vendue un peu partout en Europe et en Amérique du Nord comme plante ornementale, étant donné son feuillage attrayant et sa floraison tardive et abondante (Child, 1999). Au Canada, les plus vieilles observations de renouée remontent à 1901 à Longueuil (Québec), Niagara Falls (Ontario) et Chilliwack (Colombie-Britannique) (Barney, 2006).

La renouée du Japon peut se disséminer au sein des systèmes fluviaux grâce à ses achènes qui flottent un certain temps (Rouifed et al., 2011; Lamberti-Raverot et al., 2017). En Amérique du Nord, il existe des preuves convaincantes que cette plante peut produire des graines viables en abondance (Forman et Kesseli, 2003; Bram et McNair, 2004; Grimsby et al., 2007; Gammon et al., 2010; Groeneveld et al., 2014; Duquette et al., 2016). Les plantules issues d'une graine sont toutefois rarement trouvées en nature (Forman et Kesseli, 2003). Il est plus probable que la renouée se propage d'un endroit à un autre grâce à des fragments de rhizomes ou de tiges qui peuvent se réenraciner et former de nouveaux clones. En effet, un fragment de rhizome ou de tige peut générer un nouvel individu s'il contient au moins un nœud méristématique (De Waal, 2001). Il semble que le taux de viabilité des fragments soit positivement corrélé à leur poids (Francis et al., 2008; Goodman et Colleran, 2014; Gowton et al., 2016; Martin, 2019). Cela dit, même des fragments de rhizomes pesant moins que 1 g peuvent générer de nouveaux individus (Brock et Wade, 1992). Les rhizomes ont par ailleurs un potentiel de régénération plus de deux fois plus élevé que celui des tiges (Bímová et al., 2003; Gowton et al., 2016). Les rhizomes contiennent en effet davantage de ressources que les tiges et sont donc plus efficaces pour générer des racines (Francis et al., 2008; Colleran et Goodall, 2014). Lors d'une recherche sur des jeunes plants de renouée près de rivières dans l'état du Vermont (États-Unis) à la suite d'une tempête tropicale estivale, on a estimé

que 70 % des plants étaient issus de rhizomes, le reste de tiges (Colleran et Goodall, 2014). Une étude similaire sur une technique de déterrage précoce des jeunes plants de renouée le long de rivières en France (Savoie) a montré pour sa part que 95 % des plants étaient issus de fragments de rhizomes (Barthod et Boyer, 2019).

Les fragments de renouée du Japon peuvent s'implanter dans de nouveaux sites riverains grâce au transport d'un sol par les humains ou de manière plus naturelle par voie d'eau. Cela se produirait notamment lors des crues printanières consécutives à la fonte de la neige, ou estivales à la suite d'un événement hydroclimatique (Colleran et Goodall, 2014; 2015; van Oorschot et al., 2017). Une perturbation des berges par l'eau et la glace est nécessaire pour que les rhizomes, les tiges et même des morceaux de sols contenant des rhizomes soient arrachés (Colleran et Goodall, 2014; van Oorschot et al., 2017). Les fortes crues permettent ensuite de transporter sur une certaine distance tous les types de fragments, même ceux qui n'ont pas une bonne flottabilité, comme les rhizomes. Les fragments de tiges et de rhizomes demeurent viables environ trois semaines dans l'eau (Puijalon et al., 2019). Certains se déposent avec d'autres sédiments dans les zones des rivières où les vitesses d'écoulement sont plus lentes, par exemple sur les plaines inondables ou sur les berges convexes des secteurs avec méandres (Boyer et Barthod, 2019). Lors d'une campagne de déterrage de plants de renouée dans le territoire de Cœur de Savoie (Savoie, France), 85 % des fragments de rhizomes à l'origine des plants se trouvaient à moins de 100 m du clone de renouée le plus proche en amont, 9 % entre 100 et 500 m et 5 % à plus de 500 m (Barthod et Boyer, 2019). De même, en bordure d'une rivière, la répartition des clones de renouée serait négativement corrélée à la distance des autres clones de la même espèce et à la distance des agglomérations urbaines riveraines, considérées comme des foyers importants d'introduction de la plante (Duquette et al., 2016).

Plusieurs lacunes dans les connaissances sur la dissémination de la renouée du Japon en bordure des cours d'eau subsistent. D'abord, il n'existe pas de modèle qui permet de comprendre comment sont déposés les fragments de renouée dans un système fluvial en régions froides. Dans de telles régions, les cours d'eau sont recouverts de glace l'hiver. Au printemps, il peut y avoir des débâcles thermiques si le couvert de glace fond lentement tout en restant sur place, ce qui arrive parfois lorsque la température se réchauffe doucement et

qu'il y a peu de pluie. Les morceaux de glace des débâcles thermiques sont bien désagrégés et sont évacués facilement sans que le débit n'augmente considérablement, souvent sans même créer d'embâcles de glace (Beltaos, 1997; Beltaos et al., 2006). Cependant, après une hausse subite de la température ou une forte pluie qui fait monter le niveau de l'eau, le couvert de glace peut se fendre soudainement, ce qui entraîne une débâcle de glace mécanique (Beltaos et al., 2006). Les blocs de glace de dimensions variables peuvent causer des embâcles dans le chenal de la rivière où il y a des méandres, des îlots, un rétrécissement du chenal ou un autre type d'obstacle (Beltaos, 1997). Les débâcles mécaniques peuvent être responsables de l'érosion des berges, de la destruction de la végétation et même d'inondations subites là où il y a des embâcles (Boucher et al., 2009; Demers et al., 2014; Morin et al., 2015). Dans de telles circonstances, la dissémination de la renouée n'a jamais été étudiée. On ne connaît pas 1) la quantité de fragments qui peuvent être disséminés en bordure d'un cours d'eau occupé par la plante, 2) la distance qu'ils parcourent suite à un événement de crue avec glace, 3) les endroits propices à leur enracinement et 4) leur taux de survie, c'est-à-dire leur capacité à produire de nouveaux clones.

L'objectif de ce chapitre est de décrire et de comprendre la dissémination par voie d'eau de la renouée du Japon, dans le contexte d'une rivière sujette à des crues récurrentes et à l'influence de la glace. Pour y arriver, j'ai d'abord cartographié les clones de la plante sur l'ensemble du cours d'une rivière en voie d'envahissement (rivière Etchemin). J'ai ensuite reconstitué avec des documents historiques le patron d'envahissement dans un secteur fortement occupé par la renouée. J'ai enfin cartographié les fragments de rhizomes s'étant disséminés dans ce même secteur au cours de la crue printanière de 2019, une crue particulièrement forte dont la récurrence est de près de 50 ans (tableau 1). J'ai émis les hypothèses suivantes :

- **H<sub>1</sub>** : la superficie des clones de renouée du Japon a augmenté de manière exponentielle depuis son apparition sur les berges de la rivière Etchemin.
- **H<sub>2</sub>** : plus le poids d'un fragment de rhizome de renouée et du sol qui le contient est élevé, moins la distance parcourue par ce fragment par rapport à la berge de la rivière est importante.

- **H<sub>3</sub>** : il y a un plus grand nombre de fragments de rhizomes de renouée déposés en bordure de la rivière dans les zones d'accumulation de sédiments que dans les zones d'érosion. Les zones d'accumulation se trouvent dans les berges convexes des méandres et dans la plaine d'inondation, où la vitesse d'écoulement est plus lente et la topographie plane.

**Tableau 1.** Périodes de récurrence des débits de crues de la rivière Etchemin entre 1964 et 2019 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020) calculées avec la loi de log-Pearson type 3 (Griffins et Stedinger, 2007). Avec le débit observé en 2019, la période de récurrence serait de 50 ans (en rouge dans le tableau).

| Période de récurrence (années) | Probabilité (%) | Facteur de fréquence K | y = log (Q) | Débit de crue Q (m <sup>3</sup> /s) |
|--------------------------------|-----------------|------------------------|-------------|-------------------------------------|
| 1,05                           | 95              | -1,778                 | 2,205       | 160                                 |
| 1,11                           | 90              | -1,324                 | 2,263       | 183                                 |
| 1,25                           | 80              | -0,807                 | 2,328       | 213                                 |
| 2                              | 50              | 0,086                  | 2,441       | 276                                 |
| 5                              | 20              | 0,856                  | 2,539       | 346                                 |
| 10                             | 10              | 1,213                  | 2,584       | 384                                 |
| 25                             | 4               | 1,560                  | 2,628       | 424                                 |
| 50                             | 2               | 1,766                  | 2,654       | 451                                 |
| 100                            | 1               | 1,941                  | 2,676       | 474                                 |
| 200                            | < 1             | 2,091                  | 2,695       | 496                                 |

## 1.2 Méthodes

### 1.2.1 Aire d'étude

L'étude de la dissémination de la renouée du Japon a été réalisée en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada). Il s'agit d'une rivière à méandres stables particulièrement envahie par la renouée. Elle se situe dans la région de Chaudière-Appalaches (figure 3). Sa source (46°35'16,5"N; 70°25'27,5"O) se trouve dans la chaîne montagneuse des Appalaches. Son exutoire est le fleuve Saint-Laurent, près de la ville de Lévis (46°45'47,6"N; 71°13'52,3"O). La rivière Etchemin a une longueur totale de 124 km et son bassin versant a une superficie de 1 466 km<sup>2</sup>. Ce bassin versant est occupé sur 30 % de sa superficie par des terres agricoles, sur 61 % par la forêt, sur 4 % par des milieux humides et sur 2 % par des

zones urbanisées (Conseil de bassin de la rivière Etchemin, 2014). C'est dans sa section la plus en aval, dans les basses-terres du fleuve Saint-Laurent, que se concentrent les terres agricoles, surtout cultivées pour la production de maïs et de soya. Ces terres occupent 56 % du territoire dans les basses-terres (Conseil de bassin de la rivière Etchemin, 2014).

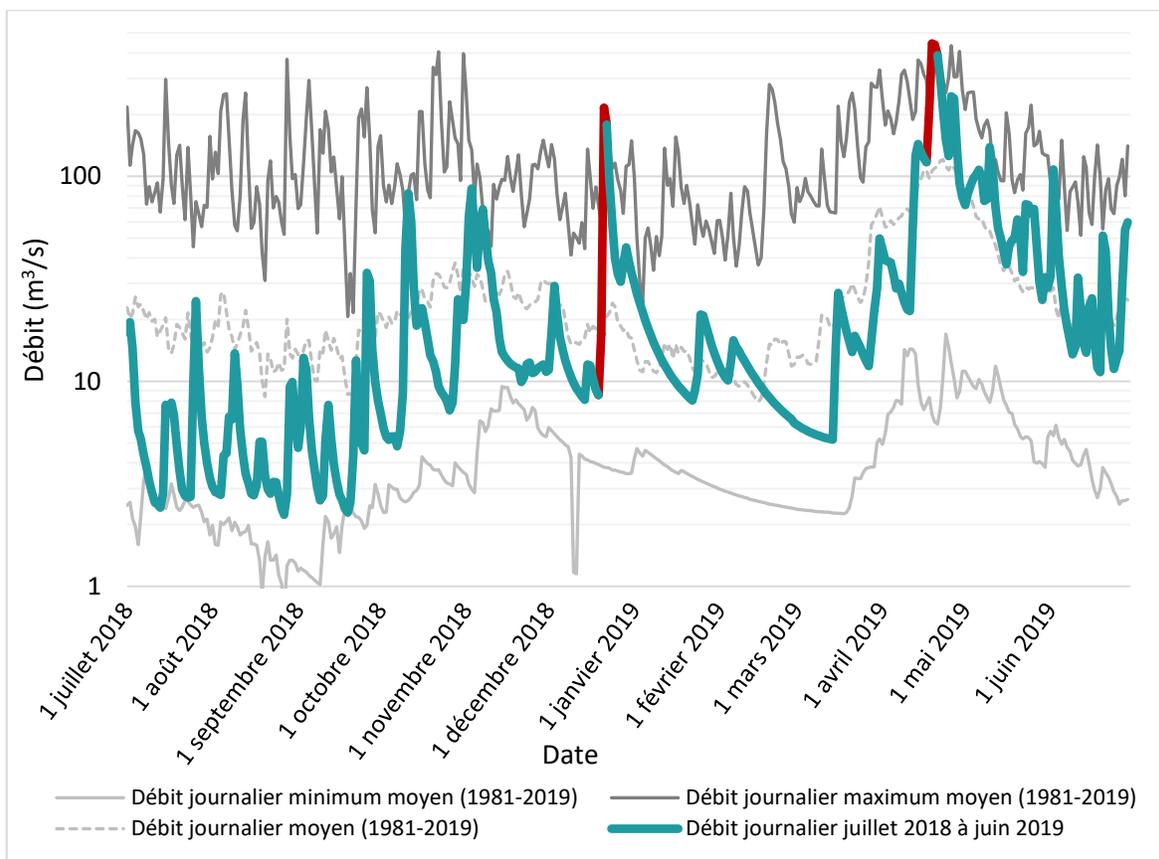
Les données 1981–2010 de la station météorologique de Beauséjour, située à 8 km à l'ouest de Saint-Henri-de-Lévis (figure 3), indiquent que la température moyenne annuelle est de 4,4 °C, janvier étant le mois le plus froid (température moyenne : -12,5 °C) et juillet le mois le plus chaud (température moyenne : 19,2 °C). Les précipitations annuelles totales sont de 1 253 mm, dont 26 % tombent sous forme de neige (Environnement Canada, 2019a).

Le débit journalier moyen de la rivière Etchemin à la hauteur du village de Saint-Henri-de-Lévis, situé à 19 km en amont de l'exutoire, a été calculé par le Centre d'expertise hydrique du Québec. Il était de 27 m<sup>3</sup>/s entre 1980 et 2018 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020). Les mois avec les débits journaliers moyens les plus forts ont été avril (86 m<sup>3</sup>/s) et mai (45 m<sup>3</sup>/s), alors que ceux avec les débits journaliers moyens les plus faibles ont été janvier (12 m<sup>3</sup>/s), février (12 m<sup>3</sup>/s), août (16 m<sup>3</sup>/s) et septembre (14 m<sup>3</sup>/s) (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2019). La rivière Etchemin est sujette aux débâcles et embâcles de glace. Certains ont causé des dommages matériels importants en 1993, 1994, 1995, 2016 et 2017 (Données Québec, 2016; Radio-Canada, 2019; Urgence Québec, 2019).

En 2019, le retour progressif des températures supérieures à 0 °C et des précipitations sous forme de pluie ont engendré une crue particulièrement forte à partir du 14 avril. Le pic de la crue a eu lieu le 20 avril, lorsque le débit a atteint 444 m<sup>3</sup>/s (figure 4). Une débâcle de glace mécanique et un embâcle de glace se sont aussi produits lors de la crue printanière. Une débâcle hivernale soudaine est aussi survenue le 22 décembre 2018. À cette date, le débit enregistré fut toutefois de moindre envergure qu'au printemps (215 m<sup>3</sup>/s) (figure 4).



**Figure 3.** Répartition de la renouée du Japon le long de la rivière Etchemin (Québec, Canada). La zone d'étude principale se trouve en amont du noyau villageois de Saint-Henri-de-Lévis.



**Figure 4.** Débits journaliers de la rivière Etchemin (Québec, Canada) à la hauteur du village de Saint-Henri-de-Lévis entre juillet 2018 et juin 2019 (Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020). On remarque les pics de crue un peu avant le 1<sup>er</sup> janvier et vers la mi-avril (en rouge sur le graphique). Les données moyennes de débit pour la période 1981–2019 sont indiquées à titre comparatif.

### 1.2.2 Répartition et historique de la renouée du Japon le long de la rivière Etchemin

La répartition des principaux clones de renouée du Japon sur l’ensemble du cours de la rivière Etchemin a été cartographiée par une analyse des tons et des textures d’images satellites (Bing Maps<sup>®</sup>, 2016; Google Earth<sup>®</sup>, 2016) et d’orthophotographies aériennes récentes de 30 cm de résolution (Ministère de l’Énergie et des Ressources naturelles du Québec, 2015). Dans chaque ensemble d’images, la renouée a une apparence distincte selon la saturation et la clarté des couleurs. Dans certains cas, la teinte de vert est plus intense ou plus pâle que la végétation environnante. Quant à la texture, c’est-à-dire l’agencement et la fréquence des

variations de teintes, elle est souvent rugueuse, dense, épaisse et touffue à cause du feuillage de la renouée.

Il faut donc, à partir d'un clone connu, déterminer quels sont la texture et le ton des clones de renouée pour chaque image satellite ou aérienne. Par exemple, sur les images satellites de Bing Maps<sup>®</sup> (2016), l'identification des clones de renouée est simplifiée par leur ton vert très saturé. Certaines images prises durant l'automne facilitent aussi la cartographie, car les clones ont alors une couleur brun-orange brûlé qui contraste avec celle des autres espèces végétales. Les cartes des clones effectuées grâce aux trois ensembles d'images ont ensuite été fondues en une seule dans le logiciel de cartographie ArcGIS (Esri<sup>®</sup>, 2018). Seuls les présumés clones visibles dans au moins deux ensembles d'images ont été retenus pour la carte.

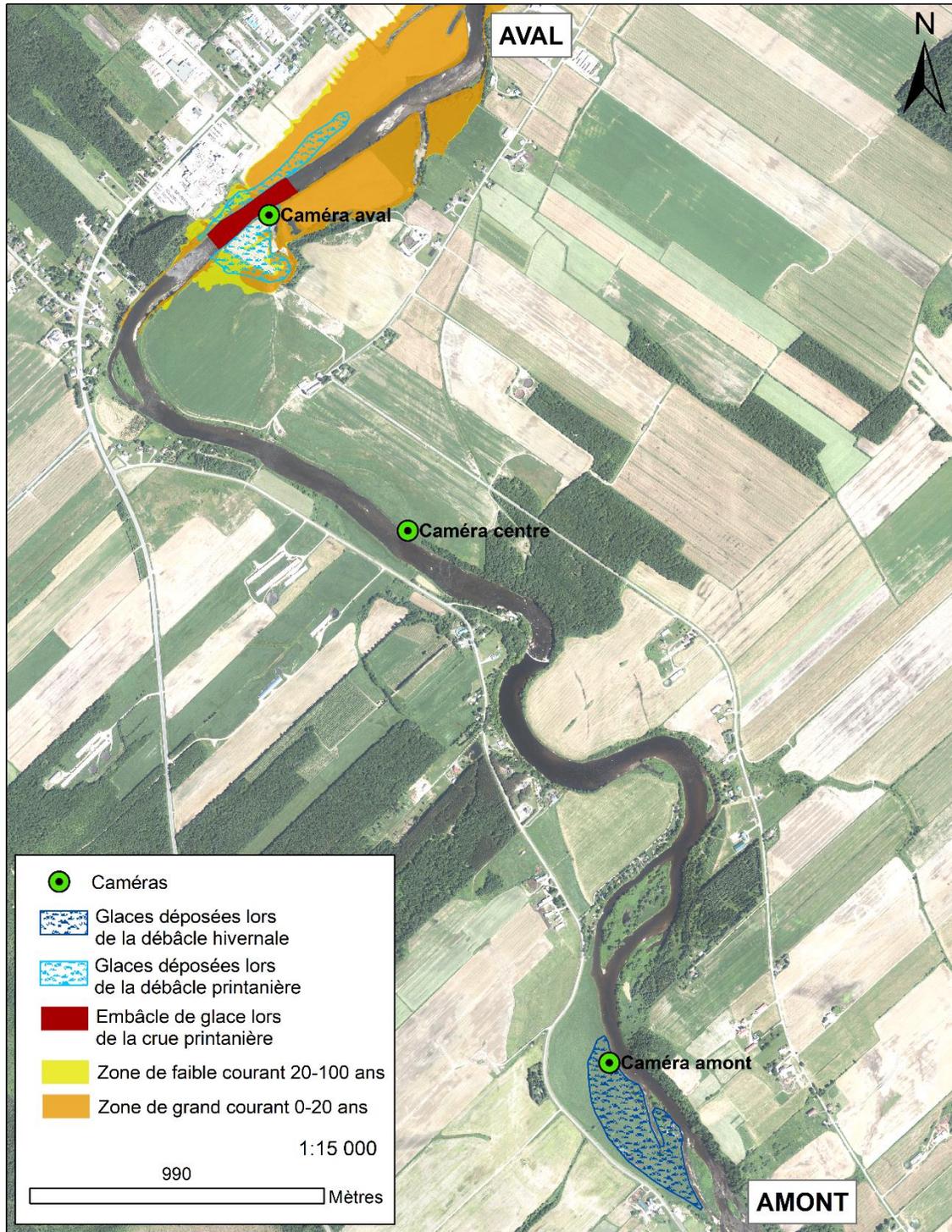
Les clones de renouée du Japon identifiés par la photo-interprétation ont été classés selon leur superficie en trois catégories : 1) 0 à 44 m<sup>2</sup> ( $n = 192$ ), 2) 45 à 154 m<sup>2</sup> ( $n = 163$ ) et 3) 155 m<sup>2</sup> et plus ( $n = 135$ ). Près du tiers des clones recensés sur les images et les photographies ont été sélectionnés au hasard pour une validation de leur identification sur le terrain, soit entre 48 et 50 clones par catégorie de superficie, pour un total de 148 clones. La validation de terrain a été réalisée entre le 22 juin et le 10 août 2017.

La connaissance de l'emplacement de la plupart des clones de renouée du Japon en bordure de la rivière Etchemin a facilité le travail de reconstitution historique de leur expansion. Des images aériennes pour les années 1964 (Ministère des Terres et Forêts du Québec, 1964), 1990 (Ministère des Ressources naturelles du Québec, 1990) et 2003 (Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2003), des orthophotographies pour les années 2010 (Agence de mise en valeur des forêts privées des Appalaches, 2010) et 2015 (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, 2015), et enfin des images satellites pour l'année 2018 (Google Earth<sup>®</sup>, 2018) ont été utilisées pour ce travail. La reconstitution historique s'est concentrée dans un secteur fortement envahi par la renouée et qui s'étend sur près de 23 km, entre le pont ferroviaire de Saint-Henri-de-Lévis (46°43'46,1" N; 71°08'13,0" O) et le pont du chemin Saint-Jacques au village de Saint-Anselme (46°37'39,2" N; 70°59'06,2" O). Ce secteur a aussi été choisi parce qu'il était le plus propice à une étude des effets de la renouée sur l'érosion (chapitre 3). Une fois les images du secteur

pour toutes les années géoréférencées dans le logiciel ArcGIS, les clones de renouée ont été repérés de la même manière que pour l'inventaire de 2017, c'est-à-dire par un examen de la texture et de la couleur. Les clones de renouée identifiés avec certitude ont été cartographiés et leur superficie respective bien circonscrite grâce au logiciel cartographique.

### **1.2.3 Caméras de suivi**

L'identification du type de crues, à l'eau claire (sans glace) ou consécutive à un embâcle thermique ou mécanique, peut permettre de mieux comprendre la dissémination de la renouée du Japon le long d'une rivière. Afin d'observer ces événements de crues, de débâcles et d'embâcles de glace, trois caméras de chasse Spypoint® (GG Telecom, Victoriaville) ont été installées de manière à suivre au jour le jour l'évolution du niveau de l'eau et du couvert de glace sur la rivière Etchemin. Elles ont été installées à trois endroits différents dans la zone d'étude où se concentre ce mémoire (figure 5). Trois tronçons à la morphologie distincte (linéaire, linéaire après méandre, méandre à chenaux multiples) ont été choisis pour observer le comportement des crues. Plus précisément, les caméras ont été installées sur des arbres accessibles et elles pointaient toutes vers l'aval de la rivière. Les photographies ont été prises, aux 30 minutes pendant le jour, entre 4h00 et 22h00, entre le 19 novembre 2018 et 13 mars 2019, puis aux 15 minutes entre le 13 mars et le 22 mai 2019, c'est-à-dire pendant la période de l'année la plus susceptible d'avoir des crues.



**Figure 5.** Localisation, en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada), des caméras de surveillance (pointant toutes vers l’aval), des endroits où les glaces ont été déposées lors de la débâcle hivernale (du 22 au 24 décembre 2018) et printanière (du 14 au 30 avril 2019) et des zones de faible et de grand courant, disponibles pour le secteur aval seulement (source : Centre d’expertise hydrique du Québec, 2012).

## 1.2.4 Inventaire des fragments de renouée du Japon

### 1.2.4.1 Inventaire des collets de renouée du Japon

Des visites de terrain préparatoires effectuées au printemps 2018 ont suggéré que la renouée du Japon se dissémine en bordure d'une rivière entre autres sous la forme d'amoncellements de différentes dimensions incluant de la terre, des rhizomes, des racines et la partie inférieure des tiges de l'année précédente (figure 6). Des bourgeons prêts à former de nouvelles tiges se trouvaient aussi à la base des tiges mortes. Je référerai à ce type d'amoncellement comme étant des collets («crown» en anglais), la partie de transition de la plante entre les tiges et le système souterrain de racines et de rhizomes. De toute évidence, ces collets sont arrachés du sol par l'eau ou par la glace.



**Figure 6.** Collets de renouée de Japon trouvés en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada) (photographies A : Rébecca Matte, 2019; B et D : Élisabeth Groeneveld, 2018; C : Claude Lavoie, 2018).

Un inventaire et une cartographie des collets de renouée du Japon ont été faits du 7 au 17 mai 2019, donc après que le niveau d'eau de la rivière en crue se soit abaissé et avant la croissance de la végétation riveraine. J'ai aussi de cette manière tenté de précéder le travail aux champs des agriculteurs, ce qui n'a pas toujours été possible. En tout, 11,5 km de berges (superficie totale : 42 ha) ont été parcourus dans la plaine inondable de la rivière Etchemin entre les villages de Saint-Anselme et de Saint-Henri-de-Lévis (figure 3). Cette zone d'étude a été sélectionnée parce qu'il y a un grand nombre de clones de renouée pouvant générer une quantité élevée de fragments et qu'elle était facilement accessible. Chaque collet trouvé a été cartographié grâce à un système de positionnement géographique (SPG) Garmin Montana® 650 ou 680 (Garmin, Olathe). Ils ont ensuite été pesés à l'aide d'une balance portative précise au 0,1 kg. Ce terrain a aussi donné lieu à une cartographie des cicatrices glacielles fraîches laissées sur l'écorce des arbres par les glaces lors de la débâcle de 2019. Cela a permis de savoir jusqu'où l'eau et les glaces s'étaient avancées à l'intérieur des terres, pour ainsi cartographier de façon plus précise l'étendue de la zone inondable cette année-là.

Les collets de renouée du Japon trouvés en mai 2019 n'étaient pas encore enracinés dans le sol. Pour savoir si ces collets ont bel et bien contribué à la propagation de la renouée, une quarantaine de ceux-ci ont été enrubannés avec un ruban forestier et une étiquette de métal lors de l'inventaire. Ces collets ont été choisis, car ils avaient un bon potentiel d'être retrouvés plus tard parce qu'ils n'avaient pas été déposés dans des clones de renouée ou dans des champs en culture. Ces collets ont été recensés de nouveau les 5 et 6 août 2019. On a alors noté leur état (mort ou vivant) et le nombre de tiges produites et leur hauteur, le cas échéant.

#### *1.2.4.2 Déterrage des fragments de renouée du Japon*

Les collets de renouée du Japon sont bien visibles au début du printemps avant même que les autres végétaux riverains ne poussent. Par contre, les plus petits fragments de rhizomes ou de tiges, qui peuvent aussi être disséminés par l'eau et la glace, sont pour leur part souvent enterrés sous des sédiments déposés lors de la crue printanière. Ils ne sont repérables qu'à la fin du printemps, car c'est à ce moment que les jeunes tiges vertes et violacées de la renouée, issues des fragments, émergent du sol. Une campagne de repérage et de déterrage des fragments de renouée – car il est nécessaire de les déterrer afin de s'assurer qu'ils proviennent bel et bien d'un morceau de rhizome ou de tige – s'est effectuée du 17 au 26 juin 2019.

Environ 6,6 km de berges (superficie totale : 6,9 ha) ont été parcourus pour ce travail dans une zone d'étude sensiblement la même que pour l'inventaire des collets. Le secteur choisi pour le déterrage des fragments est plus petit que celui de l'inventaire des collets pour deux raisons. D'abord, la plaine inondable n'a pas été inventoriée, étant donné que les champs qui s'y trouvaient avaient été semés. Ensuite, les clones de renouée n'ont pas été examinés, puisqu'il est pratiquement impossible d'y détecter les tiges issues de petits fragments, tellement la densité des tiges est élevée. Le déterrage s'est effectué avec une pelle de planteur ou manuellement. Pour chaque fragment extrait, le type de fragment (issu d'un rhizome ou d'une tige), le type d'environnement (dans l'eau de la rivière près de la berge ou dans la berge), et de sol (argileux, limoneux, sablonneux, graveleux) et les coordonnées géographiques (SPG) ont été pris en note.

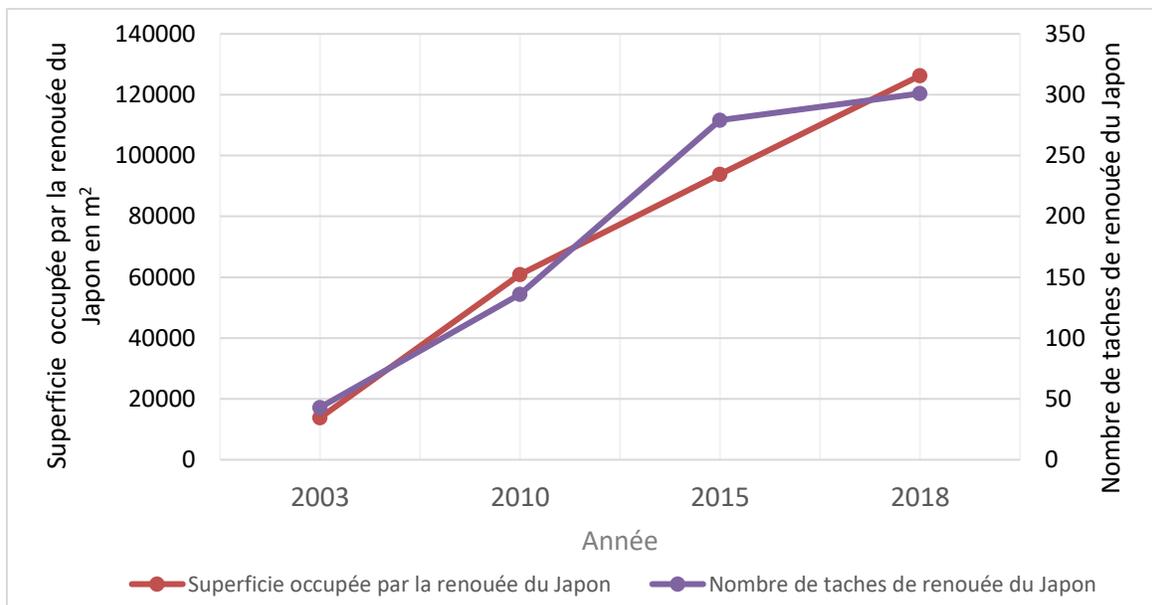
## 1.3 Résultats

### 1.3.1 Historique de la renouée du Japon le long de la rivière Etchemin

La technique de cartographie de la renouée du Japon par photo-interprétation est assez fiable, mais elle est loin d'être infaillible et elle ne permet pas, évidemment, de détecter les petits clones en émergence, c'est-à-dire ceux d'une superficie inférieure à 2 m<sup>2</sup>. La validation de terrain a montré que 80 % des clones repérés sur les images aériennes et satellites étaient véritablement formés de tiges de renouée. Les erreurs d'identification les plus fréquentes ont résulté de la confusion entre les clones de renouée et les massifs de certaines espèces arbustives qui leur ressemblent du haut des airs, comme ceux formés par le framboisier rouge (*Rubus idaeus*) ou le cornouiller stolonifère (*Cornus stolonifera*). Il y a peu de différences dans le taux de succès de la validation selon la superficie du clone (0 à 44 m<sup>2</sup> : 84 %; 45 à 154 m<sup>2</sup> : 80 %; 155 m<sup>2</sup> et plus : 77 %). Tous les clones étaient de véritables clones de renouée du Japon (*Reynoutria japonica* var. *japonica*). Aucun clone hybride (*R. ×bohemica*) n'a été trouvé, une situation très différente de celle qui prévaut le long de la rivière voisine (Chaudière) où les clones hybrides abondent (Duquette et al., 2016). En définitive, 408 clones de renouée ont été trouvés sur une distance de 65 km, de l'amont du village de Saint-Malachie (46°29'52,2"N; 70°43'39,1"O) jusqu'à Lévis (figure 3). La superficie totale occupée par la

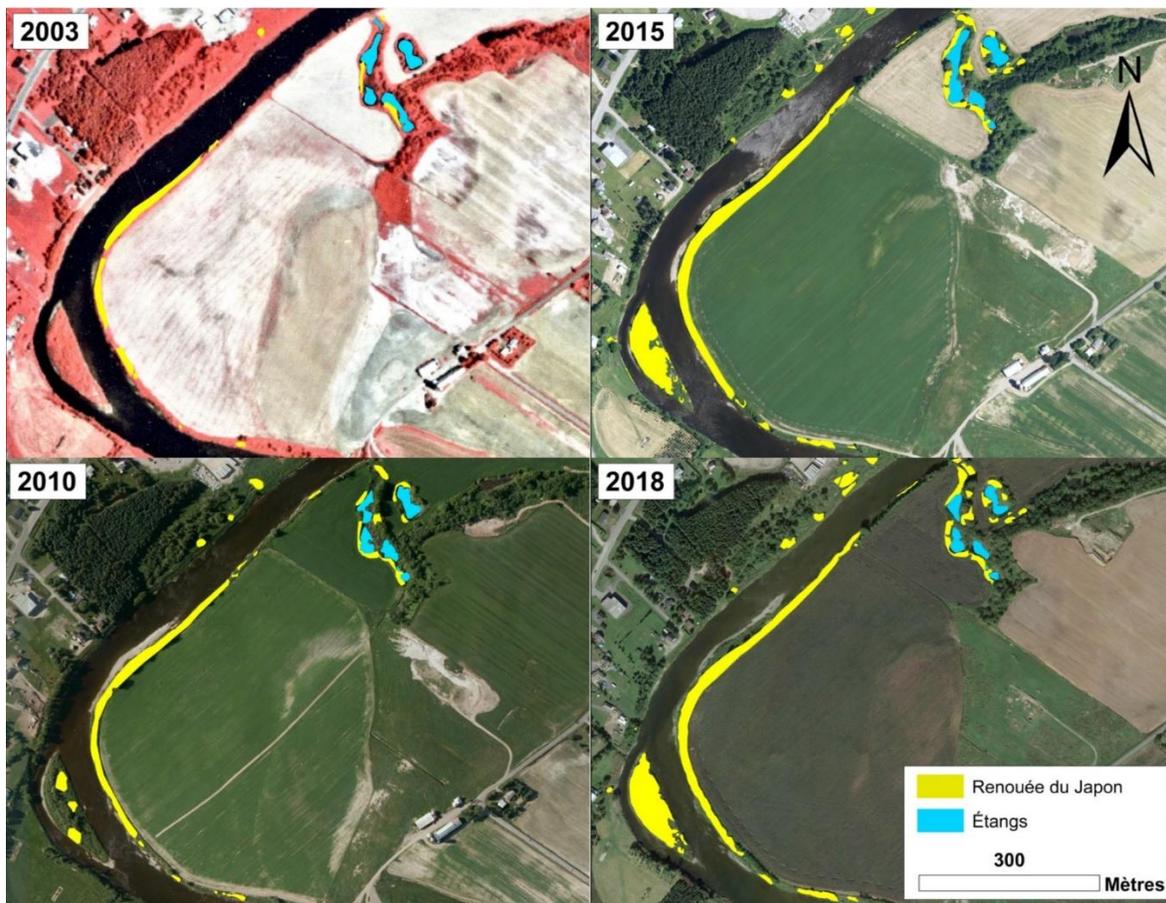
renouée était d'environ 150 000 m<sup>2</sup> (en 2015; voir paragraphe suivant). Les clones se concentraient surtout entre Saint-Anselme et Saint-Henri-de-Lévis, ainsi que près de Lévis.

L'évolution de l'invasion de la renouée du Japon sur les berges de la rivière Etchemin a été reconstituée de 1964 à 2018, mais ce n'est qu'en 2003 que les premiers clones ont pu être détectés sur les images. Cette année-là, 43 taches (un clone ou un ensemble de clones devenus coalescents) de renouée étaient présentes le long des 22,7 km de rivière étudiés, taches qui recouvraient alors près de 14 000 m<sup>2</sup>. Entre 2003 et 2018, la quantité de taches et la superficie totale occupée par la renouée se sont accrues de manière linéaire (figure 7;  $R^2 = 0,99$ ). Il y avait, en 2018, 301 taches (+ 600 % par rapport à 2003) et une superficie de renouée 126 000 m<sup>2</sup> (+ 813 %). En prolongeant la courbe de la tendance linéaire vers l'axe des X (année), on peut estimer que la renouée a commencé à se propager en 2001, même s'il est plus que probable que l'arrivée de la plante près de la rivière est bien antérieure à cette année-là. En somme, si la renouée a atteint des superficies aussi vastes en seulement quelques années, ce n'est pas simplement parce qu'elle s'est répandue rapidement de manière clonale, mais aussi parce que le nombre de clones s'est multiplié.



**Figure 7.** Évolution de la superficie occupée par la renouée du Japon (tendance linéaire :  $R^2 = 0,99$ ) et du nombre de taches (un clone ou un ensemble de clones devenus coalescents; tendance linéaire :  $R^2 = 0,93$ ) dans un tronçon de 22,7 km de long de la rivière Etchemin (Québec, Canada), entre 2003 et 2018.

L'évolution du nombre de taches et de la superficie des clones de renouée du Japon est aussi illustrée cartographiquement à la figure 8. Il s'agit d'un tronçon de rivière caractérisé par un grand méandre à chenaux multiples (avec îlot), suivi d'une partie linéaire avec un regroupement d'étangs sur la rive droite. En 1879, un chenal de contournement lors des crues occupait l'emplacement de ces étangs (Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2020). On remarque qu'au fil du temps, la renouée s'est propagée essentiellement à l'intérieur du méandre (berge convexe) et sur l'îlot, deux zones de déposition de sédiments où le courant est moins rapide. Le complexe d'étangs fut aussi densément touché par l'invasion. La courbe extérieure du méandre (berge concave) fut par contre épargnée par l'invasion. De toute évidence, il s'agit d'une zone d'érosion où le courant est trop rapide et la pente de la berge trop abrupte pour y favoriser la déposition de fragments.



**Figure 8.** Évolution de la répartition de la renouée du Japon entre 2003 et 2018 pour un tronçon très envahi de la rivière Etchemin (Québec, Canada) situé en amont du noyau villageois de Saint-Henri-de-Lévis.

### **1.3.2 Crues et débâcles de glace captées par les caméras**

Le débit journalier à Saint-Henri-de-Lévis est passé de 17 m<sup>3</sup>/s le 21 décembre 2018 à 215 m<sup>3</sup>/s le 22 décembre (figure 4) après un redoux allant jusqu'à 4,8 °C et des précipitations de pluie atteignant 50 mm (Environnement Canada, 2019b; Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020). Deux des trois caméras installées le long du tronçon à l'étude ont photographié cette crue hivernale. Dû à des problèmes techniques, la caméra centrale (figure 5) n'a malheureusement pas fonctionné ce moment-là. La montée du débit s'est faite au cours de la nuit et les photographies prises de jour ne montrent pas de débâcle de glace en action. Dans la partie du tronçon de la rivière située la plus en aval, le couvert de glace était à peine formé à la fin décembre et on peut présumer qu'il n'y a pas eu de débâcle. Cependant, dans la partie plus en amont, des morceaux du couvert de glace ont été déposés dans le champ voisin d'un îlot envahi par la renouée du Japon. Grâce à la caméra en amont installée à cet endroit (figure 5), on a pu constater que les tiges mortes (et toujours dressées) de renouée sur le bout de l'îlot ont disparu pendant la nuit du 21 décembre. On ignore si les tiges ont été arrachées par l'eau ou les glaces et, surtout, si les fragments de rhizomes de renouée possiblement arrachés durant l'hiver et transportés plus loin sont demeurés vivants jusqu'au printemps.

Le débit journalier est passé de 55 m<sup>3</sup>/s le 13 avril 2019 à 126 m<sup>3</sup>/s le 14 avril, pour atteindre un pic le 20 avril à 444 m<sup>3</sup>/s (figure 4) (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020). Cette crue printanière a été précédée par des journées avec des températures au-dessus de 0 °C dès la mi-mars (Environnement Canada, 2019c). Durant la crue, les trois caméras ont capté des images de la montée des eaux, de la débâcle des glaces et de la formation d'un embâcle de glace. Les images de la caméra située en aval (figure 5) ont montré une augmentation du niveau d'eau le 14 avril, mais le couvert de glace ne s'est fissuré que le 15 avril (figure 9). Cette caméra a aussi photographié l'embâcle de glace qui s'est créé juste devant le couvert de glace qui s'est maintenu en aval. Les glaces se sont accumulées au pied de l'embâcle, qui s'est lui-même déplacé de quelques dizaines de mètres vers l'aval le 17 avril. Le 19 avril, le niveau d'eau a remonté de plus belle, possiblement à cause de l'embâcle. L'embâcle s'est rompu dans la nuit du 19 au 20 avril et les glaces ont alors été évacuées vers l'aval. Quant aux caméras placées au centre et en amont

(figure 5), elles ont montré une augmentation progressive du niveau de l'eau avant le 19 avril, ainsi que le maintien presque entier du couvert de glace, qui ne s'est fissuré que lentement (débâcle thermique). Par contre, le 19 avril, le niveau d'eau est monté considérablement, ce qui a favorisé la fracturation de la glace qui a été emportée vers l'aval par le courant. On a observé ensuite, épisodiquement, le passage de morceaux de glace de différentes dimensions dans le chenal de la rivière jusqu'au 21 avril.



**Figure 9.** Montage séquentiel de photographies prises par une caméra (aval) filmant l'évolution du niveau d'eau et du couvert de glace de la rivière Etchemin (Québec, Canada) du 12 au 22 avril 2019.

On peut comparer avec les caméras la débâcle et l'embâcle de glace de 2019 avec celles ayant eu lieu au même endroit lors de la crue printanière de 2020, du 3 au 12 avril (figure 10). Le débit journalier est alors passé de  $61 \text{ m}^3/\text{s}$  le 2 avril à  $116 \text{ m}^3/\text{s}$  le 3 avril, pour atteindre un pic de  $228 \text{ m}^3/\text{s}$  le 14 avril (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020). On remarque une différence appréciable dans le niveau atteint par l'eau et les glaces en 2020, qui est plus bas qu'en 2019 ; par exemple, le champ sur la rive gauche n'est pas inondé.

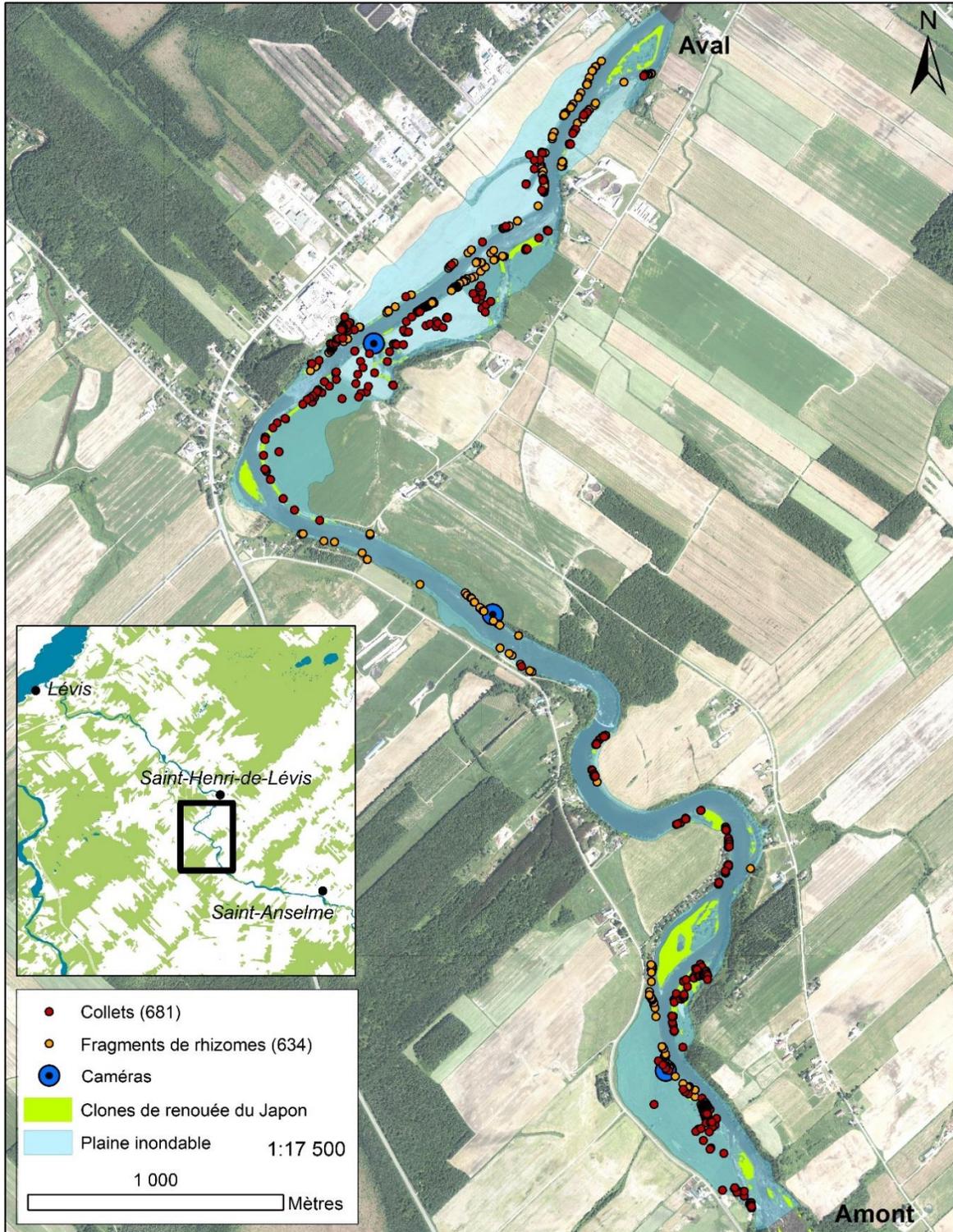


**Figure 10.** Montage séquentiel de photographies prises par une caméra (aval) filmant l'évolution du niveau d'eau et du couvert de glace de la rivière Etchemin (Québec, Canada) du 2 au 12 avril 2020.

### **1.3.3 Inventaire des collets et fragments de rhizomes de renouée du Japon**

#### **1.3.3.1 Répartition spatiale et survie des collets de renouée du Japon**

En mai 2019, 681 collets de renouée du Japon ont été cartographiés dans le tronçon de la rivière Etchemin sélectionné pour leur inventaire (figure 11). Près de la moitié des collets ( $n = 319$  ou 47 % du total) se sont déposés sur un îlot dans le segment de 500 m le plus en amont du tronçon, îlot par ailleurs déjà presque complètement envahi par la plante. Ailleurs, les collets se sont déposés autant sur les berges ( $n = 192$ ; 28 %) que dans la plaine inondable ( $n = 170$ ; 25 %) qui a été cartographiée avec précision (crue de 2019) grâce aux cicatrices laissées par les glaces sur les arbres, les laisses de crue (figure 12) et les images des caméras. Les collets sur la plaine inondable se sont concentrés principalement dans le segment de 2 km le plus en aval du tronçon. Presque aucun collet n'a été trouvé dans les berges concaves des méandres, c'est-à-dire dans les zones d'érosion où les vitesses d'écoulement sont plus fortes.

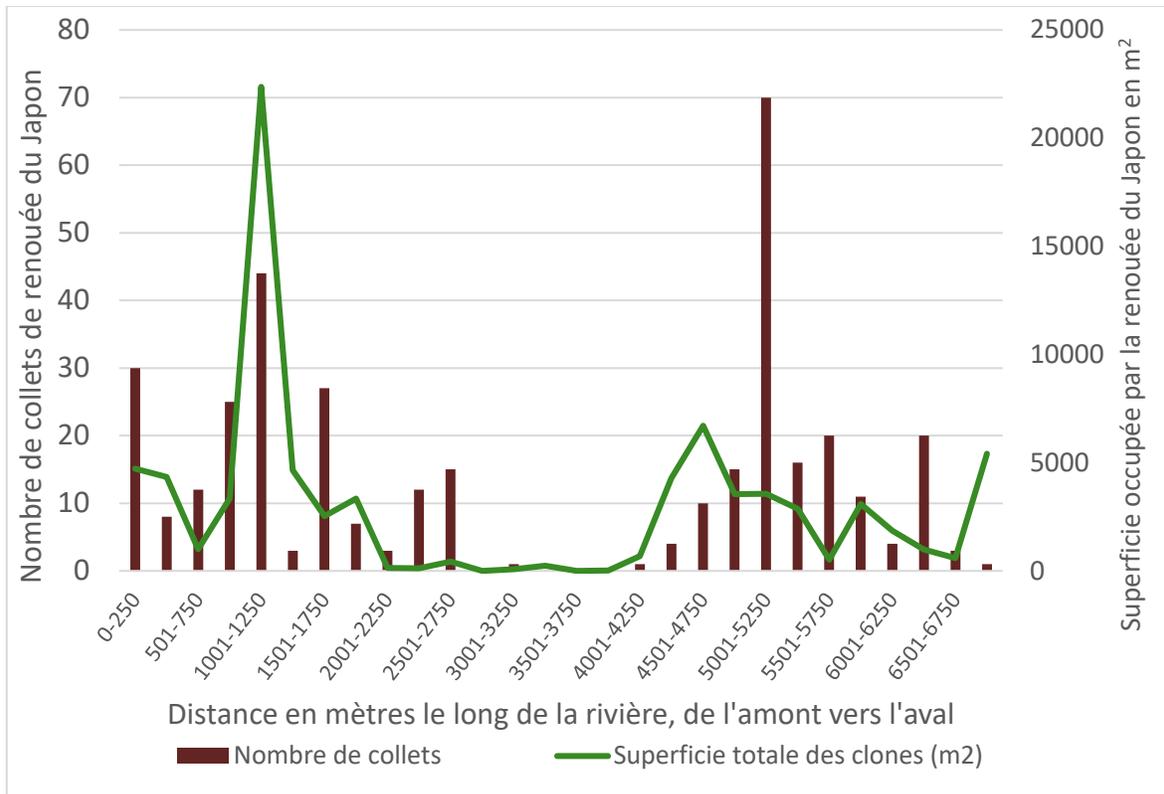


**Figure 11.** Collets et fragments de rhizomes de renouée du Japon inventoriés en mai et en juin 2019 dans un tronçon de la rivière Etchemin (Québec, Canada) en amont de Saint-Henri-de-Lévis.



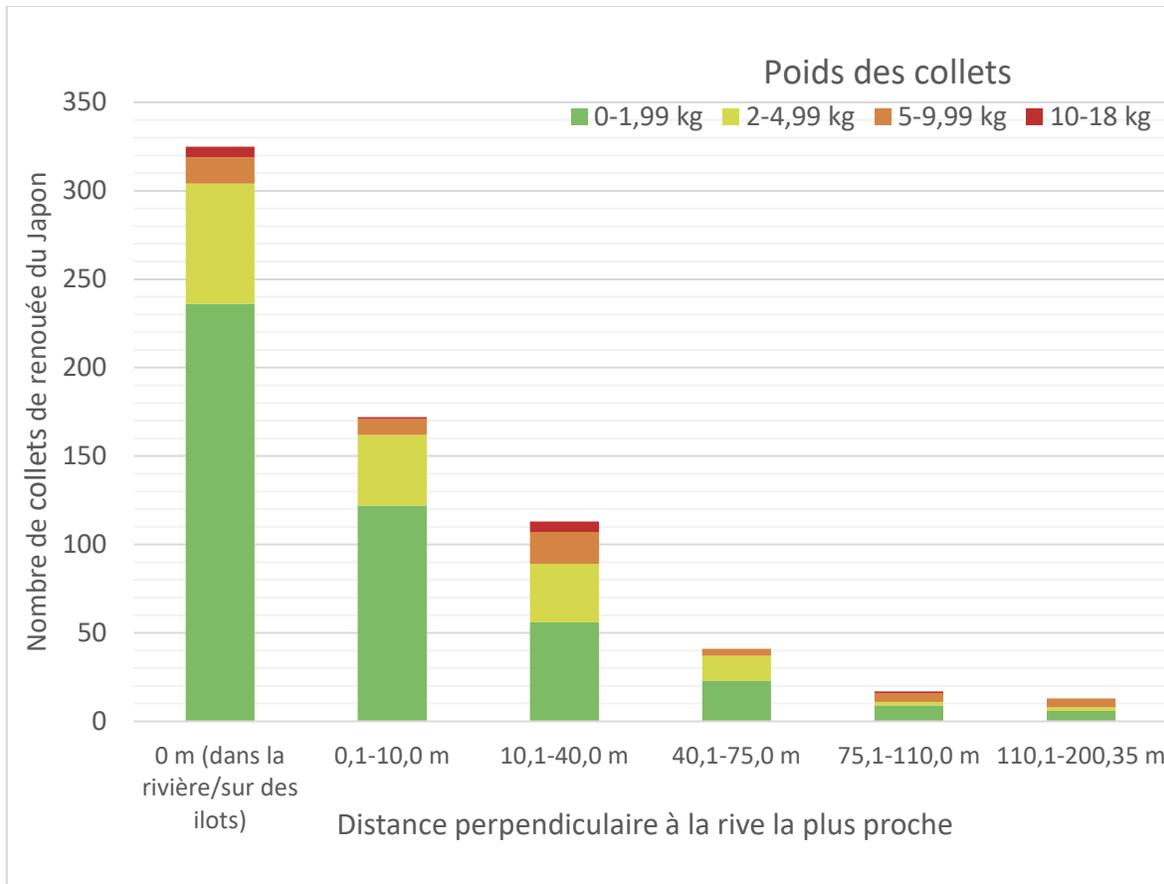
**Figure 12.** Tiges mortes de renouée du Japon et sédiments alluviaux transportés par les glaces et l'eau pendant la débâcle de la rivière Etchemin (Québec, Canada) en avril 2019. La photographie a été prise le 24 avril, dans la plaine inondable, tout près du pied d'un embâcle (Rébecca Matte).

Si on compare la répartition spatiale des collets de renouée du Japon à celle des clones de la même espèce (figure 13), on remarque qu'elles se ressemblent, avec un léger décalage vers l'aval des collets par rapport aux clones. On remarque aussi l'absence quasi totale de collets dans la zone centrale du tronçon de rivière à l'étude, là il y a peu ou pas de renouée.



**Figure 13.** Répartition spatiale en 2019 des collets de renouée du Japon et de la superficie des clones de la même espèce dans le tronçon de la rivière Etchemin (Québec, Canada) à l'étude, tronçon subdivisé en segments de 250 m de long (500 m si on additionne les deux rives), de l'amont vers l'aval. Les 319 collets présents sur un îlot (segment 251-500 m) ont été retirés de l'analyse, puisque les collets sur les autres îlots en aval n'ont pas été inventoriés, faute d'accessibilité.

La répartition des collets en fonction de la distance (perpendiculaire) les séparant de la rive la plus proche (figure 14) est fortement influencée par le fait que près de la moitié des collets ( $n = 319$ ) se sont déposés sur un îlot. Pour les autres, la distance moyenne de déposition perpendiculairement à la rive était de 24,6 m, le collet le plus éloigné ayant été trouvé à 200 m de la rivière. La répartition des collets adopte une courbe exponentielle inverse par rapport à la distance les séparant de la rive ( $R^2 = 0,98$ ). Aussi, le poids moyen des collets était de 2,2 kg et le collet le plus lourd avait un poids de 17,8 kg. Le poids ne semble pas avoir d'influence sur la distance de transport (eau, glace) perpendiculairement à la rivière (figure 14).



**Figure 14.** Distribution du nombre de collets de renouée du Japon déposés lors de la crue 2019 de la rivière Etchemin (Québec, Canada) par rapport à la distance (perpendiculaire) à la rive la plus proche. La distribution illustre également le poids des collets. Les classes de distance et de poids ont été déterminées avec la méthode des seuils naturels de Jenks, qui suivent la distribution naturelle inhérente aux données (Jenks et Caspall, 1971).

Vingt et un collets de renouée du Japon ont été retrouvés début août 2019 sur les 42 qui avaient été marqués au printemps. Il était ardu de retrouver les collets dans la végétation souvent très dense de la fin de la saison estivale. Les tiges qui avaient émergé des collets facilitaient par contre leur repérage. On peut émettre l’hypothèse que les collets non retrouvés étaient probablement morts (car sans tiges visibles) ou avaient été déplacés par la machinerie agricole ou par une crue ( $108 \text{ m}^3/\text{s}$ ) survenue le 3 juin. Parmi les 21 collets retrouvés, 16 (76 %) étaient vivants avec des tiges. Lorsque les collets étaient bien enracinés, d’une à trois tiges avaient émergé, tiges qui pouvaient atteindre une taille de 1 à 2 m de hauteur.

### 1.3.3.2 Répartition des fragments de rhizomes de renouée du Japon

Six cent trente-quatre fragments de rhizomes ont été extirpés du sol lors de la campagne de déterrage de jeunes pousses de renouée du Japon réalisée en juin 2019. Le poids total des 634 fragments était de 28,7 kg, pour un poids moyen de 45 g. La carte de répartition des fragments déterrés (figure 11) n'est qu'une représentation partielle de la réalité, étant donné que l'intérieur des clones n'a pas été examiné. Cela dit, ceux trouvés se concentraient sur les berges des secteurs linéaires de la rivière, notamment dans la partie centrale du tronçon de rivière à l'étude, zone paradoxalement assez peu envahie par la renouée. Bien que certaines zones d'érosion (berges concaves) aient été inventoriées, peu de fragments y ont été récupérés.

## 1.4 Discussion

L'introduction de la renouée du Japon dans la région de la rivière Etchemin est peu documentée, mais on sait qu'elle remonte à au moins plus d'une soixantaine d'années. En effet, un spécimen d'herbier (QUE-50534) a été récolté en 1958 un peu à l'extérieur du village de Saint-Anselme, à plus de 700 m de la rivière. On a mesuré, de 2003 à 2018, une augmentation de 813 % de la superficie occupée par la renouée dans un tronçon de 23 km de la rivière Etchemin. Cet accroissement à tendance linéaire peut s'expliquer par l'abondante quantité de collets et de fragments de rhizomes arrachés par l'eau et la glace lors des crues printanières, collets et fragments qui vont s'enraciner plus loin lorsqu'ils se déposent sur les berges et sur les plaines d'inondation. Au fil des ans, plus les clones de renouée deviennent nombreux et étendus, plus le nombre de collets et de fragments générés au printemps lors des crues est élevé, ce qui engendre encore plus de clones (Martin, 2019).

La tendance à l'envahissement observée sur un tronçon de la rivière Etchemin déjà bien occupé par la renouée du Japon est linéaire, alors que l'on s'attendait au départ à ce qu'elle soit exponentielle ( $H_1$  infirmée). Cela dit, la période de temps couverte par la reconstitution historique avec clones bien visibles était relativement brève (15 ans). Les jeunes clones en développement n'ayant qu'un petit nombre de tiges ne sont pas repérables sur les photographies aériennes. En émettant l'hypothèse que l'invasion s'est amorcée dans les années 1960 et compte tenu de la phase de latence propre à toute invasion biologique (Lavoie,

2019), il est possible que la tendance exponentielle soit masquée par l'impossibilité de détecter les clones de renouée par image aérienne lors des premières décennies d'une invasion.

La morphologie du cours d'eau et l'occupation du territoire ont aussi leur rôle à jouer dans la vitesse avec laquelle la renouée du Japon envahit les berges. Les trois tronçons envahis le long de la rivière Etchemin (Lévis, Saint-Henri-de-Lévis et Saint-Anselme) ont des îlots, des bancs d'accumulation dans les berges convexes des méandres et une vaste plaine inondable, conditions propices à la déposition des fragments, car les vitesses d'écoulement y sont généralement plus lentes. En outre, ces trois tronçons sont à proximité des trois plus importantes agglomérations de la rivière, où il est presque certain que la renouée ait été plantée à des fins ornementales (Duquette et al., 2016). Il est probable en définitive que ce soit surtout cette proximité aux lieux d'introduction de la plante qui influence l'envahissement de certains tronçons. En effet, certains tronçons plus en amont (Saint-Malachie à Sainte-Claire) ont des caractéristiques morphologiques favorables à la déposition de sédiments, mais sont malgré tout peu occupés par la renouée. Enfin, dans ces tronçons envahis, les berges ont été déboisées pour laisser plus d'espace aux cultures. Une fois les berges dégagées de leurs arbres et arbustes, la renouée a pu s'établir plus facilement, confrontée alors à beaucoup moins de compétition pour l'espace et la lumière (Martin, 2019).

Les images de la rivière Etchemin captées par les caméras permettent de mieux comprendre l'effet des glaces sur les berges, et en l'occurrence sur les clones de renouée du Japon durant les débâcles mécaniques. On peut imaginer comment les glaces, qu'il y a en grande quantité lors des débâcles ou des embâcles, peuvent être poussées sur les berges, où elles peuvent se superposer et exercer une forte friction sur les rives (Boucher et al., 2009; Morin et al., 2015). Dans les endroits de la zone d'étude où la crue s'est faite en eau libre (sans glace), les tiges mortes de renouée étaient (mai 2019) encore en place ou avaient été couchées au sol. Aux endroits où l'on sait que les glaces sont passées (cicatrices de glace sur les arbres, morceaux de glaces déposés sur la plaine inondable), le sol était dans la plupart des cas laissé à nu, ce qui implique que les tiges mortes avaient été arrachées par les glaces (R. Matte, observations personnelles). Or, les tiges de renouée sont solidement attachées aux collets : si l'on tire sur des tiges matures ou mortes de renouée, on peut arracher les collets du sol assez facilement.

En somme, les glaces qui raclent le sol et qui arrachent des tiges ont le potentiel d'arracher aussi des collets ou des fragments de rhizomes et de les transporter plus loin.

Tous les fragments de renouée du Japon déterrés dans ce travail, sans exception, étaient issus de rhizomes. En France, sur les rives du lac du Bourget (Savoie), Barthod et Boyer (2019) ont eux aussi trouvé une très forte proportion (95 %) de tiges issues de fragments de rhizomes, le reste ayant été généré par des fragments de tiges. Ces proportions sont beaucoup plus élevées que celle (70 %) calculée pour quatre rivières du Vermont envahies par la renouée (Colleran et Goodall, 2014). Toutefois, dans ces derniers cas, les fragments examinés avaient été disséminés l'été à la suite d'une forte crue occasionnée par une tempête tropicale estivale, donc au moment où les tiges de renouée des clones étaient toujours vivantes (Colleran et Goodall, 2014). Ce n'est évidemment pas le cas au printemps, car toutes les tiges de renouée sont mortes depuis déjà plusieurs mois.

Les collets de renouée du Japon disséminés lors de la crue de 2019 pouvaient atteindre un poids de plus d'une dizaine de kilogrammes et être déplacés sur des dizaines, voire des centaines de mètres perpendiculairement à la rivière. Cela dit, le poids des collets ne semble pas avoir d'influence sur la distance de transport perpendiculairement à la rivière ( $H_2$  non confirmée). Les fragments étaient en grande partie déposés dans les berges convexes des méandres et dans la plaine inondable, soit des zones où le courant est plus faible ( $H_3$  validée). Le petit nombre de collets marqués puis retrouvés plus tard durant l'été rend difficile l'évaluation du taux de survie. N'empêche, plusieurs collets étaient toujours vivants au mois d'août et il est à craindre qu'ils génèrent de nouveaux clones à plus ou moins brève échéance.

Même si l'on a trouvé presque autant de fragments de rhizomes de renouée du Japon que de collets, on peut émettre l'hypothèse qu'ils contribuent dans les faits davantage que les collets à la propagation de la plante et à l'émergence de nouveaux clones. En effet, tous ces fragments de rhizomes déterrés étaient vivants et présents sur la berge, et donc pas susceptibles d'être déracinés (labour) ou tués (herbicides) par des activités agricoles. De plus, les collets étaient déposés à la surface du sol, ce qui peut rendre leur enracinement plus difficile. Ils sont aussi exposés directement aux conditions extérieures, ce qui peut entraîner leur dessiccation. Il n'est toutefois pas certain que les fragments de rhizomes s'installeront bel et bien à demeure – il est tout à fait possible qu'ils soient déracinés de nouveau lors d'une

prochaine crue, ce qui mettrait leur survie en péril. Un indice en ce sens sont les berges de zones linéaires de la rivière Etchemin : on y a trouvé de nombreux fragments de renouée, et pourtant presque aucun clone.

La renouée du Japon n'est pas la seule plante envahissante à se propager le long des cours d'eau grâce aux crues. Par exemple, la canne de Provence (*Arundo donax*; Poaceae) envahit les habitats riverains de la Californie grâce à ses rhizomes et à ses tiges qui se fragmentent lors des crues et qui sont ensuite transportés par l'eau pour être déposés sur les bancs d'accumulation de sédiments (Mariani et al., 2010; Stover et al., 2018). Le miscanthus géant (*Miscanthus × giganteus*; Poaceae) arrive parfois à s'échapper des champs où il est cultivé pour sa biomasse lorsque ces derniers se trouvent près des cours d'eau. Les crues faciliteraient la dissémination des fragments de rhizomes sur de longues distances (West et al., 2014). Il en est de même pour la berce du Caucase (*Heracleum mantegazzianum*; Apiaceae), celle-ci se propageant de manière sexuée grâce aux graines. Bien que les graines ne puissent flotter sur l'eau que quelques heures, elles sont transportées rapidement sur plusieurs kilomètres lors des crues printanières (Trottier et al., 2017). C'est aussi le cas de l'impatiens glanduleuse (*Impatiens glandulifera*; Balsaminaceae). On trouve deux fois plus d'individus de cette plante annuelle dans les sites inondés lors des crues que dans les sites non sujets aux inondations (Čuda et al., 2017).

L'inventaire des collets et des fragments de renouée du Japon ne s'est fait que durant un seul été, à la suite d'une crue printanière exceptionnelle. Est-ce qu'une crue moins intense et n'engendrant pas de débâcle mécanique et d'embâcle de glace aurait le même impact sur la quantité de fragments de renouée générés ? On peut s'attendre à ce que la dissémination des fragments de renouée soit différente d'une année à l'autre selon l'intensité des crues. Des inventaires faits sur plusieurs années pourraient aussi permettre de découvrir si l'arrachage des collets des clones riverains est surtout lié aux débâcles mécaniques de glace. Enfin, une étude plus approfondie sur la viabilité des collets et des fragments devrait être réalisée sur une période plus longue qu'une saison afin de connaître la proportion qui contribue vraiment à la propagation de la plante.

## **2. L'effet de la renouée du Japon sur l'érosion des berges**

### *Résumé*

Depuis plusieurs années, la renouée du Japon est suspectée, sans preuve convaincante, d'accélérer l'érosion des berges. Les tiges de cette plante envahissante meurent suite aux premiers gels automnaux, ce qui laisse le sol sans protection lors des crues hivernales et printanières. Au Québec, l'érosion des berges peut aussi être accentuée par la glace lors des débâcles mécaniques. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'influence de la renouée sur l'érosion des berges de la rivière Etchemin (région Chaudière-Appalaches, Québec) en contexte de crues avec et sans glaces. L'élévation le long de 120 profils transversaux de berges envahies ou non par la renouée a été mesurée avant et après la crue printanière de 2019. Il y avait en moyenne près de 3 cm de plus d'érosion (épaisseur du sol) dans les berges occupées par la renouée que dans celles sans renouée, une différence statistiquement significative. La densité des tiges avait aussi une influence sur l'érosion : plus elle était élevée, plus la perte de sol était importante. Certaines conditions en bord de rivière, soit la pente du talus et les berges d'îlots, pouvaient contribuer à accentuer encore davantage l'effet de la renouée sur l'érosion. Les pertes de sol mesurées entre novembre 2018 et mai – juin 2019 ont probablement été particulièrement prononcées en raison de la crue printanière exceptionnelle cette année-là, dont la récurrence était de près de 50 ans. On peut s'attendre à ce que la perte de sol des rivières envahies par la renouée augmente au fil du temps, comme cette espèce envahissante se propage très rapidement en milieux riverains.

## 2.1 Introduction

Les plantes, par leurs interactions avec les processus hydrologiques, sédimentologiques et biologiques, peuvent influencer la géomorphologie des cours d'eau (Schumm, 1968; Smith, 1976; Murray et Paola, 2003; Murray et al., 2008; Davies et Gibling, 2009; 2010; Corenblit et al., 2011). Un changement rapide de végétation sur une plaine inondable, comme lors de l'invasion des berges par des plantes envahissantes, peut avoir des effets sur la morphologie fluviale (Rowntree, 1991; Corenblit et al., 2011). Les espèces envahissantes, qui se propagent efficacement de manière végétative ou par graines, sont connues pour pousser rapidement et s'accaparer les ressources du sol jusqu'à occuper un espace de manière monospécifique. Certaines plantes envahissantes (ex.: *Lupinus polyphyllus*, *Tamarix* spp.) peuvent, en raison du couvert végétal dense qu'elles créent, piéger des sédiments en si grande quantité que les berges se stabilisent; cela peut éventuellement se traduire par un rétrécissement de la largeur d'un cours d'eau (Graf, 1978; Birkeland et al., 1996; Tickner et al., 2001; Meier et al., 2013). D'autres espèces peuvent au contraire faciliter l'érosion des berges. Par exemple, la formation par un envahisseur (ex.: *Arundo donax*) d'un système souterrain peu profond de rhizomes peut engendrer un phénomène de sapement basal faisant reculer la berge à chaque épisode de crue (Stover et al., 2018). Le sol peut aussi être laissé à nu lorsque les plantes meurent suite aux premiers gels automnaux (ex.: *Impatiens glandulifera*), ce qui rend les berges plus vulnérables à l'érosion lors des crues subséquentes (Greenwood et Kuhn, 2014; Greenwood et al., 2018; 2020). Ce pourrait être le cas de la renouée du Japon (*Reynoutria japonica*; Polygonaceae), une plante envahissante vivace à rhizomes dont les tiges meurent après les premiers gels automnaux. L'effet qu'aurait cette plante sur l'érosion est toutefois très peu étudié, malgré le fait qu'il semble évident pour plusieurs qu'elle soit responsable de la perte de terrain en bordure des cours d'eau.

La renouée du Japon, comme son nom l'indique, est originaire du Japon, mais aussi de Taiwan, de la Corée du Sud et de la Chine (Lavoie, 2019). Elle a été introduite en Europe par un médecin néerlandais, Philipp von Siebold, au début des années 1830 (Beerling et al., 1994; Lavoie, 2019). En raison de ses qualités ornementales, elle a été vendue et distribuée à travers l'Europe et l'Amérique du Nord (Child, 1999). Au Canada, la renouée a été observée pour les premières fois en 1901 à Longueuil (Québec), Niagara Falls (Ontario) et Chilliwack

(Colombie-Britannique) (Barney, 2006). Depuis, elle envahit rapidement les rives des cours d'eau, les friches et les talus des routes et des chemins de fer (Lavoie, 2019). Elle se trouve surtout dans des habitats où le sol a été perturbé, et particulièrement sur les berges des rivières en territoire agricole ou urbain où la végétation arbustive a été éliminée. Cette plante vivace pousse rapidement au printemps et forme des massifs (clones) dont la densité des tiges est très élevée. Ses rhizomes pérennes et ligneux conservent les sucres et les nutriments. Les segments de rhizomes (les parties du rhizome entre deux ramifications ou entre une ramification et l'extrémité du rhizome) mesurent de 1 à 81 cm, avec une moyenne de 13 cm (Smith et al., 2007). Bien que les rhizomes peuvent pénétrer jusqu'à 2 m en profondeur dans le sol, voire 3 m, la majeure partie se trouve dans les 50 cm les plus près de la surface (Child et Wade, 2000; Booy et al., 2015).

On trouve dans la littérature scientifique, revue ou non par les pairs, plusieurs références à la renouée du Japon et à ses effets sur l'érosion des berges (Child et Wade, 2000; Mummigatti, 2001; Larsen, 2013; Christopher, 2014; van Oorschot et al., 2017). Un point commun à tous ces travaux est l'absence de données tissant un lien de cause à effet entre renouée et érosion. Une plus forte érosion est néanmoins suspectée par le fait que la renouée forme des massifs monospécifiques dont les tiges aériennes deviennent sénescentes après les premiers gels. Les tiges mortes peuvent être emportées par les épisodes de crues hivernales et printanières, ce qui dénude le sol. En l'absence de cette biomasse, la rugosité de la berge est réduite (Thorne et Furbish, 1995; Hopkinson et Wynn, 2009). Or, une berge moins rugueuse accélère la vitesse de l'écoulement de l'eau, ce qui peut avoir un effet sur l'érosion des berges. La présence d'une biomasse végétale au-dessus de la surface du sol a aussi comme effet de créer une couche de protection contre le courant et le passage des glaces. Sans arbustes ou plantes herbacées, en particulier les graminées, l'eau et la glace sont en contact direct avec le sol lors des crues printanières, ce qui peut le rendre plus vulnérable à l'érosion. En conséquence, on peut émettre l'hypothèse qu'un sol envahi par la renouée, et donc dénudé en période hivernale et printanière, est plus susceptible d'être érodé.

La biomasse souterraine trouvée en bandes riveraines est souvent composée d'un complexe de racines et de rhizomes de plantes variées (herbacées, arbustes, arbres). Une grande densité de biomasse végétale souterraine est avantageuse pour retenir le sol, mais c'est surtout vrai

si le diamètre des racines et des rhizomes est petit : cela augmente la cohésion du sol et diminue les risques d'érosion (Simon et Collison, 2002; Gurnell et al., 2018; Stover et al., 2018; Zhu et al., 2018). Or, les racines et, surtout, les rhizomes de renouée du Japon ont un diamètre élevé (5 à 100 mm) (Child et Wade, 2000). En guise de comparaison, l'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea*), une autre plante envahissante très abondante en milieux riverains en Amérique du Nord, a des racines et des rhizomes beaucoup plus petits dont le diamètre varie entre 0,1 et 5 mm (Keim et al., 1932; Bankhead et al., 2017). Bien entendu, l'interaction entre la végétation et la stabilité des berges des rivières est complexe et une multitude de facteurs entrent en jeu, comme le type de berge, le débit de l'eau et la pression de l'eau interstitielle (Van de Wiel et Darby, 2007). On peut néanmoins se demander si le remplacement, par effet de compétition, d'une grande densité de biomasse souterraine constituée de fines racines à moins de 50 cm de profondeur par un réseau de rhizomes de renouée n'accélère-t-elle pas l'érosion des berges.

Une première étude mesurant l'effet de la renouée du Japon sur l'érosion des berges a été publiée par Arnold et Toran (2018). Elle a été réalisée dans un cours d'eau urbain de la région de Philadelphie (États-Unis). L'objectif de cette recherche était de comprendre l'influence des caractéristiques riveraines, incluant le type de végétation et le degré d'incision du lit du cours d'eau, sur l'érosion. L'incision se définit comme étant l'érosion verticale du chenal d'une rivière (Booth, 1990). Des tiges d'érosion, au nombre de 16, ont été utilisées dans ce travail pour mesurer l'érosion des berges. Des sites colonisés par la renouée ont été comparés à des sites ayant une végétation dominée par les arbres, malgré le fait que la renouée s'implante essentiellement sur des rives herbacées. Quoiqu'il en soit, les résultats ont montré qu'après un peu plus de neuf mois de suivi (de juillet 2015 à mars 2016), l'érosion riveraine était plus importante dans les sites avec renouée que dans les sites avec arbres. Dans les berges avec renouée et en présence d'un chenal fortement incisé, la perte de sol s'élevait à 30 cm d'épaisseur. Elle était de seulement 9 cm dans les berges avec renouée, mais où l'incision du chenal était beaucoup moins prononcée. Pour leur part, les sites avec renouée et arbres, ou avec seulement des arbres, et avec chenal fortement incisé, avaient une érosion d'au plus 3 cm. En somme, l'effet de la renouée sur l'érosion varierait beaucoup selon le degré d'incision du chenal, mais il est difficile, en raison du très faible nombre de mesures, de conclure quoi que ce soit sur un effet réel de la renouée sur l'érosion.

Le cours d'eau étudié par Arnold et Toran (2018) avait un bassin versant de 94 km<sup>2</sup> et un débit moyen de 0,74 m<sup>3</sup>/s. Les auteures ne mentionnent pas s'il y a eu sur cette rivière des évènements de crue ou des débâcles mécaniques de glace durant la période d'étude (voir chapitre 2), ce qui est par ailleurs peu probable (glace) pour un assez petit cours d'eau à la latitude de Philadelphie. Or, on peut émettre l'hypothèse que la renouée du Japon a un plus grand effet sur l'érosion en bordure d'une rivière si le bassin versant est grand, si son débit est élevé et s'il y a de la glace qui se forme pendant l'hiver. Mais dans les faits, on ne connaît à peu près rien de l'effet réel de la renouée du Japon sur l'érosion des berges, quel que soit le contexte. On ne sait pas si la renouée engendre bel et bien une érosion plus grande et quelles sont les berges les plus à risque.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'effet de la renouée du Japon sur l'érosion des berges d'une rivière (Etchemin, Québec) sujette à des crues récurrentes et à des débâcles de glace. Dans un premier temps, j'ai mesuré avec des instruments de haute précision les changements morphologiques survenus sur les berges colonisées ou pas par la renouée après la crue printanière de 2019, une crue particulièrement forte (chapitre 2). J'ai ensuite caractérisé ces berges de manière à pouvoir tester, avec un modèle statistique, les hypothèses suivantes :

**H<sub>1</sub>** : L'érosion du sol des berges d'une rivière occupées par la renouée du Japon est significativement supérieure à celle des berges avec couvert de plantes herbacées.

**H<sub>2</sub>** : Plus la pente d'une berge est abrupte, plus élevée est l'érosion (perte de sol). En conséquence, la pente s'ajoute à la présence de la renouée du Japon comme variable expliquant une érosion riveraine significativement plus élevée.

## **2.2 Méthodes**

### **2.2.1 Aire d'étude**

L'étude de l'effet de la renouée du Japon sur l'érosion des berges a été effectuée en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada). C'est une rivière à méandres stables (naturels et anthropiques) qui est considérablement envahie par la renouée. Elle se situe dans la région de Chaudière-Appalaches (figure 15). Sa source (46°35'16,5"N; 70°25'27,5"O) se trouve dans la chaîne montagneuse des Appalaches. Son exutoire est le fleuve Saint-Laurent, près

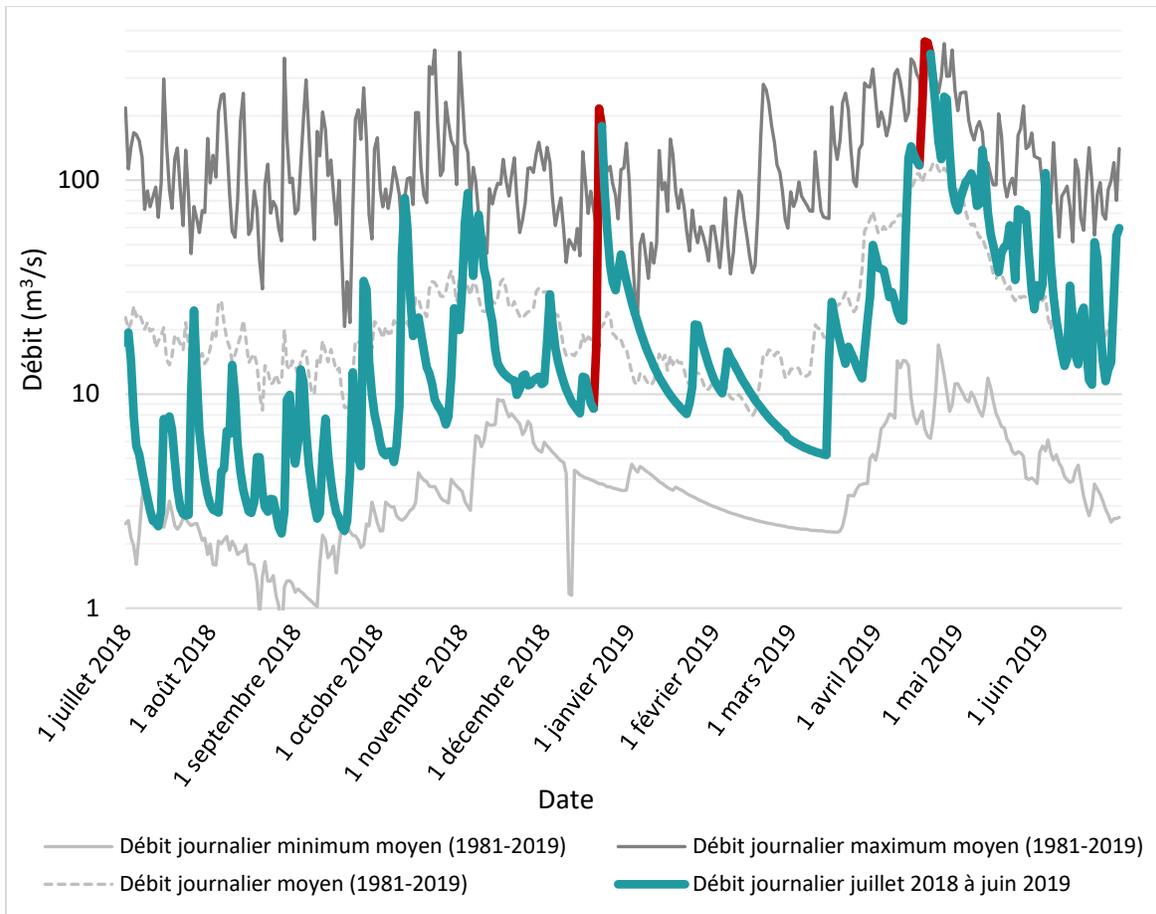
de la ville de Lévis (46°45'47,6"N; 71°13'52,3"O). La rivière Etchemin a une longueur totale de 124 km et son bassin versant a une superficie de 1 466 km<sup>2</sup>. Ce bassin versant est occupé sur 30 % de sa superficie par l'agriculture, sur 61 % par la forêt, sur 4 % par des milieux humides et sur 2 % par des zones urbanisées (Conseil de bassin de la rivière Etchemin, 2014). C'est dans sa section la plus en aval, dans les basses-terres du fleuve Saint-Laurent, que se concentrent les terres agricoles, surtout cultivées pour la production de maïs et de soya. Ces terres occupent 56 % du territoire dans les basses-terres (Conseil de bassin de la rivière Etchemin, 2014).

Les données 1981–2010 de la station météorologique de Beauséjour, située à 8 km à l'ouest de Saint-Henri-de-Lévis, indiquent que la température annuelle moyenne est de 4,4 °C, janvier étant le mois le plus froid (température moyenne : –12,5 °C) et juillet le mois le plus chaud (température moyenne : 19,2 °C). Les précipitations annuelles totales sont de 1 253 mm, dont 26 % tombent sous forme de neige (Environnement Canada, 2019).

Le débit journalier moyen de la rivière Etchemin à la hauteur du village de Saint-Henri-de-Lévis, situé à 19 km en amont de l'exutoire, est calculé par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Il était de 27 m<sup>3</sup>/s entre 1980 et 2018 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020). Les mois avec les débits journaliers moyens les plus forts ont été avril (86 m<sup>3</sup>/s) et mai (45 m<sup>3</sup>/s), alors que ceux avec les débits les plus faibles ont été janvier, février, août et septembre (12–16 m<sup>3</sup>/s) (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2019). La rivière Etchemin est sujette aux débâcles et embâcles de glace. Certains ont causé des dommages matériels importants en 1993, 1994, 1995, 2016 et 2017 (Données Québec, 2016; Radio-Canada, 2019; Urgence Québec, 2019). En 2019, le retour habituel et progressif des températures supérieures à 0 °C et des précipitations sous forme de pluie ont engendré une crue particulièrement forte à partir du 14 avril. Le pic de la crue a eu lieu le 20 avril, lorsque le débit a atteint 444 m<sup>3</sup>/s (figure 16). Une débâcle de glace mécanique et un embâcle de glace se sont aussi produits lors de la crue printanière. Une débâcle hivernale soudaine est également survenue le 22 décembre 2018. À cette date, le débit enregistré fut toutefois de moindre envergure qu'au printemps (215 m<sup>3</sup>/s; figure 16).



**Figure 15.** Répartition de la renouée du Japon le long de la rivière Etchemin (Québec, Canada) en 2017. La zone d'étude principale se trouve dans la municipalité de Saint-Henri-de-Lévis.



**Figure 16.** Débits journaliers de la rivière Etchemin (Québec, Canada) à la hauteur du village de Saint-Henri-de-Lévis entre juillet 2018 et juin 2019 (Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2020). On remarque les pics de crue un peu avant le 1<sup>er</sup> janvier et vers la mi-avril (en rouge sur le graphique). Les données moyennes de débit pour la période 1981–2019 sont indiquées à titre comparatif.

L’étude de l’effet de la renouée du Japon sur l’érosion des berges a été réalisée dans la municipalité de Saint-Henri-de-Lévis (figure 15). Il s’agit d’une municipalité majoritairement agricole avec quelques secteurs résidentiels et industriels. Il y a dans le tronçon de la rivière Etchemin qui traverse la municipalité un grand nombre de clones de renouée sur les berges, mais aussi plusieurs berges non envahies et dont la végétation est constituée de plantes herbacées. Les clones de renouée ont été cartographiés sur les berges dans l’aire d’étude principale en 2017 (figure 15; chapitre 2). La superficie totale occupée par la renouée cette année-là dans ce secteur était alors évaluée à 86 200 m<sup>2</sup>.

## **2.2.2 Mesures de l'érosion dans les berges**

### *2.2.2.1 Profils transversaux répétés réalisés avec un système de géopositionnement par satellites différentiel*

Les méthodes pour mesurer l'érosion des berges sont nombreuses et les avancées technologiques récentes permettent d'obtenir des évaluations de plus en plus précises. Mon choix s'est arrêté sur la méthode des profils transversaux de berges reconstitués avec l'aide d'un système de géopositionnement par satellites différentiel, communément appelé en anglais DGPS (*Differential Global Positioning System*). Les données acquises avec cette technologie, avant et après une période de crue printanière et de débâcle de glace, permettent de mesurer les changements d'altitude (élévation) en un point exact ( $\pm 8\text{--}15$  mm) et de manière extrêmement précise ( $\pm 8$  mm) et efficace. La différence d'élévation avant – après crue fournit ainsi une estimation de la perte de sol par érosion en un lieu donné. Il s'agit d'une technique souvent utilisée pour mesurer l'érosion riveraine et, plus généralement, pour documenter les changements morphologiques qui surviennent dans le chenal d'un cours d'eau (Harmel et al., 1999; Bartley et al., 2008; Ziliani et Surian, 2012; Dietrich, 2014; Foucher et al., 2017; Duró et al., 2018).

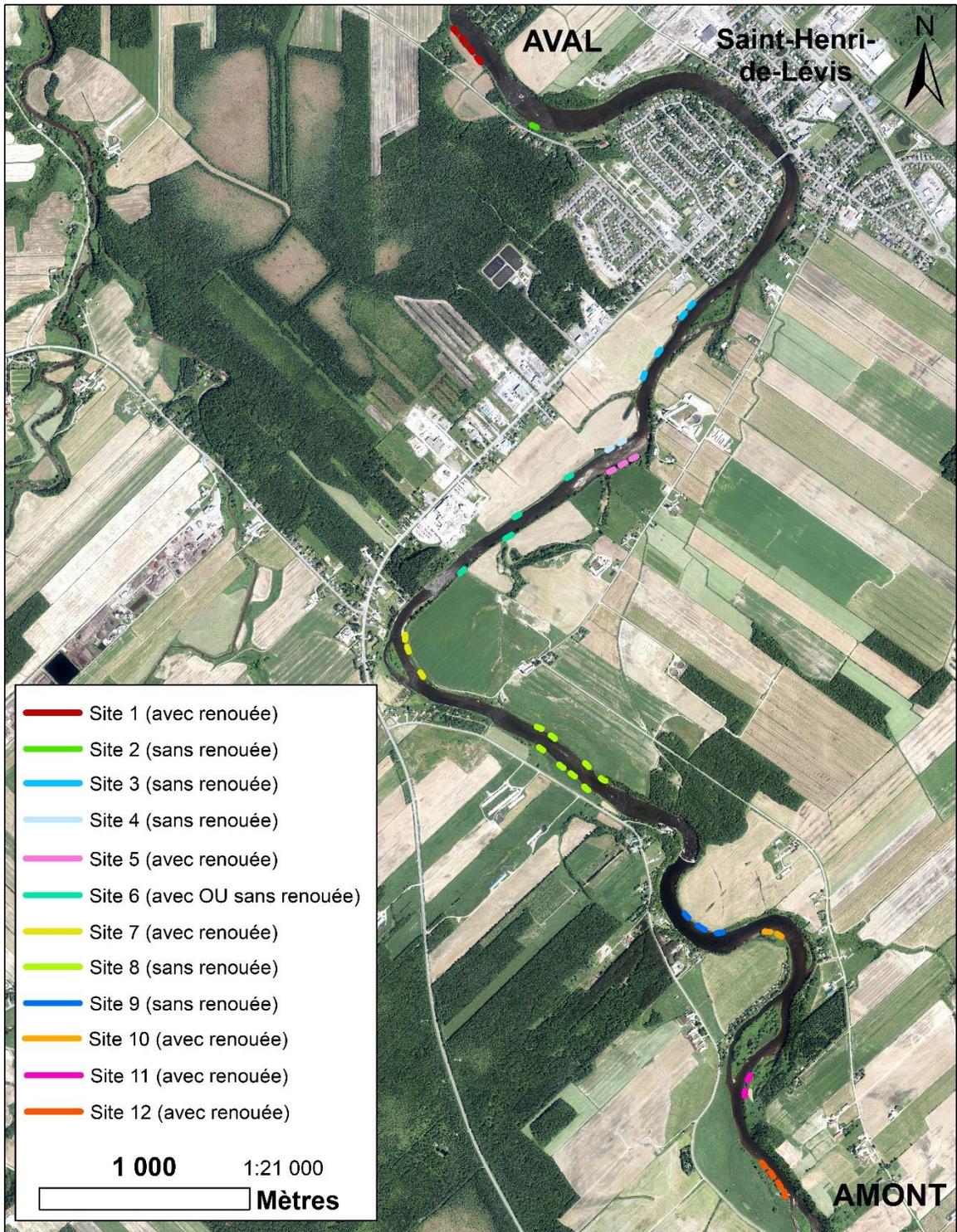
Le DGPS Leica Viva GS14 (Leica Geosystems, Heerbrugg) a été utilisé pour ce travail. Son équipement consiste en une base placée sur une borne géodésique permanente du gouvernement du Québec, avec coordonnées géographiques et altitude connues, ainsi que d'une antenne mobile qu'on déplace sur chaque point d'échantillonnage. La base et l'antenne communiquent entre elles grâce aux constellations satellites et une base radio. La position spatiale et l'altitude du point sont calculées grâce aux satellites qui utilisent comme référence la borne géodésique.

### *2.2.2.2 Localisation des transects d'échantillonnage*

Des profils transversaux, effectués le long de transects d'échantillonnage, ont été dressés à deux reprises, c'est-à-dire avant (novembre 2018) et après (mai – juin 2019) la crue printanière de 2019. Ceux-ci ont été réalisés dans plusieurs sites le long de la rivière Etchemin, et évidemment exactement aux mêmes endroits d'une année à l'autre. La localisation de chacun des transects a d'abord été sélectionnée pour les sites avec renouée du Japon. Les clones de renouée longeant la rivière, dans la zone d'étude, sur une distance de plus de 10 m et qui étaient accessibles, ont d'abord été repérés grâce au travail de photo-interprétation et de cartographie de terrain effectué pendant l'été 2017 (figure 15; chapitre 2). En tout, 21 clones, mesurant entre 11 et 735 m de longueur, ont été identifiés dans la zone, totalisant 1 706 m de berges envahies. Seuls les clones d'au moins 26 m de longueur (la valeur médiane des 21 clones) ont été conservés pour ce travail. Les clones conservés ont ensuite été subdivisés en segments de 26 m de long, pour un total de 45 segments.

Les berges sans renouée du Japon, utilisées ici à titre de comparaison, ont d'abord été choisies sur la base du fait qu'elles étaient dominées par une végétation herbacée, sans arbres ni arbustes. En effet, la renouée a surtout tendance à coloniser les berges dépourvues d'arbres et d'arbustes, ceux-ci étant plus compétitifs pour l'espace et l'accès à la lumière. Dans la zone d'étude, toutes les berges sans renouée et avec végétation herbacée ont été cartographiées; cela a représenté 16 tronçons de berges d'une longueur variant entre 26 et 494 m (longueur totale : 2 756 m), qui ont aussi été subdivisés en 106 segments de 26 m de long.

Par la suite, 20 des 45 segments de berge avec renouée du Japon ont été sélectionnés au hasard, tout comme 20 des 106 segments sans renouée (figure 17). Pour chaque segment sélectionné, trois profils de berges dressés par la méthode du transect ont été réalisés avec le DGPS, pour un total de 120 profils (transects). Un des trois transects a été positionné au centre du segment et les deux autres à mi-chemin entre le centre et les extrémités du segment.



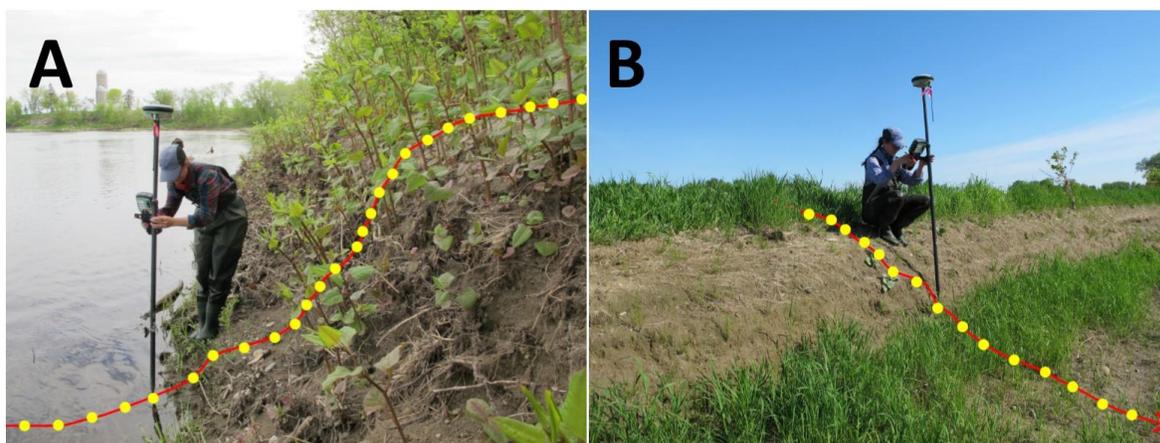
**Figure 17.** Localisation des 40 segments avec transects de profil de berge dans le secteur de la rivière Etchemin (Québec, Canada) sélectionné pour l'étude de l'effet de la renouée du Japon sur l'érosion. Les segments sont regroupés par sites le long de la rivière.

En novembre 2018, une borne permanente a été installée au point de départ de chaque transect, dans le haut de la berge, de manière à ce que le transect de 2019 démarre au même emplacement que celui de 2018. Le point de départ d'un transect était situé à 50 cm de la limite d'un espace cultivé ou, faute de champ en culture, à 2 à 8 m du début du haut du talus de la berge. La borne était constituée d'un clou en acier de 30 cm de long muni d'une rondelle d'acier empêchant que la tête du clou ne s'enfonce sous la surface du sol. Une étiquette métallique avec un numéro attaché avec du fil de fer et du ruban forestier ont facilité la recherche de ces bornes au printemps 2019, qui a aussi été simplifiée par l'usage d'un détecteur de métal et le DGPS.

### *2.2.2.3 Points d'échantillonnage le long des transects*

Des points d'échantillonnage de l'élévation ont été répartis le long de chaque transect, à partir de la borne et en direction de la rivière, perpendiculairement à la rive en suivant une ligne droite formée par un ruban à mesurer (figure 18). Une mesure de latitude, de longitude et d'élévation a été prise au DGPS à chaque changement morphologique observé le long du transect (Lawler, 1993b; Duró et al., 2018). Ces changements morphologiques pouvaient être des dépressions, des bosses ou des variations dans la déclinaison de la berge et qui créaient des irrégularités dans celle-ci. Même les changements de quelques centimètres de hauteur ont été enregistrés au DGPS par souci de précision. Lorsque la berge ne présentait aucune de ces discontinuités sur plusieurs mètres, un point de mesure a alors été pris à chaque 50 cm de distance. Ne sachant pas où le niveau d'eau allait se trouver après la crue du printemps 2019 (juillet), les mesures avant crue ont été également prises dans la rivière, jusqu'à ce que le niveau d'eau soit trop élevé pour prendre les données de manière sécuritaire.

La première prise de données (avant crue) au DGPS a eu lieu du 11 au 19 novembre 2018. La seconde (après crue) a eu lieu du 16 mai au 18 juin 2019. Malgré tous les efforts, il était presque impossible de placer le DGPS exactement aux mêmes endroits (points) en mai – juin 2019 qu'en novembre 2018. Les berges étaient en effet souvent passablement modifiées par la crue et le passage des glaces. Pour obtenir de bons profils et faire de meilleures comparaisons, il valait mieux prendre de nouveaux points, toujours sur l'emplacement exact des transects de 2018, mais là où se trouvaient (mai – juin 2019) les nouveaux changements morphologiques.



**Figure 18.** Exemple d'utilisation du DGPS pour réaliser des profils de berges par transect (en rouge), avec points d'échantillonnage (en jaune), dans les berges avec renouée du Japon (A) et sans renouée (B), en juin 2019 (photographies : Marianne Bouchard).

Comme les points d'altitude au DGPS n'ont pas été pris exactement au même endroit le long des transects à l'automne 2018 et au printemps 2019, une transformation des données était nécessaire pour mesurer les changements d'élévation possiblement causés par l'érosion. La première étape du traitement des données des transects a été de transformer la position des points (longitude et latitude) en distance de la borne, donc du point de départ du haut du transect. Pour ce faire, les données des points ont été importées dans le logiciel ArcGIS (Esri®, 2018). L'outil interactif *Profil de points* de l'extension *3D Analyst* a permis de générer le diagramme des profils de berges à partir des points des transects le long d'une ligne tracée dans ce logiciel. Il a ensuite été possible d'exporter dans le logiciel Excel (Microsoft, 2016) les données d'élévation des points des profils de berges en fonction de la distance de la borne, autant pour les données de l'automne 2018 que pour celles du printemps 2019.

Une fois les données importées dans Excel, les profils de novembre 2018 et de mai – juin 2019 ont été mis en relation sur des diagrammes (nuages de points avec courbes lissées). Un écrémage des données a ensuite été réalisé pour ne conserver que les points pris entre la borne du haut du talus, ou l'emplacement atteint par le niveau d'eau lors de la crue de 2019, et l'emplacement du niveau de l'eau à l'étiage en juillet 2019. Ainsi, les transects ne prenaient en compte que la portion de la berge ayant été inondée.

Pour connaître la différence d'altitude entre les deux moments de prise de données, il a simplement fallu soustraire les données d'élévation du printemps 2019 de celles de l'automne 2018. Un résultat positif correspondait à une accumulation de sédiments et un résultat négatif à de l'érosion. Cependant, comme les points pris au DGPS en novembre 2018 et en mai – juin 2019 n'étaient pas positionnés exactement au même endroit le long des transects, on pouvait difficilement procéder à une soustraction de données brutes par paires de points. Il a donc fallu construire une matrice dans Excel afin d'interpoler l'élévation entre les points de mesure en des endroits précis, en l'occurrence à tous les 10 cm le long des transects. Les différences d'élévation ont été calculées à partir de ces points espacés de 10 cm. Au total, 11 952 points de différence d'élévation ont été générés de cette façon.

### **2.2.3 Caractérisation des berges**

L'érosion des berges peut être due à bien d'autres facteurs que la renouée du Japon. C'est pourquoi une caractérisation des berges était nécessaire pour connaître les autres variables explicatives pouvant avoir un effet sur les changements morphologiques survenant à la suite d'une crue. Parmi ces variables, il y avait 1) la classe texturale du sol, 2) la pente de la berge, 3) la morphologie de la berge, 4) le site où se trouvaient les segments de berge, 5) la végétation en présence sur la berge et 6) la densité des tiges de renouée lorsque présente.

#### **2.2.3.1 Classe texturale de sol**

Un échantillon de sol a été prélevé pour chaque segment de berge étudié, à l'emplacement du transect central, au centre du talus riverain. L'échantillon a été pris entre la surface du sol et une profondeur de 25 cm à l'aide d'une sonde pédologique. Tous les sols ainsi récoltés ont été séchés à l'air, puis tamisés pour conserver les particules d'un diamètre inférieur à 2 mm. Une analyse granulométrique (méthode par sédimentation avec dispersant; Bouyoucos, 1962) a été effectuée en laboratoire pour déterminer la proportion de chacune des classes texturales de sol (argile, limon fin, limon grossier, sable).

#### **2.2.3.2 Pente**

La pente de la berge à l'emplacement de chaque transect a été estimée à l'aide des points des profils de berges initiaux, soient ceux de novembre 2019. La pente a été estimée pour le haut

du talus et pour le talus lui-même en traçant une droite dans le profil. Plus la valeur de la pente était proche de zéro, plus la pente était faible.

### 2.2.3.3 Morphologie de la berge

La morphologie de la berge réfère à la géomorphologie du cours d'eau, soit la forme du tronçon de rivière où se trouvent les berges étudiées. Dans l'aire d'étude, les quatre types morphologiques de berges étaient les suivantes (figure 19) : 1) berge linéaire, 2) berge convexe, 3) berge concave et 4) berge d'îlot. Les berges de la rivière Etchemin ont été catégorisées de cette façon par photo-interprétation d'orthophotographies (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, 2015).



**Figure 19.** Exemple des quatre types morphologiques de berges dans un tronçon de la rivière Etchemin (Québec, Canada). En vert : berge linéaire; en rouge : berge concave; en jaune : berge convexe; en bleu : berge d'îlot.

### 2.2.3.4 Sites

Les sites sont des regroupements de segments de trois transects qui partagent des caractéristiques communes. Dans les faits et pour ce travail, un site contenait un groupe de segments plus ou moins adjacents et qui étaient situés dans un tronçon de rivière avec la même morphologie (figure 17). Le regroupement des segments en sites permet de contrôler,

dans les modèles statistiques, les effets fixes de localisation afin de s'assurer que les différences d'élévation mesurées ne dépendaient pas que des facteurs propres aux sites échantillonnés.

### 2.2.3.5 Végétation

Des relevés de végétation ont été réalisés à l'emplacement de chaque transect. Des rubans à mesurer ont été tendus sur les transects à partir des bornes, et la prise de données de végétation s'est faite le long de cette ligne ainsi créée. À chaque mètre le long des lignes, une tige de deux mètres de long a été placée à la verticale et chaque espèce de plante vasculaire touchant la tige a été notée (figure 20A). Les relevés de végétation ont eu lieu du 2 au 18 juillet 2019. Étant donné la très faible richesse et diversité végétale recensée, la végétation a en définitive été classée, pour chaque relevé, en deux catégories, soit 1) avec renouée du Japon, et 2) sans renouée (autre végétation, herbacée dans la plupart des cas, ou sans végétation). Une de ces deux catégories a ensuite été associée à chacun de 11 952 points de différence d'élévation, en prenant pour référence le relevé de végétation le plus près du point de mesure.



**Figure 20.** Relevés de terrain sur les berges de la rivière Etchemin (Québec, Canada) à l'été 2019 : relevés de végétation le long d'un transect en absence de renouée du Japon (A) et dénombrement des tiges de renouée dans un quadrat de 1 m<sup>2</sup> au bas d'une berge, où les tiges de renouée sont plus petites (B) (photographies : Rébecca Matte).

### *2.2.3.6 Densité de tiges de renouée du Japon*

La densité des tiges de renouée du Japon a été évaluée le long des transects au sein de quadrats de 1 m<sup>2</sup> (figure 20B). Le dénombrement des tiges s'est fait du 12 au 14 juin 2019, dans trois quadrats par transect avec bien sûr présence de renouée, le premier dans le haut de la berge, le second au bas de la berge et le troisième à mi-chemin entre les deux. Une mesure de densité a ensuite été associée à chacun de 11 952 points de différence d'élévation (= 0 pour les points sans renouée), en prenant pour référence la mesure la plus près du point d'élévation.

### **2.2.4 Analyses statistiques**

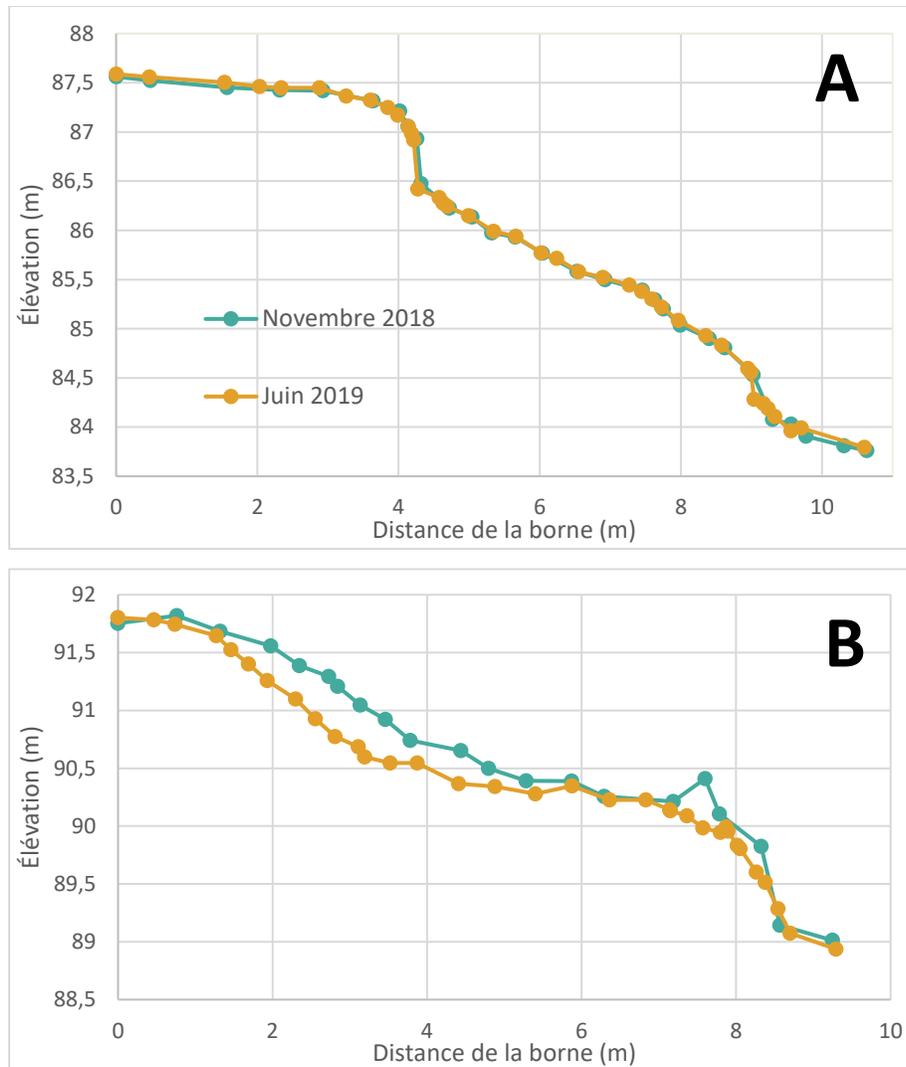
Un fichier de données a été construit en associant à chaque valeur de changement d'élévation (à chaque 10 cm le long d'un transect) une valeur de classe texturale de sol, de pente, de morphologie de la berge, de numéro de segment de rivière, de numéro de site et de distance séparant le point de mesure du lit de la rivière à l'étiage (juillet 2019). Afin de tester l'effet de la renouée du Japon sur l'érosion des berges, deux modèles de régression multiple ont été construits avec la méthode de moindres carrés généralisés (MCG). Dans chacun des modèles, la variable dépendante continue était la différence d'élévation en centimètres des points avant et après la crue printanière de 2019. La principale variable indépendante d'intérêt était la renouée, exprimée sous deux formes distinctes, soit 1) une variable binaire qui prenait la valeur de 1 (présence de renouée) ou de 0 (absence de renouée) en un point donné (modèle 1) et 2) la densité des tiges de renouée par mètre carré (variable continue) en un point donné (modèle 2). Les autres variables explicatives étaient essentiellement incluses dans les modèles afin de contrôler la particularité des sites d'échantillonnages. En effet, puisque les résultats de l'ampleur de l'érosion peuvent dépendre de plusieurs facteurs propres aux sites échantillonnés, les effets fixes de localisation ont été ajoutés à la spécification des modèles. Les variables suivantes ont été prises en considération : 1) la classe texturale de sol, 2) la pente, 3) la morphologie de la berge, 4) la distance du point d'échantillonnage par rapport au niveau de l'eau de la rivière à l'étiage et les effets fixes de localisation, c'est-à-dire 5) le segment de rivière et 6) le site. Les modèles ont été corrigés pour tenir compte d'une variance hétérogène (hétéroscédasticité) afin d'assurer la validité des tests de significativité. La variance a été modélisée par site. En sus des deux modèles de base, quatre modèles additionnels ont été bâtis avec deux échantillons (la base de données a été subdivisée en deux)

tirés aléatoirement afin de tester la robustesse des résultats. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel Stata, version 14.2 (StataCorp, 2016).

## **2.3 Résultats**

### **2.3.1 Mesures d'érosion dans les berges**

En tout, 8 112 points ont été pris au DGPS le long des 120 transects : 3 707 à l'automne 2018 et 4 404 au printemps 2019. Cette différence dans le nombre de points (+19 %) entre les deux prises de données s'explique par le fait qu'en voyant mieux le sol au printemps (sans végétation vivante au-dessus de la surface du sol), les changements dans la topographie des berges étaient plus facilement distinguables, engendrant ainsi un plus grand nombre de points. La technologie du DGPS a permis de dresser des profils de berges avec une grande exactitude, autant au mois de novembre 2018 qu'en mai – juin 2019 (figure 21).



**Figure 21.** Deux exemples de profils de berges répétés (novembre 2018, juin 2019) dans deux transects, le premier (A : sans renouée) dans le site 8 de la rivière Etchemin (Québec, Canada; voir figure 17), le second (B : avec renouée) dans le site 12.

### 2.3.2 Caractérisation des berges

Les berges étudiées le long de la rivière Etchemin avaient toutes une classe texturale de sol assez semblable, qui variait entre le loam sableux (63 % des segments), le sable loameux (25 %) et le loam (12 %). La pente au haut des talus variait de 0 à 0,10 (0–10 %). La pente moyenne des talus était de 0,33 (33 %) et variait de 0,14 à 0,80 (14–80 %). La pente moyenne des talus était de 0,29 (29 %) là où la renouée du Japon était présente, et de 0,35 (35 %) là où elle était absente.

Pour ce qui est de la morphologie de la berge, elle était linéaire pour 20 segments (50 %), convexe pour 12 segments (30 %) et concave pour quatre segments (10 %). Quatre autres segments (10 %) se trouvaient sur un îlot. La renouée était beaucoup plus présente en situation d'îlot qu'en berge linéaire (tableau 2).

**Tableau 2.** Proportion des points de relevés de végétation occupés par les deux classes de végétation (renouée du Japon et autre végétation) pour chacun des quatre types de morphologie de berge en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada).

| Morphologie de la berge | Classe de végétation    |                         |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                         | <i>Renouée du Japon</i> | <i>Autre végétation</i> |
| <i>Linéaire</i>         | 23 %                    | 77 %                    |
| <i>Convexe</i>          | 50 %                    | 50 %                    |
| <i>Concave</i>          | 51 %                    | 49 %                    |
| <i>Îlot</i>             | 61 %                    | 39 %                    |

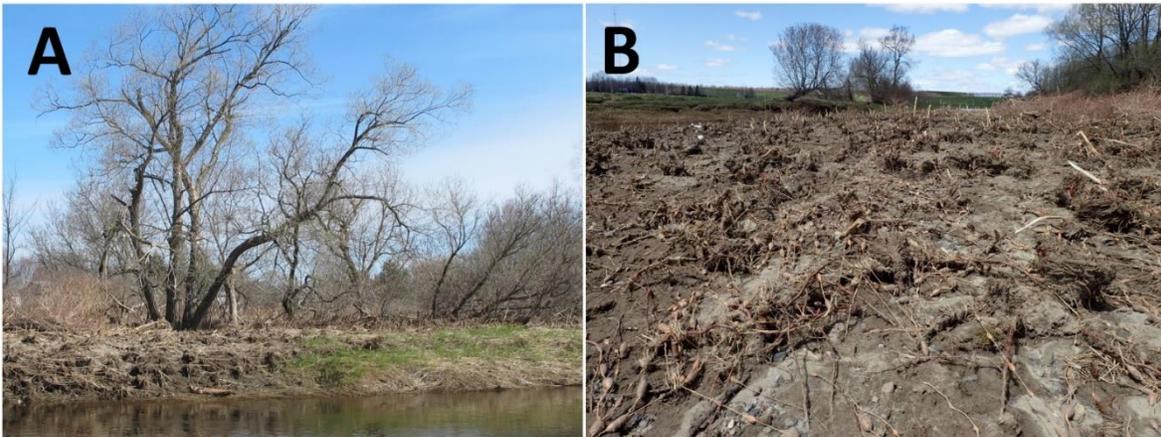
Les espèces de plantes vasculaires les plus recensées sur les berges ont été l'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea* : 47 % des points d'échantillonnage), la renouée du Japon (39 %), la prêle des champs (*Equisetum arvense* : 13 %), le brome inerme (*Bromus inermis* : 12 %) et l'apios d'Amérique (*Apios americana* : 8 %). Près de 10 % des points d'échantillonnage n'avaient pas de végétation en présence. La présence de renouée a été associée à 4 858 points (41 %) des 11 952 points de différence d'élévation calculés grâce à la matrice. La densité moyenne des tiges de renouée du Japon dans les berges envahies était de 41 tiges par m<sup>2</sup> et variait entre 5 et 213 tiges par m<sup>2</sup> (valeur médiane : 30 tiges par m<sup>2</sup>). La densité de tiges moyenne dans le bas des talus était de 65, elle était de 43 au centre du talus et de 24 en haut de talus. Une ANOVA (P < 0,0001) et des tests de comparaisons multiples de Scheffé (P = 0,006) ont indiqué que les moyennes de ces trois groupes étaient significativement différentes.

### **2.3.3 Érosion des berges**

#### *2.3.3.1 Portrait général*

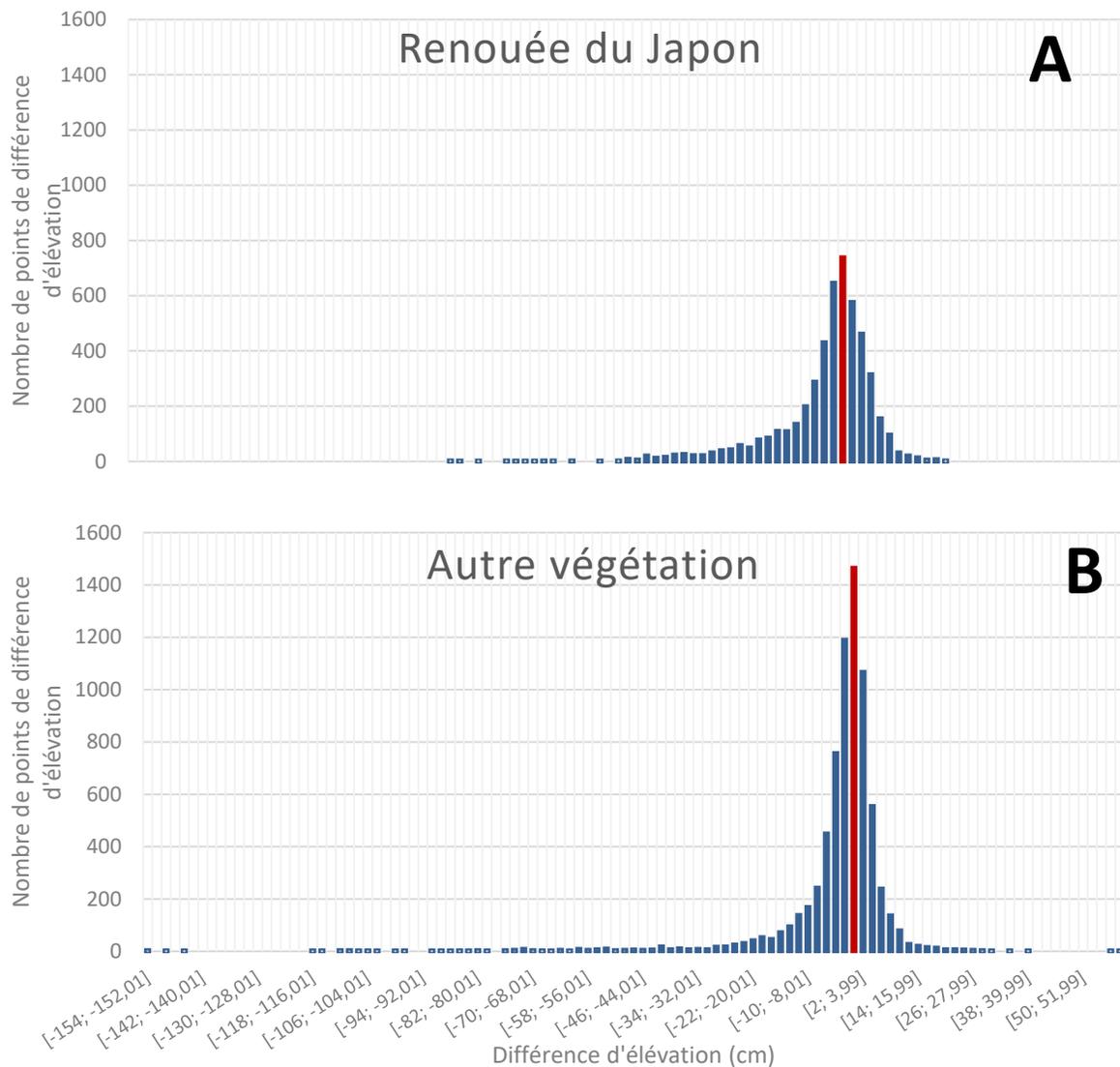
En 2019, les processus d'érosion ont prédominé sur les processus d'accumulation de sédiments là où ont été faits et refaits les profils de berges le long de la rivière Etchemin. De

l'érosion (différence d'élévation négative par rapport à novembre 2018) a été observée dans 56 % des points de différence d'élévation générés pour les modèles statistiques, mais ce pourcentage est plus élevé pour les points avec renouée du Japon (66 %) que pour les points sans renouée (49 %). Dans les berges avec renouée, un sol à nu visiblement érodé a été observé à plusieurs endroits aux printemps 2018 et 2019 (figure 22).



**Figure 22.** Berges de la rivière Etchemin (Québec, Canada) au printemps (avril). Lorsque la renouée du Japon est absente, les berges sont souvent recouvertes de graminées qui sont déjà en croissance à la fin avril (couleur verte à droite dans la photographie A). Lorsque la renouée est présente (à gauche dans la photographie A et sur la photographie B), le sol peut-être complètement dénudé de végétation et montrer des signes évidents d'érosion (photographie A : Rebecca Matte; B : Claude Lavoie).

La moyenne et la médiane de différence d'élévation pour les points avec renouée du Japon étaient respectivement de  $-4,4$  cm et de  $-2,0$  cm, alors qu'elles étaient de  $-1,8$  cm et de  $+0,1$  cm là où la renouée était absente. Les moyennes de différence d'élévation pour ces deux catégories de végétation étaient significativement différentes (test de  $t = 13,25$ ;  $P < 0,0001$ ). La distribution des différences d'élévation pour les points avec ou sans renouée est normale, mais le mode est situé entre 0 et  $-2$  cm (= érosion) pour les points avec renouée et entre 0 et 2 cm (= accumulation) pour les points sans renouée (figure 23).



**Figure 23.** Distributions des valeurs de différence d'élévation (classes de 2 cm) entre novembre 2018 et mai – juin 2019 pour les points de mesure avec renouée du Japon (A) et sans renouée (B), mesures effectuées en bordure de la rivière Etchemin (Québec, Canada).

### 2.3.3.2 Modèle statistique 1 : présence ou absence de renouée du Japon

Les résultats du modèle de régression multiple numéro 1 ayant comme variable indépendante binaire la présence ou l'absence de renouée du Japon sont détaillés dans le tableau 3. Selon ce modèle, il y avait en 2019, et de manière significative ( $P = 0,046$ ), près de 3 cm de plus d'érosion (coefficient =  $-2,81$ ) là où la renouée était présente que là où elle était absente. Cette différence d'érosion tient toutefois compte du fait que les sites avec renouée semblent

aussi avoir une moins grande propension à l'accumulation de sédiments que les sites sans renouée, ce qui accentuerait l'écart.

La pente semble avoir accentué l'érosion (coefficient =  $-15,99$ ), quoique le seuil de significativité de cette variable est légèrement supérieur à  $0,05$  ( $P = 0,055$ ). Il y aurait donc une perte de sol additionnelle de  $0,16$  cm par point de pourcentage de pente supplémentaire. Le fait de se trouver sur un îlot semble aussi avoir eu une influence significative sur l'érosion ( $P = 0,003$ ). En fait, il y avait, en 2019,  $10$  cm de plus d'érosion (coefficient =  $-10,03$ ) sur les îlots que dans les berges linéaires. Enfin, toujours selon le modèle, des effets fixes de localisation peuvent influencer l'érosion (annexe 1) : l'ampleur de l'érosion variait selon l'endroit où les données ont été prises. Mais même en tenant compte de ces facteurs supplémentaires, le modèle indique que cette variabilité ne permet pas pour autant de masquer l'effet de la renouée sur l'érosion qui est donc présumé, statistiquement parlant, bel et bien réel. Les résultats des deux modèles additionnels effectués chacun avec la moitié de l'échantillon de départ sont presque identiques au modèle de base (annexes 2a et 2b), ce qui suggère que le modèle est robuste.

**Tableau 3.** Modèle de régression multiple testant l'effet de la renouée du Japon sur la différence d'élévation (2019 vs 2018) des berges de la rivière Etchemin (Québec, Canada), et dont la variable indépendante binaire est la présence ou l'absence de la renouée. Le nombre d'observations (points de différence d'élévation) est de 11 952 et le R<sup>2</sup> du modèle est de 0,248.

| <i>Variable</i>                                  |               | <i>Coefficient</i> | <i>Erreur type</i> | <i>t</i> | <i>P &gt; t</i> | <i>Intervalle de confiance 95%</i> |        | <i>Sig.</i> |
|--------------------------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|----------|-----------------|------------------------------------|--------|-------------|
| <b>Présence de renouée du Japon</b>              |               | -2,808             | 1,246              | -2,25    | 0,046           | -5,551                             | -0,065 | **          |
| <b>Classe texturale de sol (vs loam sableux)</b> | Sable loameux | 3,308              | 3,346              | 0,99     | 0,344           | -4,056                             | 10,671 |             |
|                                                  | Loam          | 5,057              | 2,803              | 1,80     | 0,099           | -1,112                             | 11,226 | *           |
| <b>Pente</b>                                     |               | -15,993            | 7,449              | -2,15    | 0,055           | -32,387                            | 0,401  | *           |
| <b>Morphologie de la berge (vs linéaire)</b>     | Convexe       | -4,069             | 4,043              | -1,01    | 0,336           | -12,967                            | 4,830  |             |
|                                                  | Concave       | 0,515              | 2,500              | 0,21     | 0,841           | -4,987                             | 6,017  |             |
|                                                  | Îlot          | -10,032            | 2,703              | -3,71    | 0,003           | -15,982                            | -4,082 | ***         |
| <b>Distance de la rivière</b>                    |               | -0,333             | 0,218              | -1,53    | 0,155           | -0,814                             | 0,147  |             |
| *** $p < 0,01$ , ** $p < 0,05$ , * $p < 0,1$     |               |                    |                    |          |                 |                                    |        |             |

### 2.3.3.3 Modèle statistique 2 : densité des tiges de renouée du Japon

Les résultats du modèle de régression multiple numéro 2 ayant comme variable indépendante continue la densité des tiges de renouée du Japon sont détaillés dans le tableau 4. Selon ce modèle, plus la densité des tiges était élevée, plus il y avait en 2019 de l'érosion (coefficient = -0,067), et ce, même en tenant compte des effets fixes de localisation (annexe 3). Ainsi, il y aurait une perte de sol additionnelle de 0,67 cm à chaque fois que la densité des tiges par mètre carré augmente de dix. Cet effet est significatif ( $P = 0,004$ ). Quant à la pente ou le fait d'être sur un îlot, le résultat est sensiblement le même que pour le modèle de présence ou d'absence de renouée. Par contre, dans ce modèle, la distance de la rivière semble avoir eu une certaine influence sur l'érosion (coefficient = -0,422;  $P = 0,054$ ) : plus on s'éloignait de la rivière, plus il y avait de l'érosion. Les résultats des deux modèles additionnels effectués chacun avec la moitié de l'échantillon de départ sont presque identiques au modèle de base (annexes 4a et 4b), ce qui suggère que le modèle est robuste.

**Tableau 4.** Modèle de régression multiple testant l'effet de la densité des tiges de renouée du Japon sur la différence d'élévation (2019 vs 2018) des berges de la rivière Etchemin (Québec, Canada). Le nombre d'observations (points de différence d'élévation) est de 11 952 et le R<sup>2</sup> du modèle est de 0,265.

| <i>Variables</i>                                 |               | <i>Coefficient</i> | <i>Erreur type</i> | <i>t</i> | <i>P &gt; t</i> | <i>Intervalle de confiance 95%</i> |        | <i>Sig.</i> |
|--------------------------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|----------|-----------------|------------------------------------|--------|-------------|
| <b>Densité des tiges de renouée du Japon</b>     |               | -0,067             | 0,019              | -3,59    | 0,004           | -0,109                             | -0,026 | ***         |
| <b>Classe texturale de sol (vs loam sableux)</b> | Sable loameux | 2,784              | 3,160              | 0,88     | 0,397           | -4,172                             | 9.740  |             |
|                                                  | Loam          | 4,682              | 2,793              | 1,68     | 0,122           | -1,465                             | 10.828 |             |
| <b>Pente</b>                                     |               | -16,000            | 7,485              | -2,14    | 0,056           | -32,475                            | 0,475  | *           |
| <b>Morphologie de la berge (vs linéaire)</b>     | Convexe       | -4,473             | 4,111              | -1,09    | 0,300           | -13,521                            | 4.576  |             |
|                                                  | Concave       | -0,549             | 2,536              | -0,22    | 0,833           | -6,132                             | 5.033  |             |
|                                                  | Îlot          | -10,885            | 2,440              | -4,46    | 0,001           | -16,254                            | -5.515 | ***         |
| <b>Distance de la rivière</b>                    |               | -0,422             | 0,196              | -2,16    | 0,054           | -0,854                             | 0,009  | *           |

\*\*\*  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$

## 2.4 Discussion

Les modèles statistiques construits avec des données de différence d'élévation prélevées sur des berges de la rivière Etchemin, certaines envahies par la renouée du Japon et d'autres pas, suggèrent que les berges envahies sont bel et bien susceptibles d'être plus érodées que celles qui ne le sont pas (H<sub>1</sub> confirmée). Les berges envahies perdent environ 3 cm (épaisseur) de plus de sols que les berges sans renouée. Une densité de tiges plus élevée, des pentes de berges plus abruptes (H<sub>2</sub> confirmée) et le fait de se trouver sur un îlot favoriseraient aussi une perte de sols plus élevée.

Cette plus grande susceptibilité à l'érosion en présence de renouée du Japon peut s'expliquer de la manière suivante. Les tiges mortes de la plante peuvent être emportées par l'eau et la glace lors des crues printanières (chapitre 2). Le sol des berges devient alors dénudé de structures végétales et n'est plus ainsi protégé contre l'eau et les glaces qui peuvent librement racler le sol. Qui plus est, l'absence de végétation diminue la rugosité de la berge, ce qui accélère l'écoulement de l'eau et donc augmente sa force d'érosion (Thorne et Furbish, 1995;

Hopkinson et Wynn, 2009). La renouée a une forte biomasse souterraine, mais les rhizomes n'empêchent pas l'érosion du sol en surface et ne compensent pas pour la perte de structures végétales au-dessus du sol, puisqu'ils sont incapables de favoriser l'accumulation de nouveaux sédiments.

Cette érosion additionnelle de près de 3 cm équivaut à une perte de sol entre 25 et 45 kg par mètre carré, considérant que la masse volumique des sols de types loam sableux et sable loameux peut varier entre 0,9 (Saint-Laurent et al., 2017) et 1,6 tonne par mètre cube (Alberta Agriculture and Rural Development, 2010). À titre comparatif, on a estimé que l'impaticie glanduleuse, une autre plante envahissante des berges, engendre en bordure des rivières suisses et anglaises qui ne gèlent pas l'hiver des pertes additionnelles de sols de l'ordre de 10 à 18 kg par mètre carré de rive envahie (Greenwood et al., 2018). À l'échelle d'un tronçon de rivière hautement envahi comme celui de la rivière Etchemin à la hauteur de Saint-Henri-de-Lévis (chapitre 2), la perte de sol occasionnée par la renouée du Japon peut représenter une masse importante. En 2018, les clones de renouée occupaient sur les berges de ce tronçon de rivière (23 km) une superficie totale de 119 000 m<sup>2</sup>. À la lumière des résultats obtenus, ces clones ont pu engendrer, en 2019, une perte *additionnelle* de sol d'environ 3 000 à 5 330 tonnes. Il importe toutefois de mettre ce chiffre en perspective, car même sans renouée, le sol se serait érodé (en moyenne) sur une épaisseur de près de 2 cm, ce qui représente une perte (estimée) d'environ 15 à 27 kg de sol par mètre carré et donc, sur 119 000 m<sup>2</sup>, entre 1 820 et 3 240 tonnes de sols. Mais même en tenant compte de cela, on constate que l'érosion additionnelle engendrée par la renouée demeure très considérable (+ 92 – + 290 %), toutes proportions gardées.

Certaines conditions en bordure de rivière peuvent contribuer à accentuer encore davantage l'effet de la renouée du Japon sur l'érosion. Un talus envahi avec en sus une pente abrupte sera encore plus érodé, car ces talus permettent des vitesses d'écoulement plus rapides que s'ils ont de faibles pentes (Laubel et al., 2003; Krzeminska et al., 2019; Zhao et al., 2020). Pour leur part, les îlots de rivières envahis semblent particulièrement susceptibles à l'érosion, car ils peuvent être complètement submergés lors des crues. Ils se trouvent aussi carrément dans la trajectoire des glaces lors de la débâcle.

Le second modèle statistique suggère que des densités de tiges de renouée du Japon plus élevées génèrent une plus forte érosion. Dans les faits, les densités élevées se trouvaient, en bordure de la rivière Etchemin, essentiellement dans le bas des talus. Les bas de talus sont évidemment beaucoup plus exposés aux variations du niveau d'eau et sont inondés plus longtemps au printemps, ce qui favorise d'autant plus l'érosion du sol. Cela semble aussi perturber la manière dont poussent les tiges de renouée, qui sont alors petites, souples et beaucoup plus nombreuses. L'inondation récurrente en bas de berge aurait le même effet qu'une perturbation liée à la lutte contre la renouée, comme la fauche ou l'extraction partielle, qui peut faire augmenter la densité des tiges (Delbart et al., 2012; Haight et al., 2017; Nicolas Trottier, communication personnelle, 2020). Faute de collets, qui semblent nécessiter quelques saisons avec peu ou pas de perturbations pour se développer, les tiges émergent directement des rhizomes. Les perturbations fréquentes ne laisseraient pas non plus le temps aux tiges de se développer en hauteur et diamètre. En somme, la renouée a comme stratégie de multiplier ses tiges pour compenser l'effet des inondations récurrentes, qui ne permettent pas leur croissance régulière.

La période d'étude, qui s'étendait de novembre 2018 à juin 2019, a été marquée par une crue exceptionnellement forte, avec une récurrence de près de 50 ans (chapitre 2) et deux débâcles de glace. Il est donc probable que l'estimation de perte de sol enregistrée en 2019 soit exceptionnelle. Étant donné le caractère très variable de l'intensité des crues d'une année à l'autre, il est important d'étudier l'impact des plantes envahissantes sur la géomorphologie fluviale sur un laps de temps beaucoup plus étendu que sur une seule année. Des recherches de nature longitudinale permettraient de savoir si les pertes de sol engendrées par la renouée du Japon fragilisent réellement les berges et augmentent de manière significative la sédimentation des plans d'eau. Si tel devait être le cas, alors l'intégrité de l'écosystème aquatique pourrait être détériorée par la grande quantité de sédiments transportée par l'eau. L'augmentation de la température de l'eau, la diminution de l'oxygène disponible, l'envasement des frayères, l'inflammation des branchies des poissons et la pollution par les pesticides et les engrais lessivés avec les sédiments érodés sont des effets qui pourraient être engendrés par une présence de plus en plus imposante de la renouée sur les berges (Reash et Berra, 1989; Mol et Ouboter, 2004; Greig et al., 2005; Paaijmans et al. 2008; Österling, 2015).

Les projections des effets des changements climatiques pour les 30 prochaines années dans le Québec méridional annoncent des crues printanières hâtives (22 à 34 jours plus tôt), mais moins volumineuses à cause de la diminution du couvert de neige (Boyer et al., 2010). Toutefois, des crues estivales, automnales et hivernales avec un débit de pointe plus haut pourraient aussi être plus fréquentes (Ouranos, 2015), ce qui rendrait les berges envahies par la renouée du Japon plus susceptibles d'être érodées durant ces périodes. Le portrait de l'érosion documenté dans cette étude pourrait en conséquence beaucoup changer dans les prochaines décennies.

## Conclusion générale

L'objectif général de ce mémoire était de mieux comprendre la dynamique spatio-temporelle de la renouée du Japon dans un milieu riverain influencé par des crues récurrentes et un couvert de glace en hiver. Dans un premier temps, je me suis penchée sur la manière avec laquelle se dissémine la renouée lors d'une crue printanière avec débâcle de glace. Il en est ressorti que, dans un tronçon de rivière (23 km) fortement envahi par la renouée, plus d'un millier de fragments de rhizomes et de collets peuvent être arrachés des clones et déposés un peu plus loin en aval par l'eau ou la glace. Les fragments sont en grande partie déposés sur les berges convexes des méandres et sur la plaine inondable, c'est-à-dire là où le courant est plus faible. De plus, j'ai calculé, de 2003 à 2018, un accroissement linéaire de 813 % de la superficie occupée par la renouée dans ce même tronçon de la rivière Etchemin. Dans un deuxième temps, j'ai mesuré, avec des instruments précis, l'effet réel de la renouée sur l'érosion des berges. Les modèles statistiques construits avec des données de différence d'élévation prélevées sur des berges de la rivière Etchemin, certaines envahies par la renouée et d'autres pas, indiquent que les berges envahies sont susceptibles d'être plus érodées que celles qui ne le sont pas. Il y a eu en 2019, à la suite d'une crue exceptionnellement forte, une perte de sol supplémentaire de 3 cm d'épaisseur dans les berges envahies comparativement aux berges sans renouée. Une densité de tiges plus élevée, des pentes de berges plus abruptes et le fait de se trouver sur un îlot favoriseraient aussi une érosion des berges plus forte.

La crue printanière de 2019 de la rivière Etchemin a été remarquable : le débit maximal a été très élevé (444 m<sup>3</sup>/s), et il y a eu une débâcle de glace mécanique et la formation d'embâcles de glace d'une envergure considérable. J'estime que l'intensité de ces événements a influencé à la hausse le nombre de fragments de renouée du Japon arrachés des clones et la distance de dissémination de ces fragments. Il s'agit d'une hypothèse qui pourrait être validée en recueillant des données supplémentaires sur plusieurs années.

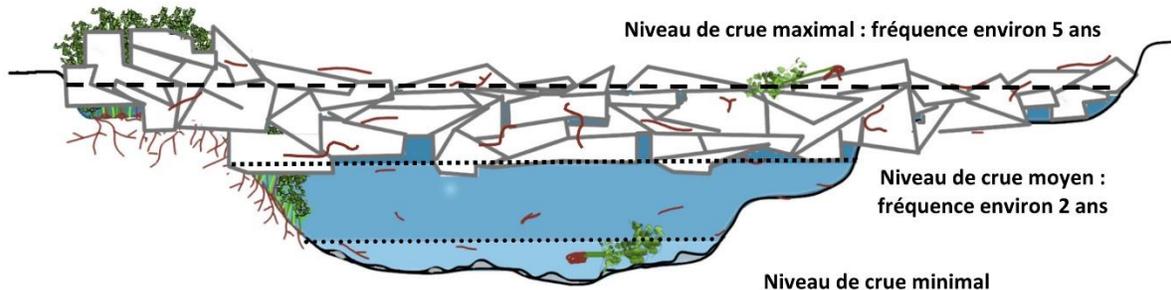
Les crues avec embâcles de glace devraient normalement générer davantage d'érosion que celles sans embâcles, étant donné que les glaces peuvent racler les berges plus brutalement que l'eau. En outre, les glaces prises dans le chenal d'une rivière entravent la libre circulation de l'eau, ce qui crée des inondations subites, et ce, même avec des débits assez faibles. Le

niveau d'eau des inondations créées par les embâcles de glace peut alors atteindre celui d'une crue en eau libre qui ne se produit pas souvent (20-100 ans). Les embâcles de glace engendrent un rehaussement du niveau d'eau en amont, ce qui peut se traduire par des niveaux d'eau élevés, même avec faible débit (figure 24A). Dans les tronçons de rivière en amont des embâcles, comme observés sur la rivière Etchemin, la fréquence de l'atteinte d'un niveau d'eau élevé (par exemple, crue de 20-100 ans) peut être aussi élevée qu'à tous les cinq ans. C'est ce qui a été observé sur des rivières en Gaspésie, dans l'Est du Québec, qui sont propices à la formation d'embâcles de glace (Boivin et al., 2017).

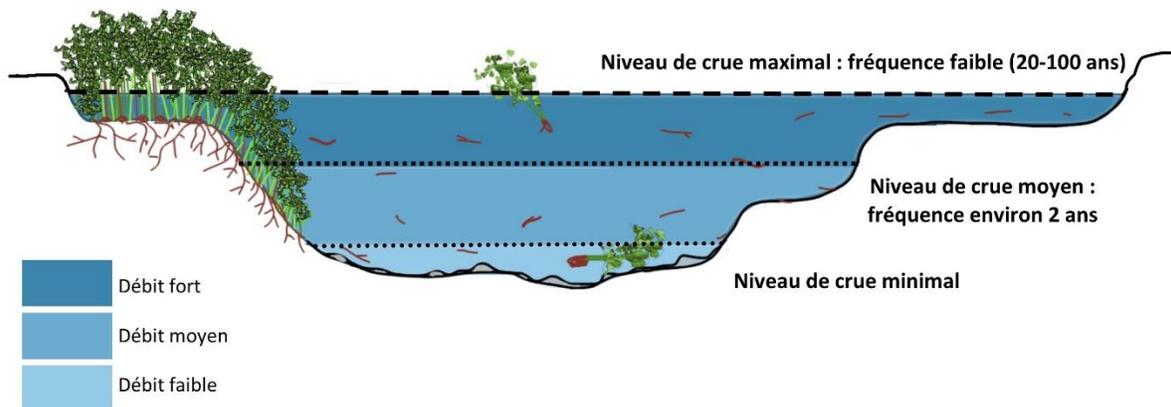
Lorsqu'il y a embâcles, il est probable qu'un plus grand nombre de fragments de renouée du Japon sont arrachés sur les berges, notamment au haut des talus, et que ces fragments sont alors disséminés sur une plus vaste étendue dans la plaine d'inondation. Par exemple, au printemps 2019, j'ai trouvé des fragments de collets dans la plaine inondable sur une distance allant jusqu'à 200 m perpendiculairement à la rivière. Dans ce contexte, les rivières avec débâcles mécaniques des glaces pourraient être particulièrement propices à la dissémination rapide de la renouée sur de vastes superficies.

Lors des crues en eaux libres (sans glace), le débit doit être particulièrement élevé afin que le niveau d'eau atteigne le haut de la berge et la plaine inondable. De tels événements ont une fréquence beaucoup plus faible que les événements de crue avec glace (par exemple, 20-100 ans). L'érosion des berges est certainement moins forte qu'avec présence de morceaux de glace (figure 24B). On pourrait alors s'attendre à ce que le nombre de fragments de renouée du Japon arrachés soit moins élevé. Les fragments moins abondants se dissémineraient aussi plus rarement dans la plaine inondable, soit seulement lorsque les crues atteignent un très haut niveau.

**A** : Niveau de crue avec embâcles



**B** : Niveau de crue en eaux libres



**Figure 24.** Modèle conceptuel du processus de transport des fragments de renouée lorsque la crue est en eau libre et lorsqu'il y a un embâcle de glace.

Il est probable que les changements climatiques pressentis pour les prochaines décennies engendreront une série de modifications dans la dynamique des crues et des embâcles de glace dans les rivières du Québec. On peut s'attendre à ce que le couvert de glace soit plus mince à cause des températures hivernales plus chaudes (Beltaos et Prowse, 2009; Morse et Turcotte, 2018) et que les crues printanières soient moins volumineuses et plus hâtives, avec un pic en mars plutôt qu'en avril (Boyer et al., 2010; Gombault et al., 2015; Ouranos, 2015). Le débit de pointe des futures crues printanières est difficile à évaluer, mais il pourrait augmenter pour les crues estivales, automnales et hivernales à cause d'une hausse des précipitations et de la fréquence des cycles gel-dégel (Ouranos, 2015). Dans certaines rivières, les crues plus fréquentes en hiver pourraient causer tout de même des débâcles de

glace et des embâcles (Morse et Turcotte, 2018). Cela pourrait contribuer, d'une part, à éroder les berges avec clones de renouée du Japon et, d'autre part, à générer une plus grande quantité de fragments de la plante. On ignore toutefois si des fragments arrachés en hiver peuvent survivre au gel et à de plus longues périodes d'immersion dans l'eau. De plus, il est possible que la renouée nécessite une certaine période de temps sans perturbations pour s'enraciner dans le sol. Des crues plus fréquentes tout au long de l'année pourraient donc à la fois accélérer la propagation des fragments et nuire à leur enracinement.

\*\*\*

Une amplification de l'érosion des berges causée par la renouée du Japon s'ajoute à un bon nombre d'autres conséquences négatives que la plante a sur l'environnement lorsqu'elle se comporte comme un organisme envahisseur (voir introduction générale). Cet impact négatif supplémentaire peut motiver les gestionnaires de l'environnement à entreprendre une lutte contre cette plante envahissante dans les milieux riverains touchés par les crues et les débâcles de glaces fréquentes. Si on laisse la renouée se propager sans entraves le long des rivières, on peut en effet s'attendre à des pertes de sols plus imposantes et à des ajouts de sédiments dans les cours d'eau, ce qui au fil du temps pourrait être néfaste pour l'écosystème aquatique.

Il est complexe, pour ne pas dire illusoire, d'éradiquer en milieux riverains de vastes clones de renouée du Japon, à moins de faire usage à répétition de doses massives d'herbicides (interdit au Québec sur les berges des rivières) ou d'excaver les clones, ce qui déstabiliserait probablement davantage les berges que la seule présence de la renouée. Le bâchage des clones ne s'est pas avéré à ce jour très concluant, surtout sur les clones de grande envergure (Evette et al., 2019). De plus, près des rivières englacées, les toiles ne résisteraient probablement pas à l'effet des glaces lors de la débâcle. L'arrachage ou la fauche, combiné à l'implantation d'une forte compétition végétale de nature arbustive, pourrait constituer une alternative (Dommanget et al., 2019). Outre le fait que ces méthodes sont encore expérimentales, on peut toutefois se demander si dans les cas d'envahissements massifs, comme dans la section la plus en aval de la rivière Etchemin, il n'est pas déjà trop tard en raison de l'investissement que cela pourrait représenter et des résultats incertains. De plus, les centaines, voire les milliers de fragments de rhizomes et de collets arrachés lors des crues

et formant de nouveaux clones chaque année complexifient considérablement la lutte. En effet, il faudrait s'assurer qu'il n'y a pas de clones en amont qui puissent propager un flux de fragments vers les endroits où la lutte s'est effectuée.

Toutefois, le long des cours d'eau peu ou pas envahis, il peut valoir la peine de procéder à l'élimination systématique de la renouée du Japon, notamment en arrachant les jeunes pousses en émergence avant qu'elles ne forment de véritables clones (Colleran et Goodall, 2014; 2015). Cette approche de déterrage précoce, expérimentée au Vermont et en France, consiste à inspecter les rives et la plaine inondable pour repérer, puis extraire manuellement les fragments de rhizomes ou de tiges de renouée déposés lors de la crue la plus récente. Ceux-ci sont dans la plupart des cas ensevelis sous les sédiments alluviaux à moins de 10 cm de la surface du sol (Colleran et Goodall, 2014), mais les tiges qui émergent peu de temps après leur déposition permettent de les localiser assez facilement. Les fragments peuvent être extraits à la main ou à l'aide de crocs de jardin ou de pelles de planteur en faisant attention de ne pas les casser. Colleran et Goodall (2014) ont rapporté un taux de succès d'extraction de fragments entiers et intacts de 75 à 80 %; notre propre taux de succès en bordure de la rivière Etchemin (2019) s'est avéré de 77 %. Les fragments extraits sont ensuite ensachés puis éliminés de manière sécuritaire. Cela dit, le réalisme d'une opération de ce genre diminue rapidement avec le degré d'envahissement (Boyer et Barthod, 2019).

Dans un contexte québécois de crues printanières récurrentes et de fréquentes débâcles mécaniques des glaces, les campagnes de déterrage doivent être réalisées chaque printemps pour freiner le plus possible la propagation de la renouée du Japon. Dans le tronçon très envahi de la rivière Etchemin (Saint-Anselme – Lévis), cela implique, si on ne procède pas au retrait des immenses clones qu'on y trouve, l'arrachage chaque année de plusieurs milliers de fragments. Le travail serait herculéen et les retombées peut-être pas à la hauteur des efforts investis. Par contre, en amont de Saint-Anselme, où les clones sont beaucoup moins abondants, le déterrage précoce pourrait être une option beaucoup plus réaliste. De fait, en 2020, une campagne expérimentale de déterrage sur un tronçon de 11 km en amont de Saint-Anselme a permis d'éliminer ainsi 12 futurs clones en émergence (G. Rouleau et C. Lavoie, données non publiées), une quantité beaucoup plus raisonnable d'un point de vue opérationnel. Les campagnes de déterrage peuvent se concentrer, du moins en bordure de la

rivière Etchemin, sur les îlots, les bancs d'accumulation, les berges convexes et les plaines inondables, autrement dit dans les zones propices à la déposition, ce qui facilite d'autant le travail.

## Bibliographie

- Agence de mise en valeur des forêts privées des Appalaches. 2010. Orthophotographie couleur de Chaudière-Appalaches (partie est) - 2010 (30 cm). Agence de mise en valeur des forêts privées des Appalaches, Lac-Etchemin. [Orthophotographies] couleur, résolution de 30 cm, format ECW, 455 Mo.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2014. Conséquences de l'érosion. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa. [En ligne] <http://www.agr.gc.ca/fra/science-et-innovation/pratiques-agricoles/sol-et-terre/gestion-des-sols/consequences-de-l-erosion/?id=1187283440379> [consulté le 16 octobre 2018].
- Aguiar, F.C.F. et Ferreira, M.T. 2013. Plant invasions in the rivers of the Iberian Peninsula, south-western Europe: a review. *Plant Biosystems* 147: 1107–1119.
- Aguilera, A.G., Alpert, P., Dukes, J.S. et Harrington, R. 2010. Impacts of the invasive plant *Fallopia japonica* (Houtt.) on plant communities and ecosystem processes. *Biological Invasions* 12: 1243–1252.
- Alberta Agriculture and Rural Development. 2010. Agricultural Soil Compaction: Causes and Management. Alberta Agriculture and Rural Development, Edmonton. 10 p.
- Arnold, E. et Toran, L. 2018. Effects of bank vegetation and incision on erosion rates in an urban stream. *Water* 10: 482.
- Bankhead, N.L., Thomas, R.E. et Simon, A. 2017. A combined field, laboratory and numerical study of the forces applied to, and the potential for removal of, bar top vegetation in a braided river. *Earth Surface Processes and Landforms* 42: 439–459.
- Barney, J.N. 2006. North American history of two invasive plant species: phytogeographic distribution, dispersal vectors, and multiple introductions. *Biological Invasions* 8: 703–717.
- Barthod, L. et Boyer, M. 2019. Un sac, des gants, un croc de jardin : le déterrage précoce, une technique douce contre l'envahissement des rivières par les renouées asiatiques. *Sciences Eaux et Territoires* 27: 56–61.
- Bartley, R., Keen, R.J., Hawdon, A.A., Hairsine, P.B., Disher, M.G. et Kinsey-Henderson, A.E. 2008. Bank erosion and channel width change in a tropical catchment. *Earth Surface Processes and Landforms* 33: 2174–2200.
- Beerling, D.J., Bailey, J.P. et Conolly, A.P. 1994. Biological flora of the British Isles. *Fallopia japonica* (Houtt.) Ronse Decraene. *Journal of Ecology* 82: 959–979.
- Beltaos, S. 1997. Effects of climate on river ice jams. 9th workshop on river ice. Committee on river ice processes and the environment, hydrology section, Canadian Geophysical Union, Fredericton, p. 225–244.
- Beltaos, S. et Prowse, T.D. 2009. River-ice hydrology in a shrinking cryosphere. *Hydrological Processes* 23: 122–144.
- Beltaos, S., Prowse, T.D. et Carter, T. 2006. Ice regime of the lower Peace River and ice-jam flooding of the Peace-Athabasca Delta. *Hydrological Processes* 20: 4009–4029.

- Bibliothèque et Archives nationales du Québec. 2020. Plan officiel de la paroisse de Saint-Henri de Lauzon, comté de Lévis, 11 juin 1879 (copié par A.E.B. Courchesne le 12 décembre 1927). Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Québec. [En ligne] <http://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3142893> [consulté le 17 février 2020].
- Bímová, K., Mandák, B. et Pyšek, P. 2003. Experimental study of vegetative regeneration in four invasive *Reynoutria* taxa (Polygonaceae). *Plant Ecology* 166: 1–11.
- Bing Maps. 2016. Rivière Etchemin, Québec, Canada (46,763760, -71,229870). Microsoft, Redmont. [En ligne] <https://www.bing.com/maps> [consulté le 13 juin 2017].
- Birkeland, G.H. 1996. Riparian vegetation and sandbar morphology along the lower Little Colorado River, Arizona. *Physical Geography* 17: 534–553.
- Biron, P., Boucher, E., Taha, W., Martel, J.-L. et Fournier, A. 2020. Comité expert visant à identifier des solutions porteuses pour la réduction de la vulnérabilité des risques liés à l'inondation par embâcles de glace sur la rivière Chaudière. Rapport final. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec, 92 p.
- Boivin, M., Buffin-Bélangier, T. et Piégay, H. 2017. Interannual kinetics (2010–2013) of large wood in a river corridor exposed to a 50-year flood event and fluvial ice dynamics. *Geomorphology* 279: 59–73.
- Booth, D.B. 1990. Stream-channel incision following drainage-basin urbanization. *Journal of the American Water Resources Association* 26: 407–417.
- Booy, O., Wade, P.M. et Roy, H. 2015. Field guide to invasive plants and animals. Bloomsbury, Londres, 304 p.
- Bottollier-Curtet, M., Planty-Tabacchi, A.-M. et Tabacchi, É. 2013. Competition between young exotic invasive and native dominant plant species: implications for invasions within riparian areas. *Journal of Vegetation Science* 24: 1033–1042.
- Boucher, É., Bégin, Y. et Arseneault, D. 2009. Impacts of recurring ice jams on channel geometry and geomorphology in a small high-boreal watershed. *Geomorphology* 108: 273–281.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54: 464–465.
- Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I. et Roy, A.G. 2010. Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology* 384: 65–83.
- Boyer, M. et Barthod, L. 2019. L'analyse cartographique des colonisations végétales, un outil précieux et indispensable pour la gestion. *Sciences Eaux et Territoires* 27: 32–43.
- Bram, M.R. et McNair, J.N. 2004. Seed germinability and its seasonal onset of Japanese knotweed (*Polygonum cuspidatum*). *Weed Science* 52: 759–767.
- Brock, J. et Wade, M. 1992. Regeneration of Japanese knotweed (*Fallopia japonica*) from rhizome and stems: observations from greenhouse trials. IXe colloque international sur la biologie des mauvaises herbes. Dijon, p. 85–93.
- Bryan, R.B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 32: 385–415.

- Centre d'expertise hydrique du Québec. 2012. Plaines inondables (surface) : couche des zones à risque d'inondation à l'échelle de 1/2 000 (CRISQUE-2K). Centre d'expertise hydrique du Québec, Québec. [Fichier d'ordinateur] Version 1.0, 1 : 2 000.
- Child, L. 1999. Vegetative regeneration and distribution of *Fallopia japonica* and *Fallopia ×bohemica*: implications for control and management. Thèse de doctorat, Loughborough University, Loughborough, 220 p.
- Child, L. et Wade, M. 2000. The Japanese knotweed manual. Packard Publishing Limited, Chichester, 123 p.
- Chmura, D., Tokarska-Guzik, B., Nowak, T., Wozniak, G., Bzdęga, K., Koszela, K. et Gancarek, M. 2015. The influence of invasive *Fallopia* taxa on resident plant species in two river valleys (southern Poland). *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 84: 23–33.
- Christopher, F.J. 2014. Temporal macroinvertebrate community structure in leaf packs from a stream dominated by riparian Japanese Knotweed spp. *Keystone Journal of Undergraduate Research* 2: 29–36.
- Coldwell, A.E. 1957. Importance of channel erosion as a source of sediment. *Transactions of the American Geophysical Union* 38: 908–912.
- Colleran, B.P. et Goodall, K.E. 2014. In situ growth and rapid response management of flood-dispersed Japanese knotweed (*Fallopia japonica*). *Invasive Plant Science and Management* 7: 84–92.
- Colleran, B.P. et Goodall, K.E. 2015. Extending the timeframe for rapid response and best management practices of flood-dispersed Japanese knotweed (*Fallopia japonica*). *Invasive Plant Science and Management* 8: 250–253.
- Conseil de bassin de la rivière Etchemin. 2014. Plan directeur de l'eau des bassins versants des secteurs d'intervention de la Zone Etchemin. Version finale. Conseil de bassin de la rivière Etchemin, Saint-Henri, 333 p.
- Corenblit, D., Baas, A.C.W., Bornette, G., Darrozes, J., Delmotte, S., Francis, R.A., Gurnell, A.M., Julien, F., Naiman, R.J. et Steiger, J.. 2011. Feedbacks between geomorphology and biota controlling Earth surface processes and landforms: a review of foundation concepts and current understandings. *Earth Science Reviews* 106: 307–331.
- Couper, P.R. 2003. Effects of silt-clay content on the susceptibility of river banks to subaerial erosion. *Geomorphology* 56: 95–108.
- Couper, P.R. et Maddock, I.P. 2001. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 631–646.
- Čuda, J., Rumlerová, Z., Brůna, J., Skálová, H. et Pyšek, P. 2017. Floods affect the abundance of invasive *Impatiens glandulifera* and its spread from river corridors. *Diversity and Distributions* 23: 342–354.
- Dassonville, N., Guillaumaud, N., Piola, F., Meerts, P. et Poly, F. 2011. Niche construction by the invasive Asian knotweeds (species complex *Fallopia*): impact on activity, abundance and community structure of denitrifiers and nitrifiers. *Biological Invasions* 13: 1115–1133.

- Dassonville, N., Vanderhoeven, S., Gruber, W. et Meerts, P. 2007. Invasion by *Fallopia japonica* increases topsoil mineral nutrient concentrations. *Écoscience* 14: 230-240.
- Davies, N.S. et Gibling, M.R. 2009. Cambrian to Devonian evolution of alluvial systems: the sedimentological impact of the earliest land plants. *Earth-Science Reviews* 98: 171–200.
- Davies, N.S. et Gibling, M.R. 2010. Paleozoic vegetation and the Siluro-Devonian rise of fluvial lateral accretion sets. *Geology* 38: 51–54.
- Delbart, E., Mahy, G., Weickmans, B., Henriët, F., Crémer, S., Pieret, N., Vanderhoeven, S. et Monty, A. Can land managers control Japanese knotweed? Lessons from control tests in Belgium. *Environmental Management* 50:1089–1097.
- Demers, S., Olsen, T., Buffin-Bélanger, T., Marchand, J.-P., Biron, P.M. et Morneau, F. 2014. L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec). *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement* 8: 67–88.
- De Waal, L.C. 2001. A viability study of *Fallopia japonica* stem tissue. *Weed Research* 41: 447–460.
- Dietrich, J.T. 2014. Applications of Structure-from-Motion photogrammetry to fluvial geomorphology. Thèse de doctorat, University of Oregon, Eugene, 109 p.
- Dommanget, F., Evette, A., Piola, F., Rouifed, S. et Brasier, W. 2019. État de l'art des techniques de génie végétal pour contrôler les renouées. *Sciences Eaux et Territoires* 27: 74–79.
- Données Québec. 2016. Historique (publique) d'embâcles répertoriées au MSP. Données Québec, Québec. [En ligne] <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/historique-publique-d-embacles-repertories-au-msp/resource/ae1047f6-dc00-4b58-b4bd-eda765e963be> [consulté le 26 novembre 2019].
- Duquette, M.-C., Compérot, A., Hayes, L.F., Pagola, C., Belzile, F., Dubé, J. et Lavoie, C. 2016. From the source to the outlet: understanding the distribution of invasive knotweeds along a North American river. *River Research and Applications* 32: 958–966.
- Duró, G., Crosato, A., Kleinhans, M.G. et Uijttewaal, W.S.J. 2018. A low-cost technique to measure bank erosion processes along middle-size river reaches. *Earth Surface Dynamics Discussions* doi.org/10.5194/esurf-2018-3.
- Elliott, A.H. 2000. Settling of fine sediment in a channel with emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering* 126: 570–577.
- Environnement Canada. 2019a. Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 : Beauséjour, Québec. Environnement Canada, Québec. [En ligne] [https://climat.meteo.gc.ca/climate\\_normals/results\\_1981\\_2010\\_f.html?searchType=stnProx&txtRadius=100&optProxType=city&selCity=46%7C49%7C71%7C13%7CQu%C3%A9bec&selPark=&txtCentralLatDeg=&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongDeg=&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5315&dispBack=0](https://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?searchType=stnProx&txtRadius=100&optProxType=city&selCity=46%7C49%7C71%7C13%7CQu%C3%A9bec&selPark=&txtCentralLatDeg=&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongDeg=&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5315&dispBack=0) [consulté le 17 décembre 2019].

- Environnement Canada. 2019b. Rapport de données quotidiennes pour décembre 2018 : Beauséjour, Québec. Environnement Canada, Québec. [En ligne] [https://climat.meteo.gc.ca/climate\\_data/daily\\_data\\_f.html?hlyRange=%7C&dlyRange=1975-08-01%7C2019-08-31&mlyRange=1975-01-01%7C2018-02-01&StationID=5315&Prov=QC&urlExtension=\\_f.html&searchType=stnProx&optLimit=yearRange&StartYear=2019&EndYear=2020&selRowPerPage=25&Line=5&txtRadius=25&optProxType=city&selCity=46%7C49%7C71%7C13%7CQu%C3%A9bec&selPark=&txtCentralLatDeg=&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongDeg=&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&timeframe=2&Day=19&Year=2018&Month=12#](https://climat.meteo.gc.ca/climate_data/daily_data_f.html?hlyRange=%7C&dlyRange=1975-08-01%7C2019-08-31&mlyRange=1975-01-01%7C2018-02-01&StationID=5315&Prov=QC&urlExtension=_f.html&searchType=stnProx&optLimit=yearRange&StartYear=2019&EndYear=2020&selRowPerPage=25&Line=5&txtRadius=25&optProxType=city&selCity=46%7C49%7C71%7C13%7CQu%C3%A9bec&selPark=&txtCentralLatDeg=&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongDeg=&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&timeframe=2&Day=19&Year=2018&Month=12#) [consulté le 20 janvier 2020].
- Environnement Canada. 2019c. Rapport de données quotidiennes pour mars 2019 : Beauséjour, Québec. Environnement Canada, Québec. [En ligne] [https://climat.meteo.gc.ca/climate\\_data/daily\\_data\\_f.html?hlyRange=%7C&dlyRange=1975-08-01%7C2019-08-31&mlyRange=1975-01-01%7C2018-02-01&StationID=5315&Prov=QC&urlExtension=\\_f.html&searchType=stnProx&optLimit=yearRange&StartYear=2019&EndYear=2020&selRowPerPage=25&Line=5&txtRadius=25&optProxType=city&selCity=46%7C49%7C71%7C13%7CQu%C3%A9bec&selPark=&txtCentralLatDeg=&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongDeg=&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&timeframe=2&Day=19&Year=2019&Month=3#](https://climat.meteo.gc.ca/climate_data/daily_data_f.html?hlyRange=%7C&dlyRange=1975-08-01%7C2019-08-31&mlyRange=1975-01-01%7C2018-02-01&StationID=5315&Prov=QC&urlExtension=_f.html&searchType=stnProx&optLimit=yearRange&StartYear=2019&EndYear=2020&selRowPerPage=25&Line=5&txtRadius=25&optProxType=city&selCity=46%7C49%7C71%7C13%7CQu%C3%A9bec&selPark=&txtCentralLatDeg=&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongDeg=&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&timeframe=2&Day=19&Year=2019&Month=3#) [consulté le 20 janvier 2020].
- Esri®. 2018. ArcGIS Desktop. Environmental Systems Research Institute, Redlands.
- Evette, A., Breton, V., Petit, A., Dechaume-Moncharmont, C. et Brasier, W. Les techniques de bâchage pour le contrôle de la renouée. *Sciences Eaux et Territoires* 27: 62–67.
- Forman, J. et Kesseli, R.V. 2003. Sexual reproduction of the invasive species *Fallopia japonica* (Polygonaceae). *American Journal of Botany* 90: 586–592.
- Foucher, A., Salvador-Blanes, S., Vandromme, R., Cerdan, O. et Desmet, M. 2017. Quantification of bank erosion in a drained agricultural lowland catchment. *Hydrological Processes* 31: 1424–1437.
- Francis, R.A., Riley, K.A. et Hoggart, S.P.G. 2008. Vegetative regeneration of *Fallopia japonica* (Houtt.) Ronse Decraene (Japanese knotweed) at varying burial depths. *Weed Biology and Management* 8: 69–72.
- Gammon, M.A., Baack, E., Orth, J.F. et Kesseli, R. 2010. Viability, growth, and fertility of knotweed cytotypes in North America. *Invasive Plant Science and Management* 3: 208–218.
- Gerber, E., Krebs, C., Murrell, C., Moretti, M., Rocklin, R. et Schaffner, U. 2008. Exotic invasive knotweeds (*Fallopia* spp.) negatively affect native plant and invertebrate assemblages in European riparian habitats. *Biological Conservation* 141: 646–654.
- Gombault, C., Sottile, M.F., Ngwa, F.F., Madramootoo, C.A., Michaud, A.R., Beaudin, I. et Chikhaoui, M. 2015. Modelling climate change impacts on the hydrology of an agricultural watershed in southern Québec. *Canadian Water Resources Journal* 40: 71–86.

- Google Earth. 2016. Rivière Etchemin, Lévis, Québec, Canada (46°44'46.78"N 71°11'55.22"O) (15 septembre 2016). Google, Mountain View. [En ligne] <http://www.earth.google.com> [consulté le 13 juin 2017].
- Google Earth. 2018. Rivière Etchemin, Lévis, Québec, Canada (46°44'46.78"N 71°11'55.22"O) (23 septembre 2018). Google, Mountain View. [En ligne] <http://www.earth.google.com> [consulté le 9 février 2019].
- Gowton, C., Budsock, A. et Matlaga, D. 2016. Influence of disturbance on Japanese knotweed (*Fallopia japonica*) stem and rhizome fragment recruitment success within riparian forest understory. *Natural Areas Journal* 36: 259–267.
- Graf, W.L. 1978. Fluvial adjustments to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region. *Geological Society of America Bulletin* 89: 1491–1501.
- Green, T.R., Beavis, G.S., Dietrich, C.R. et Jakeman, A.J. 1999. Relating stream-bank erosion to in-stream transport of suspended sediment. *Hydrological Processes* 13: 777–787.
- Greenwood, P., Baumann, P., Pulley, S. et Kuhn, N.J. 2018. The invasive alien plant, *Impatiens glandulifera* (Himalayan Balsam), and increased soil erosion: causation or association? Case studies from a river system in Switzerland and the UK. *Journal of Soils and Sediments* 18: 3463–3477.
- Greenwood, P., Gange, A.C. et Kuhn, N.J. 2020. Evidence of sedimentation inequality along riparian areas colonised by *Impatiens glandulifera* (Himalayan balsam). *Weed Research* 60: 26–36.
- Greenwood, P. et Kuhn, N.J. 2014. Does the invasive plant, *Impatiens glandulifera*, promote soil erosion along the riparian zone? An investigation on a small watercourse in northwest Switzerland. *Journal of Soils Sediments* 14: 637–650.
- Greig, S.M., Sear, D.A. et Carling, P.A. 2005. The impact of fine sediment accumulation on the survival of incubating salmon progeny: implications for sediment management. *Science of the Total Environment* 344: 241–258.
- Griffins, V.W. et Stedinger, J.R. 2007. Log-Pearson type 3 distribution and its application in flood frequency analysis. I: distribution characteristics. *Journal of Hydrologic Engineering*. 12: 482–491.
- Grimsby, J.L., Tsirelson, D., Gammon, M.A. et Kesseli, R. 2007. Genetic diversity and clonal vs. sexual reproduction in *Fallopia* spp. (Polygonaceae). *American Journal of Botany* 94: 957–964.
- Groeneveld, E., Belzile, F. et Lavoie, C. 2014. Sexual reproduction of Japanese knotweed (*Fallopia japonica* s.l.) at its northern distribution limit: new evidence of the effect of climate warming on an invasive species. *American Journal of Botany* 101: 459–466.
- Gurnell, A.M., Holloway, J.V. Liffen, T., Serlet, A.J. et Zolezzi, G. 2018. Plant root and rhizome strength: are there differences between and within species and rivers? *Earth Surface Processes and Landforms* 44: 389–392.
- Haight, C., Tobing, S.L., Schuler, J.A., Larson, M., McCarthy, K., Kriesberg, R., Yau, F. et Palmer, M.I. 2017. Japanese knotweed management in the riparian zone of the Bronx River. *Ecological Restoration* 35: 298–302.

- Hajzlerová, L. et Reif, J. 2014. Bird species richness and abundance in riparian vegetation invaded by exotic *Reynoutria* spp. *Biologia* 69: 247–253.
- Hamel, V.B. 2012. Les mouvements subaériens d'érosion des berges : étude de cas d'une berge en érosion, Rivière Ouelle, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, 81 p.
- Harmel, R.D., Haan, C.T. et Dutnell, R. 1999. Bank erosion and riparian vegetation influences: Upper Illinois River, Oklahoma. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 42: 1321–1329.
- Henshaw, A.J., Thorne, C.R. et Clifford, N.J. 2012. Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. *Catena* 100: 107–119.
- Hickin, E.J. et Nanson, G.C. 1984. Lateral migration rates of river bends. *Journal of Hydraulic Engineering* 110: 1557–1567.
- Hood, W.G. et Naiman, R.J. 2000. Vulnerability of riparian zones to invasion by exotic vascular plants. *Plant Ecology* 148: 105–114.
- Hooke, J.M. 1979. An analysis of the processes of river bank erosion. *Journal of Hydrology* 42: 39–62.
- Hopkinson, L. et Wynn, T. 2009. Vegetation impacts on near bank flow. *Ecohydrology* 2: 404–418.
- Horáčková, J., Juříčková, L., Šizling, A.L., Jarošík, V. et Pyšek, P. 2014. Invasiveness does not predict impact: response of native land snail communities to plant invasions in riparian habitats. *PLoS One* 9:e108296.
- Jacquemyn, H., Van Looy, K., Breyne, P. et Honnay, O. 2010. The Meuse river as a corridor for range expansion of the exotic plant species *Sisymbrium austriacum*: evidence for long-distance seed dispersal. *Biological Invasions* 12: 553–561.
- Jenks, G.F. et Caspall, F.C. 1971. Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers* 61: 217–244.
- Jugie, M., Gob, F., Vermoux, C., Brunstein, D., Tamisier, V., Le Coeur, C. et Grancher, D. 2018. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins. *Journal of Hydrology* 563: 418–434.
- Kappes, H., Lay, R. et Topp, W. 2007. Changes in different trophic levels of litter-dwelling macrofauna associated with giant knotweed invasion. *Ecosystems* 10: 734–744.
- Keim, F.D., Beadle, G.W. et Frolik, A.L. 1932. The identification of the more important prairie hay grasses of Nebraska by their vegetative characters. College of Agriculture, University of Nebraska Agricultural Experiment Station Research Bulletin 65, Lincoln.
- Krzeminska, D., Kerkhof, T., Skaalsveen, K. et Stolte, J. 2019. Effect of riparian vegetation on stream bank stability in small agricultural catchments. *Catena* 172: 87–96.
- Lachance, C. 2017. Sources de sédiments dans un réservoir d'eau potable par la technique de traçage de sédiments. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 103 p.

- Lamberti-Raverot, B., Piola, F., Thiébaud, M., Guillard, L., Vallier, F. et Puijalon, S. 2017. Water dispersal of the invasive complex *Fallopia*: the role of achene morphology. *Flora* 234: 150–157.
- Larsen, T. 2013. Biology, ecological Impacts, and management of Japanese knotweed (*Polygonum cuspidatum* syn. *Fallopia japonica*) in Nova Scotia. Mémoire de maîtrise, Dalhousie University, Halifax, 111 p.
- Laubel, A., Kronvang, B., Hald, A.B. et Jensen, C. 2003. Hydromorphological and biological factors influencing sediment and phosphorus loss via bank erosion in small lowland rural streams in Denmark. *Hydrological Processes* 17: 3443–3463.
- Laubel, A., Svendsen, L.M., Kronvang, B. et Larsen, S.E. 1999. Bank erosion in a Danish lowland stream system. *Hydrobiologia* 410: 279–285.
- Lavoie, C. 2017. The impact of invasive knotweed species (*Reynoutria* spp.) on the environment: review and research perspectives. *Biological Invasions* 19: 2319–2337.
- Lavoie, C. 2019. 50 plantes envahissantes : protéger la nature et l’agriculture. Les Publications du Québec, Québec, 416 p.
- Lawler, D.M. 1992. Process dominance in bank erosion systems. Dans : Carling, P.A. et Geoffrey, E.P., rédacteurs. *Lowland floodplain rivers geomorphological perspectives*. John Wiley & Sons, Hoboken, p. 117–143.
- Lawler, D.M., 1993a. Needle ice processes and sediment mobilization on river banks: the River Ilston, West Glamorgan, UK. *Journal of Hydrology* 150: 81–114.
- Lawler, D.M. 1993b. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. *Earth Surface Processes and Landforms* 18: 777–821.
- Lawler, D.M., Couperthwaite, J.S., Bull, L.J. et Harris, N.M. 1997. Bank erosion events and processes in the Upper Severn basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 1: 523–534.
- Lecerf, A., Patfield, D., Boiché, A., Riipinen, M.P., Chauvet, E. et Dobson, M. 2007. Stream ecosystems respond to riparian invasion by Japanese knotweed (*Fallopia japonica*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64: 1273–1283.
- Maerz, J.C., Blossey, B. et Nuzzo, V. 2005. Green frogs show reduced foraging success in habitats invaded by Japanese knotweed. *Biodiversity and Conservation* 14: 2901–2911.
- Mariani, C., Cabrini, R., Danin, A., Piffanelli, P., Fricano, A., Gomarasca, S., Dicandilo, M., Grassi, F. et Soave, C. 2010. Origin, diffusion and reproduction of the giant reed (*Arundo donax* L.): a promising weedy energy crop. *Annals of Applied Biology* 157: 191–202.
- Martin, F.-M. 2019. Les invasions de renouée asiatiques dans l’espace et dans le temps. *Science Eaux et Territoires* 27: 28–33.
- Maurel, N., Salmon, S., Ponge, J.-F., Machon, N., Moret, J. et Muratet, A. 2010. Does the invasive species *Reynoutria japonica* have an impact on soil and flora in urban wastelands? *Biological Invasions* 12: 1709–1719.

- Meier, C.I., Reid, B.L. et Sandoval, O. 2013. Effects of the invasive plant *Lupinus polyphyllus* on vertical accretion of fine sediment and nutrient availability in bars of the gravel-bed Paloma river. *Limnologica* 43: 381–387.
- Mincheva, T., Barni, E., Varese, G.C., Brusa, G., Cerabolini, B. et Siniscalco, C. 2014. Litter quality, decomposition rates and saprotrophic mycoflora in *Fallopia japonica* (Houtt.) Ronse Decraene and in adjacent native grassland vegetation. *Acta Oecologica* 54: 29–35.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. 2015. Mosaïque d'orthophotographies de Chaudière-Appalaches - 2015 (30 cm). Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, Québec. [Orthophotographies] couleur, résolution de 30 cm, format JP2, 999 Mo.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec. 2019. Débit journalier en m<sup>3</sup>/s. Valeurs moyennes mensuelles pour la station 023303 (Etchemin – au pont-route 173 à Saint-Henri-de-Lévis). Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Québec. [En ligne] [https://www.cehq.gouv.qc.ca/depot/historique\\_donnees\\_som\\_mensuels/023303\\_Q\\_MOY.txt](https://www.cehq.gouv.qc.ca/depot/historique_donnees_som_mensuels/023303_Q_MOY.txt) [consulté le 21 novembre 2018].
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec. 2020. Débit journalier en m<sup>3</sup>/s. Valeurs moyennes journalières pour la station 023303 (Etchemin – au pont-route 173 à Saint-Henri-de-Lévis). Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Québec. [En ligne] [https://www.cehq.gouv.qc.ca/depot/historique\\_donnees/fichier/023303\\_Q.txt](https://www.cehq.gouv.qc.ca/depot/historique_donnees/fichier/023303_Q.txt) [consulté le 22 juillet 2020].
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 1990. Q03116 (144-146; 190-192); Q03117 (063; 108-112). Ministère des Ressources naturelles du Québec, Québec. [Photographies aériennes] 1 : 15 000, infrarouge.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 2003. Q90107 (051-053; 143-145); Q90114 (108-110); Q90125 (157; 158); Q90169 (103-105). Ministère des Ressources naturelles du Québec, Québec. [Photographies aériennes] 1 : 15 000, infrarouge.
- Ministère des Terres et Forêts du Québec. 1964. Q64751 (233; 234; 254; 255); Q64753 (052-055; 069-071). Ministère des Terres et Forêts du Québec, Service de photogrammétrie et de la cartographie, Photo-cartothèque provinciale, Québec. [Photographies aériennes] 1 : 15 840, noir et blanc.
- Mol, J.H. et Ouboter, P.E. 2004. Downstream effects of erosion from small-scale gold mining on the instream habitat and fish community of a small neotropical rainforest stream. *Conservation Biology* 18: 201–214.
- Morin, S., Boucher, É. et Buffin-Bélanger, T. 2015. The spatial variability of ice-jam bank morphologies along the Mistassini River (Quebec, Canada): an indicator of the ice-jam regime? *Natural Hazards* 77: 2117–2138.
- Morse, B. et Turcotte, B. 2018. Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques (volet A). Université Laval, Québec, 79 p.

- Mummigatti, K. 2001. The effects of Japanese Knotweed (*Reynoutria japonica*) on riparian lands in Otsego County, New York. [En ligne] <https://www.oneonta.edu/academics/biofld/PUBS/ANNUAL/2007/Effects%20of%20Knotweed%20growth.pdf> [consulté le 28 juillet 2020].
- Murray, A.B. et Paola, C. 2003. Modeling the effect of vegetation on channel pattern in bedload rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 131–143.
- Murray, A.B., Knaapen, M.A.F., Tal, M. et Kirwan, M.L. 2008. Biomorphodynamics: physical-biological feedbacks that shape landscapes. *Water Resources Research* 44 doi:10.1029/2007WR006410.
- Österling, E.M. 2015. Timing, growth and proportion of spawners of the threatened unionoid mussel *Margaritifera margaritifera*: influence of water temperature, turbidity and mussel density. *Aquatic Sciences* 77: 1–8.
- Ouranos. 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Édition 2015. Ouranos, Montréal, 415 p.
- Paaajmans, K.P., Takken, W., Githeko, A.K. et Jacobs. A.F.G. 2008. The effect of water turbidity on the near-surface water temperature of larval habitats of the malaria mosquito *Anopheles gambiae*. *International Journal of Biometeorology* 52: 747–753.
- Planty-Tabacchi, A.-M., Tabacchi, É., Naiman, R.J., Deferrari, C.M. et Décamps, H. 1996. Invasibility of species-rich communities in riparian zones. *Conservation Biology* 10: 598–607.
- Prosser, I.P., Hughes, A.O. et Rutherford, I.D. 2000. Bank erosion of an incised upland channel by subaerial processes: Tasmania, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1085–1101.
- Puijalón, S., Thiébaud, M., Lamberti-Raverot, B., Piola, F. et Rouifed, S. 2019. Dispersion par les cours d'eau des propagules végétatives et sexuées du complexe d'espèces *Reynoutria*. *Science Eaux et Territoires* 27: 34–37.
- Pyšek, P. et Prach, K. 1993. Plant invasions and the role of riparian habitats: a comparison of four species alien to central Europe. *Journal of Biogeography* 20: 413–420.
- Pyšek, P. et Prach, K. 1994. How important are rivers for supporting plant invasions? Dans : de Waal, L., Child, L., Wade, P.M. et Brock, J., rédacteurs. *Ecology and management of invasive riverside plants*. Wiley, Chichester, p. 19–26.
- Radio-Canada. 2019. Rivière Etchemin : des tronçons de route emportés par les eaux. Radio-Canada, Québec. [En ligne] <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/773805/innondations-riviere-etchemin-saint-anselme> [consulté le 26 novembre 2019].
- Reash, R.J. et Berra, T.M. 1989. Incidence of fin erosion and anomalous fishes in a polluted stream and a nearby clean stream. *Water, Air, and Soil Pollution* 47: 47–63.
- Richardson, D.M., Holmes, P.M., Esler, K.J., Galatowitsch, S.M., Stromberg, J.C., Kirkman, S.P., Pyšek, P. et R.J. Hobbs. 2007. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions, and restoration prospects. *Diversity and Distributions* 13: 126–139.
- Rinaldi, M. et Darby, S.E., 2008. Modelling river-bank erosion processes and mass failure mechanisms: progress towards fully coupled simulations. Dans : Habersack, H.,

- Piegay, H. et Rinaldi, M., rédacteurs. Gravel-Bed Rivers VI: from process understanding to river restoration. Elsevier, Amsterdam, p. 213–239.
- Robert, A., 2003. River processes: an introduction to fluvial dynamics. Routledge, Londres, 214 p.
- Rouified, S., Puijalon, S., Viricel, M.-R. et Piola, F. 2011. Achene buoyancy and germinability of the terrestrial invasive *Fallopia × bohemica* in aquatic environment: a new vector of dispersion? *Écoscience* 18: 79–84.
- Rowntree, K. 1991. An assessment of the potential impact of alien invasive vegetation on the geomorphology of river channels in South Africa. *Southern African Journal of Aquatic Sciences* 17: 28–43.
- Saint-Laurent, D., Gervais-Beaulac, V., Paradis, R., Arsenault-Boucher, L. et Demers, S. 2017. Distribution of soil organic carbon in riparian forest soils affected by frequent floods (Southern Québec, Canada). *Forests* 8: 124.
- Schumm, S.A. 1968. Speculations concerning paleohydrologic controls of terrestrial sedimentation. *Geological Society of America Bulletin* 79: 1573–1588.
- Simon, A. et Collison, A.J.C. 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 527–546.
- Skubała, P. et Mierny, A. 2009. Invasive *Reynoutria* taxa as a contaminant of soil. Does it reduce abundance and diversity of microarthropods and damage soil habitat? *Pesticides* 1-4: 57–62.
- Smith, D.G. 1976. Effect of vegetation on lateral migration of anastomosed channels of a glacier meltwater river. *Geological Society of America Bulletin* 87: 857–860.
- Smith, J.M.D., Ward, J.P., Child, L.E. et Owen, M.R. 2007. A simulation model of rhizome networks for *Fallopia japonica* (Japanese knotweed) in the United Kingdom. *Ecological Modelling* 200: 421–432.
- StataCorp. 2016. Stata 14.2. StataCorp LLC, College Station.
- Stoll, P., Gatzsch, K., Rusterholz, H.-P. et Baur, B. 2012. Response of plant and gastropod species to knotweed invasion. *Basic and Applied Ecology* 13: 232–240.
- Stover, J.E., Keller, E.A., Dudley, T.L. et Langendoen, E.J. 2018. Fluvial geomorphology, root distribution, and tensile strength of the invasive giant reed, *Arundo donax* and its role on stream bank stability in the Santa Clara River, Southern California. *Geosciences* 8: 304.
- Tharayil, N., Alpert, P., Bhowmik, P. et Gerard, P. 2013. Phenolic inputs by invasive species could impart seasonal variations in nitrogen pools in the introduced soils: a case study with *Polygonum cuspidatum*. *Soil Biology and Biochemistry* 57: 858–867.
- Thorne, C.R. 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion. Dans : Hey, R.D., Bathurst, J.C. et Thorne, C.R., rédacteurs. Gravel-bed rivers. Wiley, Chichester, p. 227–259.
- Thorne, C.R. et Tovey, N.K. 1981. Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms* 6: 469–484.

- Thorne, S.D. et Furbish, D.J. 1995. Influences of coarse bank roughness on flow within a sharply curved river bend. *Geomorphology* 12: 241–257.
- Tickner, D.P., Angold, P.G., Gurnell, A.M. et Mountford, J.O. 2001. Riparian plant invasions: hydrogeomorphical control and ecological impacts. *Progress in Physical Geography* 25: 22–52.
- Tokarska-Guzik, B., Bzdęga, K., Dagmara, K. et Jenczała, G. 2006. Changes in plant species richness in some riparian plant communities as a result of their colonisation by taxa of *Reynoutria (Fallopia)*. *Biodiversity Research and Conservation* 1-2: 123–130.
- Topp, W., Kappes, H. et Rogers, F. 2008. Response of ground-dwelling beetle (Coleoptera) assemblages to giant knotweed (*Reynoutria* spp.) invasion. *Biological Invasions* 10: 381–390.
- Trottier, N., Groeneveld, E. et Lavoie, C. 2017. Giant hogweed at its northern distribution limit in North America: experiments for a better understanding of its dispersal dynamics along rivers. *River Research and Applications* 33: 1098–1106.
- Urgence Québec. 2019. Inondations printanières 2017 : tous les états de la situation. Urgence Québec, Québec. [En ligne] [https://www.urgencequebec.gouv.qc.ca/fr/Inondation\\_printanieres\\_2017/Pages/etats-situation.aspx?Page=5](https://www.urgencequebec.gouv.qc.ca/fr/Inondation_printanieres_2017/Pages/etats-situation.aspx?Page=5) [consulté le 26 novembre 2019].
- Van de Wiel, M.J. et Darby, S.E. 2007. A new model to analyse the impact of woody riparian vegetation on the geotechnical stability of riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 2185–2198.
- van Oorschot, M., Kleinhans, M.G., Geerling, G.W., Egger, G., Leuven, R.S.E.W. et Middelkoop, H. 2017. Modeling invasive alien plant species in river systems: interaction with native ecosystem engineers and effects on hydro-morphodynamic processes. *Water Resources Research* 53: 6945–6969.
- Walling, D.E. 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the Total Environment* 344: 159–184.
- West, N.M., Matlaga, D.P. et Davis, A.S. 2014. Managing spread from rhizome fragments is key to reducing invasiveness in *Miscanthus × giganteus*. *Invasive Plant Science and Management* 7: 517–525.
- Wynn, T.M., Mostaghimi, S., Burger, J.A., Harpold, A.A., Henderson, M.B. et Henry, L.-A. 2004. Variation in root density along stream banks. *Journal of Environmental Quality* 33: 2030–2039.
- Zhao, J., Zhang, H., Yang, C., Lee, L.M., Zhao, X. et Lai, Q. 2020. Experimental study of reservoir bank collapse in gravel soil under different slope gradients and water levels. *Natural Hazards* 102: 249–273.
- Zhu, H., Hu, X., Li, Z., Song, L., Li, K., Li, X. et Li, G. 2018. The influences of riparian vegetation on bank failures of a small meadow-type meandering river. *Water* 10: 692.
- Ziliani, L. et Surian, N. 2012. Evolutionary trajectory of channel morphology and controlling factors in a large gravel-bed river. *Geomorphology* 173-174: 104–117.

# Annexe 1

Effets fixes de localisation pris en compte dans le modèle statistique 1 de présence ou d'absence de renouée du Japon à la rivière Etchemin (Québec, Canada) : segments de trois transects par sites. Pour chaque site, les données de changement d'élévation des segments sont comparées à celles du segment ayant le plus grand nombre d'observations (non indiqué dans le tableau).

| <i>Variable</i>   | <i>Coefficient</i> | <i>Erreur type</i> | <i>t</i> | <i>P &gt; t</i> | <i>Intervalle de confiance 95 %</i> |         | <i>Sig.</i> |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------|-----------------|-------------------------------------|---------|-------------|
| Site1 Segment 2   | 4,326              | 2,675              | 1,62     | 0,134           | -1,561                              | 10,213  |             |
| Site1 Segment 1   | 0,955              | 4,243              | 0,23     | 0,826           | -8,385                              | 10,294  |             |
| Site1 Segment 4   | -2,330             | 3,682              | -0,63    | 0,540           | -10,435                             | 5,776   |             |
| Site3 Segment 22  | -2,537             | 3,913              | -0,65    | 0,530           | -11,149                             | 6,075   |             |
| Site3 Segment 24  | -7,476             | 4,000              | -1,87    | 0,088           | -16,281                             | 1,329   | *           |
| Site3 Segment 25  | 4,055              | 2,147              | 1,89     | 0,086           | -0,670                              | 8,780   | *           |
| Site4 Segment 38  | -20,700            | 2,545              | -8,13    | 0,000           | -26,300                             | -15,099 | ***         |
| Site5 Segment 12  | 4,452              | 1,878              | 2,37     | 0,037           | 0,318                               | 8,585   | **          |
| Site5 Segment 13  | 1,965              | 2,040              | 0,96     | 0,356           | -2,524                              | 6,455   |             |
| Site6 Segment 20  | -1,282             | 2,388              | -0,54    | 0,602           | -6,538                              | 3,974   |             |
| Site6 Segment 26  | -5,001             | 3,738              | -1,34    | 0,208           | -13,227                             | 3,226   |             |
| Site6 Segment 27  | -3,555             | 2,203              | -1,61    | 0,135           | -8,404                              | 1,294   |             |
| Site7 Segment 14  | 0,996              | 0,569              | 1,75     | 0,108           | -0,256                              | 2,249   |             |
| Site7 Segment 19  | 9,347              | 3,377              | 2,77     | 0,018           | 1,916                               | 16,779  | **          |
| Site8 Segment 32  | 0,771              | 3,802              | 0,20     | 0,843           | -7,597                              | 9,139   |             |
| Site8 Segment 31  | 5,822              | 2,268              | 2,57     | 0,026           | 0,829                               | 10,815  | **          |
| Site8 Segment 40  | 5,268              | 2,268              | 2,32     | 0,040           | 0,277                               | 10,259  | **          |
| Site8 Segment 37  | 1,977              | 2,231              | 0,89     | 0,394           | -2,934                              | 6,888   |             |
| Site8 Segment 30  | -2,526             | 3,332              | -0,76    | 0,464           | -9,860                              | 4,807   |             |
| Site8 Segment 29  | 1,532              | 2,142              | 0,71     | 0,490           | -3,184                              | 6,247   |             |
| Site8 Segment 28  | -0,038             | 2,339              | -0,02    | 0,987           | -5,188                              | 5,111   |             |
| Site9 Segment 35  | 4,645              | 3,372              | 1,38     | 0,196           | -2,777                              | 12,067  |             |
| Site9 Segment 34  | 0,889              | 2,182              | 0,41     | 0,691           | -3,912                              | 5,691   |             |
| Site10 Segment 6  | 3,093              | 3,190              | 0,97     | 0,353           | -3,927                              | 10,113  |             |
| Site11 Segment 17 | 9,974              | 3,907              | 2,55     | 0,027           | 1,375                               | 18,573  | **          |
| Site12 Segment 8  | 3,269              | 0,225              | 14,50    | 0,000           | 2,773                               | 3,765   | ***         |
| Site12 Segment 9  | 2,613              | 1,458              | 1,79     | 0,101           | -0,597                              | 5,823   |             |
| Site12 Segment 10 | 7,149              | 0,694              | 10,30    | 0,000           | 5,622                               | 8,677   | ***         |
| Constante         | 3,938              | 3,700              | 1,06     | 0,310           | -4,206                              | 12,082  |             |

\*\*\*  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$

## Annexe 2a

Modèle statistique de présence ou d'absence de renouée du Japon à la rivière Etchemin (Québec, Canada) et comprenant la moitié des données de différence d'élévation (5 962 sur 11 952) sélectionnées aléatoirement (test A).

| <i>Variable</i>                                  | <i>Coefficient</i> | <i>Erreur type</i> | <i>t</i>                             | <i>P &gt; t</i> | <i>Intervalle de confiance 95 %</i> |         | <i>Sig.</i> |     |
|--------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------|-------------|-----|
| <b>Renouée du Japon</b>                          | -2,735             | 1,260              | -2,17                                | 0,053           | -5,508                              | 0,039   | *           |     |
| <b>Distance de la rivière</b>                    | -0,333             | 0,224              | -1,49                                | 0,165           | -0,825                              | 0,160   |             |     |
| <b>Morphologie de la berge (vs linéaire)</b>     | Convexe            | -4,342             | 3,999                                | -1,09           | 0,301                               | -13,144 | 4,460       |     |
|                                                  | Concave            | 0,526              | 2,393                                | 0,22            | 0,830                               | -4,741  | 5,793       |     |
|                                                  | Îlot               | -10,662            | 2,549                                | -4,18           | 0,002                               | -16,272 | -5,051      | *** |
| <b>Classe texturale de sol (vs loam sableux)</b> | Sable loameux      | 3,400              | 3,432                                | 0,99            | 0,343                               | -4,154  | 10,954      |     |
|                                                  | Loam               | 5,062              | 2,720                                | 1,86            | 0,090                               | -0,924  | 11,047      | *   |
| <b>Pente</b>                                     |                    | -15,983            | 7,545                                | -2,12           | 0,058                               | -32,589 | 0,623       | *   |
|                                                  | Site1 Segment 2    | 4,414              | 2,524                                | 1,75            | 0,108                               | -1,142  | 9,970       |     |
|                                                  | Site1 Segment 1    | 0,890              | 4,227                                | 0,21            | 0,837                               | -8,414  | 10,194      |     |
|                                                  | Site1 Segment 4    | -2,273             | 3,597                                | -0,63           | 0,540                               | -10,189 | 5,644       |     |
|                                                  | Site3 Segment 22   | -3,210             | 3,920                                | -0,82           | 0,430                               | -11,838 | 5,418       |     |
|                                                  | Site3 Segment 24   | -7,439             | 4,052                                | -1,84           | 0,094                               | -16,357 | 1,479       | *   |
|                                                  | Site3 Segment 25   | 3,914              | 2,090                                | 1,87            | 0,088                               | -0,685  | 8,513       | *   |
|                                                  | Site4 Segment 38   | -17,467            | 2,747                                | -6,36           | 0,000                               | -23,514 | -11,421     | *** |
|                                                  | Site5 Segment 12   | 4,647              | 2,013                                | 2,31            | 0,041                               | 0,216   | 9,077       | **  |
|                                                  | Site5 Segment 13   | 1,776              | 2,189                                | 0,81            | 0,434                               | -3,043  | 6,595       |     |
|                                                  | Site6 Segment 20   | -1,994             | 2,298                                | -0,87           | 0,404                               | -7,051  | 3,063       |     |
|                                                  | Site6 Segment 26   | -5,408             | 3,780                                | -1,43           | 0,180                               | -13,728 | 2,911       |     |
|                                                  | Site6 Segment 27   | -3,059             | 2,124                                | -1,44           | 0,178                               | -7,734  | 1,617       |     |
|                                                  | Site7 Segment 14   | 1,235              | 0,668                                | 1,85            | 0,092                               | -0,236  | 2,706       | *   |
|                                                  | Site7 Segment 19   | 9,429              | 3,365                                | 2,80            | 0,017                               | 2,023   | 16,834      | **  |
|                                                  | Site8 Segment 32   | 0,630              | 3,859                                | 0,16            | 0,873                               | -7,864  | 9,123       |     |
|                                                  | Site8 Segment 31   | 5,822              | 2,224                                | 2,62            | 0,024                               | 0,927   | 10,717      | **  |
|                                                  | Site8 Segment 40   | 5,258              | 2,238                                | 2,35            | 0,039                               | 0,332   | 10,183      | **  |
|                                                  | Site8 Segment 37   | 1,919              | 2,154                                | 0,89            | 0,392                               | -2,822  | 6,661       |     |
|                                                  | Site8 Segment 30   | -2,485             | 3,248                                | -0,77           | 0,460                               | -9,633  | 4,664       |     |
|                                                  | Site8 Segment 29   | 1,384              | 2,082                                | 0,67            | 0,520                               | -3,199  | 5,968       |     |
|                                                  | Site8 Segment 28   | -0,433             | 2,248                                | -0,19           | 0,851                               | -5,381  | 4,515       |     |
|                                                  | Site9 Segment 35   | 4,790              | 3,415                                | 1,40            | 0,188                               | -2,726  | 12,306      |     |
|                                                  | Site9 Segment 34   | 0,847              | 2,350                                | 0,36            | 0,725                               | -4,326  | 6,019       |     |
|                                                  | Site10 Segment 6   | 3,780              | 3,183                                | 1,19            | 0,260                               | -3,226  | 10,787      |     |
|                                                  | Site11 Segment 17  | 10,574             | 4,088                                | 2,59            | 0,025                               | 1,577   | 19,571      | **  |
|                                                  | Site12 Segment 8   | 4,230              | 0,168                                | 25,22           | 0,000                               | 3,861   | 4,599       | *** |
|                                                  | Site12 Segment 9   | 2,282              | 1,517                                | 1,50            | 0,161                               | -1,056  | 5,621       |     |
|                                                  | Site12 Segment 10  | 7,227              | 0,582                                | 12,41           | 0,000                               | 5,945   | 8,509       | *** |
|                                                  | Constante          | 4,004              | 3,658                                | 1,09            | 0,297                               | -4,048  | 12,056      |     |
| Moyenne de la variable dépendante                |                    | -2,725             | Écart-type de la variable dépendante |                 | 10,486                              |         |             |     |
| R <sup>2</sup>                                   |                    | 0,251              | Nombre d'observations                |                 | 5 962                               |         |             |     |
| F-test                                           |                    |                    | Prob. > F                            |                 |                                     |         |             |     |
| Critère d'information d'Akaike (AIC)             |                    | 43236,121          | Critère d'information bayésien (BIC) |                 | 43289,666                           |         |             |     |

\*\*\*  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$

## Annexe 2b

Modèle statistique de présence ou d'absence de renouée du Japon à la rivière Etchemin (Québec, Canada) et comprenant la moitié des données de différence d'élévation (5 962 sur 11 952) sélectionnées aléatoirement (test B).

| <i>Variable</i>                                  | <i>Coefficient</i> | <i>Erreur type</i> | <i>t</i> | <i>P &gt; t</i>                      | <i>Intervalle de confiance 95 %</i> |           | <i>Sig.</i> |     |
|--------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-------------|-----|
| <b>Renouée du Japon</b>                          | -2,874             | 1,262              | -2,28    | 0,044                                | -5,650                              | -0,097    | **          |     |
| <b>Distance de la rivière</b>                    | -0,335             | 0,215              | -1,56    | 0,147                                | -0,808                              | 0,138     |             |     |
| <b>Morphologie de la berge (vs linéaire)</b>     | Convexe            | -3,800             | 4,091    | -0,93                                | 0,373                               | -12,804   | 5,205       |     |
|                                                  | Concave            | 0,491              | 2,614    | 0,19                                 | 0,854                               | -5,262    | 6,244       |     |
|                                                  | Îlot               | -9,495             | 2,873    | -3,30                                | 0,007                               | -15,819   | -3,170      | *** |
| <b>Classe texturale de sol (vs loam sableux)</b> | Sable loameux      | 3,202              | 3,272    | 0,98                                 | 0,349                               | -3,999    | 10,403      |     |
|                                                  | Loam               | 5,021              | 2,902    | 1,73                                 | 0,111                               | -1,366    | 11,407      |     |
| <b>Pente</b>                                     | -16,063            | 7,490              | -2,15    | 0,055                                | -32,548                             | 0,421     | *           |     |
| Site1 Segment 2                                  | 4,189              | 2,836              | 1,48     | 0,168                                | -2,052                              | 10,430    |             |     |
| Site1 Segment 1                                  | 1,020              | 4,275              | 0,24     | 0,816                                | -8,388                              | 10,428    |             |     |
| Site1 Segment 4                                  | -2,376             | 3,762              | -0,63    | 0,541                                | -10,657                             | 5,905     |             |     |
| Site3 Segment 22                                 | -1,919             | 3,912              | -0,49    | 0,633                                | -10,528                             | 6,691     |             |     |
| Site3 Segment 24                                 | -7,484             | 3,961              | -1,89    | 0,085                                | -16,202                             | 1,234     | *           |     |
| Site3 Segment 25                                 | 4,199              | 2,205              | 1,91     | 0,083                                | -0,653                              | 9,052     | *           |     |
| Site4 Segment 38                                 | -24,325            | 2,376              | -10,24   | 0,000                                | -29,553                             | -19,096   | ***         |     |
| Site5 Segment 12                                 | 4,220              | 1,774              | 2,38     | 0,037                                | 0,315                               | 8,125     | **          |     |
| Site5 Segment 13                                 | 2,184              | 1,951              | 1,12     | 0,287                                | -2,110                              | 6,478     |             |     |
| Site6 Segment 20                                 | -0,681             | 2,508              | -0,27    | 0,791                                | -6,202                              | 4,839     |             |     |
| Site6 Segment 26                                 | -4,527             | 3,713              | -1,22    | 0,248                                | -12,699                             | 3,645     |             |     |
| Site6 Segment 27                                 | -4,024             | 2,275              | -1,77    | 0,105                                | -9,031                              | 0,984     |             |     |
| Site7 Segment 14                                 | 0,771              | 0,494              | 1,56     | 0,147                                | -0,316                              | 1,858     |             |     |
| Site7 Segment 19                                 | 9,257              | 3,405              | 2,72     | 0,020                                | 1,764                               | 16,751    | **          |     |
| Site8 Segment 32                                 | 0,923              | 3,758              | 0,25     | 0,811                                | -7,348                              | 9,193     |             |     |
| Site8 Segment 31                                 | 5,810              | 2,303              | 2,52     | 0,028                                | 0,741                               | 10,879    | **          |     |
| Site8 Segment 40                                 | 5,286              | 2,298              | 2,30     | 0,042                                | 0,227                               | 10,344    | **          |     |
| Site8 Segment 37                                 | 2,029              | 2,303              | 0,88     | 0,397                                | -3,040                              | 7,097     |             |     |
| Site8 Segment 30                                 | -2,569             | 3,416              | -0,75    | 0,468                                | -10,086                             | 4,949     |             |     |
| Site8 Segment 29                                 | 1,698              | 2,209              | 0,77     | 0,458                                | -3,164                              | 6,560     |             |     |
| Site8 Segment 28                                 | 0,343              | 2,430              | 0,14     | 0,890                                | -5,005                              | 5,691     |             |     |
| Site9 Segment 35                                 | 4,498              | 3,342              | 1,35     | 0,205                                | -2,859                              | 11,854    |             |     |
| Site9 Segment 34                                 | 0,942              | 2,041              | 0,46     | 0,653                                | -3,550                              | 5,435     |             |     |
| Site10 Segment 6                                 | 2,435              | 3,233              | 0,75     | 0,467                                | -4,680                              | 9,550     |             |     |
| Site11 Segment 17                                | 9,282              | 3,744              | 2,48     | 0,031                                | 1,041                               | 17,524    | **          |     |
| Site12 Segment 8                                 | 2,329              | 0,285              | 8,18     | 0,000                                | 1,702                               | 2,956     | ***         |     |
| Site12 Segment 9                                 | 3,035              | 1,452              | 2,09     | 0,061                                | -0,161                              | 6,232     | *           |     |
| Site12 Segment 10                                | 7,195              | 0,836              | 8,61     | 0,000                                | 5,355                               | 9,035     | ***         |     |
| Constante                                        | 3,898              | 3,785              | 1,03     | 0,325                                | -4,432                              | 12,229    |             |     |
| Moyenne de la variable dépendante                |                    | -2,969             |          | Écart-type de la variable dépendante |                                     | 11,004    |             |     |
| R <sup>2</sup>                                   |                    | 0,250              |          | Nombre d'observations                |                                     | 5990      |             |     |
| F-test                                           |                    |                    |          | Prob. > F                            |                                     | 0         |             |     |
| Critère d'information d'Akaike (AIC)             |                    | 44021,466          |          | Critère d'information bayésien (BIC) |                                     | 33075,049 |             |     |

\*\*\*  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$

## Annexe 3

Effets fixes de localisation pris en compte dans le modèle statistique 2 de densité des tiges de renouée du Japon à la rivière Etchemin (Québec, Canada) : segments de trois transects par sites. Pour chaque site, les données de changement d'élévation des segments sont comparées à celles du segment ayant le plus grand nombre d'observations (non indiqué dans le tableau).

| <i>Variable</i>   | <i>Coefficient</i> | <i>Erreur type</i> | <i>t</i> | <i>P &gt; t</i> | <i>Intervalle de confiance 95 %</i> |         | <i>Sig.</i> |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------|-----------------|-------------------------------------|---------|-------------|
| Site1 Segment 2   | 3,169              | 2,586              | 1,23     | 0,246           | -2,524                              | 8,861   |             |
| Site1 Segment 1   | 0,332              | 4,166              | 0,08     | 0,938           | -8,839                              | 9,502   |             |
| Site1 Segment 4   | -1,883             | 3,776              | -0,50    | 0,628           | -10,194                             | 6,428   |             |
| Site3 Segment 22  | -2,886             | 3,694              | -0,78    | 0,451           | -11,015                             | 5,244   |             |
| Site3 Segment 24  | -7,855             | 3,803              | -2,07    | 0,063           | -16,226                             | 0,515   | *           |
| Site3 Segment 25  | 3,157              | 2,097              | 1,50     | 0,160           | -1,459                              | 7,773   |             |
| Site4 Segment 38  | -20,716            | 2,346              | -8,83    | 0,000           | -25,880                             | -15,553 | ***         |
| Site5 Segment 12  | 3,725              | 2,005              | 1,86     | 0,090           | -0,689                              | 8,139   | *           |
| Site5 Segment 13  | 1,744              | 2,095              | 0,83     | 0,423           | -2,867                              | 6,354   |             |
| Site6 Segment 20  | -1,075             | 2,249              | -0,48    | 0,642           | -6,026                              | 3,875   |             |
| Site6 Segment 26  | -5,426             | 3,435              | -1,58    | 0,142           | -12,986                             | 2,134   |             |
| Site6 Segment 27  | -4,337             | 2,199              | -1,97    | 0,074           | -9,178                              | 0,504   | *           |
| Site7 Segment 14  | 0,861              | 0,651              | 1,32     | 0,213           | -0,571                              | 2,293   |             |
| Site7 Segment 19  | 8,353              | 3,349              | 2,49     | 0,030           | 0,982                               | 15,723  | **          |
| Site8 Segment 32  | 0,508              | 3,555              | 0,14     | 0,889           | -7,315                              | 8,332   |             |
| Site8 Segment 31  | 5,077              | 2,256              | 2,25     | 0,046           | 0,112                               | 10,042  | **          |
| Site8 Segment 40  | 4,436              | 2,230              | 1,99     | 0,072           | -0,471                              | 9,344   | *           |
| Site8 Segment 37  | 1,140              | 2,216              | 0,51     | 0,617           | -3,738                              | 6,017   |             |
| Site8 Segment 30  | -3,053             | 3,291              | -0,93    | 0,373           | -10,296                             | 4,190   |             |
| Site8 Segment 29  | 0,621              | 2,090              | 0,30     | 0,772           | -3,978                              | 5,220   |             |
| Site8 Segment 28  | -0,816             | 2,356              | -0,35    | 0,736           | -6,001                              | 4,369   |             |
| Site9 Segment 35  | 4,076              | 3,475              | 1,17     | 0,266           | -3,573                              | 11,725  |             |
| Site9 Segment 34  | 0,793              | 2,007              | 0,40     | 0,700           | -3,624                              | 5,211   |             |
| Site10 Segment 6  | 2,191              | 3,084              | 0,71     | 0,492           | -4,597                              | 8,979   |             |
| Site11 Segment 17 | 9,832              | 4,072              | 2,42     | 0,034           | 0,870                               | 18,794  | **          |
| Site12 Segment 8  | 3,667              | 0,287              | 12,77    | 0,000           | 3,035                               | 4,299   | ***         |
| Site12 Segment 9  | 2,686              | 1,482              | 1,81     | 0,097           | -0,576                              | 5,948   | *           |
| Site12 Segment 10 | 7,084              | 0,668              | 10,60    | 0,000           | 5,614                               | 8,555   | ***         |
| Constante         | 5,171              | 3,563              | 1,45     | 0,175           | -2,672                              | 13,013  |             |

\*\*\*  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$

## Annexe 4a

Modèle statistique de densité de tiges de renouée du Japon à la rivière Etchemin (Québec, Canada) et comprenant la moitié des données de différence d'élévation (5 962 sur 11 952) sélectionnées aléatoirement (test A).

| Variable                                                     |                   | Coefficient | Erreur<br>r type | t                                              | P > t | Intervalle de<br>confiance 95 % |         | Sig. |
|--------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|------------------|------------------------------------------------|-------|---------------------------------|---------|------|
| <b>Densité des tiges</b>                                     |                   | -0,065      | 0,020            | -3,29                                          | 0,007 | -0,109                          | -0,022  | ***  |
| <b>Distance de la rivière</b>                                |                   | -0,420      | 0,198            | -2,12                                          | 0,058 | -0,857                          | 0,017   | *    |
| <b>Morphologie<br/>de la berge<br/>(vs linéaire)</b>         | Convexe           | -4,689      | 4,090            | -1,15                                          | 0,276 | -13,691                         | 4,313   |      |
|                                                              | Concave           | -0,481      | 2,437            | -0,20                                          | 0,847 | -5,844                          | 4,883   |      |
|                                                              | Îlot              | -11,531     | 2,258            | -5,11                                          | 0,000 | -16,502                         | -6,561  | ***  |
| <b>Classe<br/>texturale de<br/>sol (vs loam<br/>sableux)</b> | Sable loameux     | 2,865       | 3,235            | 0,89                                           | 0,395 | -4,256                          | 9,986   |      |
|                                                              | Loam              | 4,667       | 2,761            | 1,69                                           | 0,119 | -1,410                          | 10,744  |      |
| <b>Pente</b>                                                 |                   | -15,890     | 7,647            | -2,08                                          | 0,062 | -32,721                         | 0,940   | *    |
|                                                              | Site1 Segment 2   | 3,299       | 2,424            | 1,36                                           | 0,201 | -2,035                          | 8,634   |      |
|                                                              | Site1 Segment 1   | 0,336       | 4,141            | 0,08                                           | 0,937 | -8,780                          | 9,451   |      |
|                                                              | Site1 Segment 4   | -1,591      | 3,686            | -0,43                                          | 0,674 | -9,704                          | 6,523   |      |
|                                                              | Site3 Segment 22  | -3,495      | 3,671            | -0,95                                          | 0,362 | -11,575                         | 4,585   |      |
|                                                              | Site3 Segment 24  | -7,781      | 3,835            | -2,03                                          | 0,067 | -16,222                         | 0,661   | *    |
|                                                              | Site3 Segment 25  | 3,039       | 2,039            | 1,49                                           | 0,164 | -1,449                          | 7,527   |      |
|                                                              | Site4 Segment 38  | -17,524     | 2,557            | -6,85                                          | 0,000 | -23,152                         | -11,896 | ***  |
|                                                              | Site5 Segment 12  | 3,951       | 2,169            | 1,82                                           | 0,096 | -0,822                          | 8,724   | *    |
|                                                              | Site5 Segment 13  | 1,619       | 2,198            | 0,74                                           | 0,477 | -3,219                          | 6,458   |      |
|                                                              | Site6 Segment 20  | -1,487      | 2,126            | -0,70                                          | 0,499 | -6,167                          | 3,192   |      |
|                                                              | Site6 Segment 26  | -5,799      | 3,456            | -1,68                                          | 0,122 | -13,405                         | 1,807   |      |
|                                                              | Site6 Segment 27  | -3,805      | 2,116            | -1,80                                          | 0,100 | -8,462                          | 0,851   |      |
|                                                              | Site7 Segment 14  | 1,104       | 0,762            | 1,45                                           | 0,175 | -0,572                          | 2,780   |      |
|                                                              | Site7 Segment 19  | 8,447       | 3,371            | 2,51                                           | 0,029 | 1,029                           | 15,866  | **   |
|                                                              | Site8 Segment 32  | 0,410       | 3,596            | 0,11                                           | 0,911 | -7,504                          | 8,324   |      |
|                                                              | Site8 Segment 31  | 5,122       | 2,224            | 2,30                                           | 0,042 | 0,227                           | 10,017  | **   |
|                                                              | Site8 Segment 40  | 4,447       | 2,214            | 2,01                                           | 0,070 | -0,427                          | 9,321   | *    |
|                                                              | Site8 Segment 37  | 1,136       | 2,135            | 0,53                                           | 0,605 | -3,563                          | 5,835   |      |
|                                                              | Site8 Segment 30  | -2,941      | 3,263            | -0,90                                          | 0,387 | -10,123                         | 4,241   |      |
|                                                              | Site8 Segment 29  | 0,494       | 2,026            | 0,24                                           | 0,812 | -3,964                          | 4,953   |      |
|                                                              | Site8 Segment 28  | -1,164      | 2,251            | -0,52                                          | 0,615 | -6,119                          | 3,791   |      |
|                                                              | Site9 Segment 35  | 4,201       | 3,554            | 1,18                                           | 0,262 | -3,621                          | 12,023  |      |
|                                                              | Site9 Segment 34  | 0,745       | 2,161            | 0,34                                           | 0,737 | -4,012                          | 5,501   |      |
|                                                              | Site10 Segment 6  | 2,926       | 3,132            | 0,93                                           | 0,370 | -3,968                          | 9,819   |      |
|                                                              | Site11 Segment 17 | 10,086      | 4,298            | 2,35                                           | 0,039 | 0,626                           | 19,547  | **   |
|                                                              | Site12 Segment 8  | 4,561       | 0,224            | 20,38                                          | 0,000 | 4,068                           | 5,053   | ***  |
|                                                              | Site12 Segment 9  | 2,420       | 1,572            | 1,54                                           | 0,152 | -1,040                          | 5,880   |      |
|                                                              | Site12 Segment 10 | 7,175       | 0,571            | 12,57                                          | 0,000 | 5,919                           | 8,431   | ***  |
|                                                              | Constante         | 5,171       | 3,502            | 1,48                                           | 0,168 | -2,537                          | 12,879  |      |
| Moyenne de la variable dépendante                            |                   |             | -2,725           | Écart-type de la variable dépendante<br>10,486 |       |                                 |         |      |
| R <sup>2</sup>                                               |                   |             | 0,267            | Nombre d'observations                          |       | 5962                            |         |      |
| F-test                                                       |                   |             |                  | Prob. > F                                      |       |                                 |         |      |
| Critère<br>(AIC)                                             | d'information     | d'Akaike    | 43102,857        | Critère d'information<br>bayésien (BIC)        |       | 43156,4<br>02                   |         |      |

\*\*\*  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$

## Annexe 4b

Modèle statistique de densité de tiges de renouée du Japon à la rivière Etchemin (Québec, Canada) et comprenant la moitié des données de différence d'élévation (5 962 sur 11 952) sélectionnées aléatoirement (test B).

| <i>Variable</i>                                  | <i>Coefficient</i> | <i>Erreur type</i> | <i>t</i>                             | <i>P &gt; t</i> | <i>Intervalle de confiance 95 %</i> |         | <i>Sig.</i> |     |
|--------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------|-------------|-----|
| <b>Densité des tiges</b>                         | -0,069             | 0,019              | -3,73                                | 0,003           | -0,110                              | -0,028  | ***         |     |
| <b>Distance de la rivière</b>                    | -0,425             | 0,196              | -2,17                                | 0,052           | -0,856                              | 0,005   | *           |     |
| <b>Morphologie de la berge (vs linéaire)</b>     | Convexe            | -4,262             | 4,132                                | -1,03           | 0,325                               | -13,356 | 4,833       |     |
|                                                  | Concave            | -0,634             | 2,638                                | -0,24           | 0,815                               | -6,441  | 5,173       |     |
|                                                  | Îlot               | -10,330            | 2,627                                | -3,93           | 0,002                               | -16,111 | -4,549      | *** |
| <b>Classe texturale de sol (vs loam sableux)</b> | Sable loameux      | 2,696              | 3,088                                | 0,87            | 0,401                               | -4,101  | 9,494       |     |
|                                                  | Loam               | 4,668              | 2,830                                | 1,65            | 0,127                               | -1,562  | 10,898      |     |
| <b>Pente</b>                                     | -16,180            | 7,467              | -2,17                                | 0,053           | -32,615                             | 0,254   | *           |     |
|                                                  | Site1 Segment 2    | 2,993              | 2,753                                | 1,09            | 0,300                               | -3,066  | 9,051       |     |
|                                                  | Site1 Segment 1    | 0,323              | 4,198                                | 0,08            | 0,940                               | -8,916  | 9,563       |     |
|                                                  | Site1 Segment 4    | -2,179             | 3,848                                | -0,57           | 0,583                               | -10,647 | 6,290       |     |
|                                                  | Site3 Segment 22   | -2,335             | 3,710                                | -0,63           | 0,542                               | -10,501 | 5,831       |     |
|                                                  | Site3 Segment 24   | -7,905             | 3,774                                | -2,10           | 0,060                               | -16,212 | 0,401       | *   |
|                                                  | Site3 Segment 25   | 3,280              | 2,158                                | 1,52            | 0,157                               | -1,469  | 8,029       |     |
|                                                  | Site4 Segment 38   | -24,303            | 2,170                                | -               | 0,000                               | -29,079 | -19,526     | *** |
|                                                  | Site5 Segment 12   | 3,458              | 1,852                                | 1,87            | 0,089                               | -0,617  | 7,534       | *   |
|                                                  | Site5 Segment 13   | 1,906              | 2,050                                | 0,93            | 0,372                               | -2,606  | 6,418       |     |
|                                                  | Site6 Segment 20   | -0,733             | 2,393                                | -0,31           | 0,765                               | -5,999  | 4,534       |     |
|                                                  | Site6 Segment 26   | -4,991             | 3,421                                | -1,46           | 0,172                               | -12,520 | 2,538       |     |
|                                                  | Site6 Segment 27   | -4,840             | 2,276                                | -2,13           | 0,057                               | -9,849  | 0,169       | *   |
|                                                  | Site7 Segment 14   | 0,634              | 0,561                                | 1,13            | 0,283                               | -0,601  | 1,868       |     |
|                                                  | Site7 Segment 19   | 8,253              | 3,333                                | 2,48            | 0,031                               | 0,916   | 15,589      | **  |
|                                                  | Site8 Segment 32   | 0,613              | 3,515                                | 0,17            | 0,865                               | -7,123  | 8,348       |     |
|                                                  | Site8 Segment 31   | 5,018              | 2,275                                | 2,21            | 0,050                               | 0,010   | 10,026      | *   |
|                                                  | Site8 Segment 40   | 4,435              | 2,246                                | 1,97            | 0,074                               | -0,509  | 9,379       | *   |
|                                                  | Site8 Segment 37   | 1,141              | 2,292                                | 0,50            | 0,628                               | -3,904  | 6,186       |     |
|                                                  | Site8 Segment 30   | -3,173             | 3,307                                | -0,96           | 0,358                               | -10,450 | 4,105       |     |
|                                                  | Site8 Segment 29   | 0,768              | 2,164                                | 0,35            | 0,729                               | -3,994  | 5,530       |     |
|                                                  | Site8 Segment 28   | -0,480             | 2,459                                | -0,20           | 0,849                               | -5,892  | 4,932       |     |
|                                                  | Site9 Segment 35   | 3,952              | 3,409                                | 1,16            | 0,271                               | -3,551  | 11,456      |     |
|                                                  | Site10 Segment 34  | 0,850              | 1,883                                | 0,45            | 0,660                               | -3,294  | 4,994       |     |
|                                                  | Site10 Segment 6   | 1,490              | 3,062                                | 0,49            | 0,636                               | -5,250  | 8,230       |     |
|                                                  | Site11 Segment 17  | 9,568              | 3,857                                | 2,48            | 0,031                               | 1,078   | 18,059      | **  |
|                                                  | Site12 Segment 8   | 2,819              | 0,353                                | 7,98            | 0,000                               | 2,041   | 3,597       | *** |
|                                                  | Site12 Segment 9   | 3,049              | 1,441                                | 2,12            | 0,058                               | -0,122  | 6,221       | *   |
|                                                  | Site12 Segment 10  | 7,133              | 0,795                                | 8,98            | 0,000                               | 5,384   | 8,882       | *** |
|                                                  | Constante          | 5,196              | 3,672                                | 1,42            | 0,185                               | -2,887  | 13,278      |     |
| Moyenne de la variable dépendante                |                    | -2,969             | Écart-type de la variable dépendante |                 | 11,004                              |         |             |     |
| R <sup>2</sup>                                   |                    | 0,267              | Nombre d'observations                |                 | 5990                                |         |             |     |
| F-test                                           |                    |                    | Prob. > F                            |                 |                                     |         |             |     |
| Critère d'information d'Akaike (AIC)             |                    | 43882,415          | Critère d'information bayésien (BIC) |                 | 43935,998                           |         |             |     |

\*\*\*  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,1$