

L'espace de mobilité des rivières du sud du Québec : implications pour les écosystèmes et la gestion des rivières dans une perspective de changements climatiques

Guénoé Choné

Mémoire

présenté

au

Département de Géographie, Urbanisme et Environnement

Comme exigence partielle au grade de

Maîtrise ès Science (Géographie, Urbanisme et Environnement)

Université Concordia

Montréal, Québec, Canada

Mai 2013

© Guénoé Choné, 2013

UNIVERSITÉ CONCORDIA
École des études supérieures

Nous certifions par les présentes que le mémoire rédigé

par Guéno­lé Choné

intitulé L'espace de mobilité des rivières du sud du Québec : implications pour les écosystèmes et la gestion des rivières dans une perspective de changements climatiques

et déposé à titre d'exigence partielle en vue de l'obtention du grade de

Maîtrise ès Science (Géographie, Urbanisme et Environnement)

est conforme aux règlements de l'Université et satisfait aux normes établies pour ce qui est de l'originalité et de la qualité.

Signé par les membres du Comité de soutenance

Dr. Damon Matthews _____ président

Dr. Michel Lapointe _____ examinateur

Dr. Thomas Buffin-Bélanger _____ examinateur

Dr. Pascale Biron _____ directrice

Approuvé par

Dr. Damon Matthews
Directeur des études supérieures
Département de Géographie, Urbanisme et Environnement

Dr. Brian Lewis
Doyen de la Faculté des Arts et des Sciences

Mai 2013

Abstract

The mobility space of rivers in southern Quebec: implications for river management and habitats within the context of climate change.

Guénoé Chon  

River channel mobility through bank erosion is currently recognized as a natural geomorphological agent that plays an important role in maintaining ecosystems. However, anthropic riparian land use often leads to modifications that limit river mobility. Thus, this study aims to:

- 1) determine the past mobility and map the future mobility of three rivers in southern Quebec (Yamaska Sud-Est, de La Roche and Matane rivers);
- 2) assess the potential impacts of discharge increases due to climate change on the mobility of the rivers; and
- 3) investigate links between channel mobility and the presence of related habitats for the Yamaska Sud-Est river.

The analysis of the geomorphology and past behavior of the rivers led to the determination of two mobility spaces: the corridor of mobility, which is the long-term fluvial territory required by a river to maintain its physical and biological integrity, and

the area of mobility hazard, which is the territory potentially claimed by a river in the next 50 years. A hydrological and erosional model (RVR Meander) was used to predict the impact of a discharge increase. It revealed that the corridor of mobility is not likely to change in the next 50 years, although an increase in the mobility hazard is possible. Finally, the identification of links between mobility and mapped habitats (sediment bars, oxbow lakes and log jams) along the Yamaska Sud-Est river displayed the importance of specific mobility patterns in the creation of these habitats, and provided insight on the potential ecological impacts of anthropological channel stabilization.

Résumé

L'espace de mobilité des rivières du sud du Québec : implications pour les écosystèmes et la gestion des rivières dans une perspective de changements climatiques.

par Guénoilé Choné

La mobilité du chenal des cours d'eau, par l'érosion des berges, est un processus naturel majeur permettant le maintien d'une diversité d'habitats aquatiques et riverains. Cependant, des interventions humaines limitent souvent cette mobilité. Les objectifs de cette recherche sont :

1) de quantifier et cartographier la mobilité passée et future de trois rivières du sud du Québec (rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane) ;

2) d'évaluer les conséquences d'une augmentation des débits, due aux changements climatiques, sur la mobilité des rivières ;

3) de mettre en évidence les liens entre la mobilité et des habitats spécifiques sur la rivière Yamaska Sud-Est.

L'étude de la mobilité des trois cours d'eau a permis une cartographie de deux espaces de mobilité : les corridors de mobilité, espace nécessaire à long terme au maintien de l'intégrité géomorphologique et écologique des cours d'eau, ainsi que les zones où les aléas liés à la mobilité sont importants à court terme (50 ans). Une modélisation

réalisée avec un modèle d'évolution des cours d'eau (RVR Meander) a montré qu'une augmentation du débit ne viendrait pas augmenter fortement l'étendue du corridor de mobilité, mais pourrait augmenter les risques d'érosion. Finalement, l'identification de trois types d'habitat issus de la mobilité du chenal (bancs de sédiments, bras morts et embâcles de bois) a mis en évidence les processus et les caractéristiques géomorphologiques favorisant ces habitats, et a permis également une évaluation de l'impact des activités humaines sur la mobilité et les habitats qui lui sont reliés.

Remerciement

Merci à André Roy, pour m'avoir fait découvrir la géomorphologie fluviale ;

Merci à Pascale Biron, pour son soutien et ses conseils ;

Merci à toute l'équipe du projet Espace de Liberté, pour leurs apports aux travers les nombreuses discussions et leur collaboration;

Merci aux membres du laboratoire de gestion des cours d'eau de l'Université Concordia, pour leur bonne humeur et pour leur aide ;

Merci aux organismes ayant fourni un soutien financier pour la réalisation de cette recherche et la diffusion de ses résultats : Ouranos, le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie, le Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie et en environnement aquatique, l'Union Géophysique Canadienne, ainsi que l'université Concordia. Merci également à Normand Bergeron et Stephen Dugdale pour leur collaboration à ce projet.

Merci enfin à ceux qui ont partagé ma vie durant ces dernières années : À Geneviève pour son amour, à Jérôme, à Sarah, à François, et à tous mes amis qui ont fait du Québec un « chez moi ».

Table des matières

Liste des figures	x
Liste des tableaux.....	xiii
1 Introduction	1
2 Contexte conceptuel et revue de littérature	3
2.1 Contexte géomorphologique de la mobilité	3
2.2 Facteurs influençant l'érosion	7
2.3 La mobilité : un élément structurant les biotopes aquatique et riverain.....	9
2.3.1 Considérations à l'échelle du bassin versant	9
2.3.2 Importance de la migration et du recouplement des méandres	11
2.3.3 Importance du bois mort	15
2.4 Conséquence de la gestion conventionnelle de la mobilité.....	16
2.4.1 Conséquences environnementales de la stabilisation des berges.....	16
2.4.2 Viabilité et coût de la stabilisation.....	17
2.5 L'approche par corridor de mobilité.....	18
2.5.1 Concept et méthode de détermination.....	18
2.5.2 Intérêts de la gestion par corridor de mobilité	21
2.5.3 Limites à la gestion par corridor de mobilité	24
2.6 Changements climatiques et mobilité	26
3 Contexte et objectifs de recherche.....	28
3.1 Contexte de recherche	28
3.2 Objectifs de recherche.....	29
4 Méthodologie générale	31
4.1 Zone d'étude	31
4.2 Analyse de la mobilité.....	32

4.3	Évaluation de l'impact des changements climatiques sur la mobilité des cours d'eau	36
4.4	Lien entre mobilité et habitats	36
5	Détermination de l'espace de mobilité	38
5.1	Rappel des objectifs et contexte de recherche	38
5.2	Méthodologie	38
5.2.1	Pré-traitement des données	38
5.2.2	Détermination du corridor de mobilité	42
5.2.3	Détermination de l'espace des aléas de mobilité	49
5.2.4	Mesure de la puissance spécifique	55
5.3	Résultats et discussion	56
5.3.1	Détermination du corridor de mobilité	56
5.3.2	Détermination de l'espace des aléas de mobilité	64
5.3.3	Lien entre mobilité et puissance spécifique	72
6	Analyse de sensibilité aux changements climatiques	76
6.1	Rappel des objectifs et contexte de recherche	76
6.2	Méthodologie	76
6.2.1	Description du modèle	78
6.2.2	Sections modélisées et calibration	80
6.3	Résultats et discussion	85
6.3.1	Modélisation 1 – Rivière North-Branch	85
6.3.2	Modélisation 2 – Rivière Matane	88
7	Lien entre mobilité et habitats	91
7.1	Rappel des objectifs et contexte de recherche	91
7.2	Méthodologie	91

7.3	Résultats et discussions	92
7.3.1	Corrélation spatiale entre mobilité et habitats à l'échelle du bassin versant	92
7.3.2	Caractéristiques des zones mobiles.....	95
7.3.3	Lien entre habitats et caractéristiques géomorphologiques des tronçons mobiles	101
7.3.4	Impacts anthropiques	105
8	Conclusion et perspectives de recherche futures.....	111
9	Références	114
	Annexe I – Cartes de situations des rivières étudiées.....	122
	Annexe II - Détail des zones d'études et situation des affluents étudiés sur la Yamaska Sud-Est.....	125

Liste des figures

Figure 2-1 – Zone source, zone de transport et zone de dépôt des sédiments à l'échelle du bassin versant.....	4
Figure 2-2 – Processus de migration des méandres.....	5
Figure 2-3 – Migration typique de méandres observée par positionnement du chenal sur plusieurs années.	6
Figure 2-4 – Processus de recoupement d'un méandre.....	7
Figure 2-5 – Types de rivière selon la charge sédimentaire et la taille des sédiments	10
Figure 2-6 – Éléments typiques de la plaine alluviale.....	11

Figure 2-7 – Exemple de "patch" d'habitats différents le long d'une rivière (A) et composition typique en espèces des arbres de la plaine alluviale selon son âge (B), sur la côte Pacifique.....	13
Figure 2-8 – Rôle de la migration et de l'avulsion dans le « Patch Dynamics Concept »	14
Figure 2-9 – Diversité des habitats en fonction de la fréquence de réquisition de la plaine alluviale par la migration du lit.....	15
Figure 2-10 – Détermination d'un espace de mobilité basée sur l'amplitude des méandres (à gauche) et sur une prévision de l'érosion dans les 50 prochaines années (à droite), pour un même tronçon.....	20
Figure 2-11 – Stratégies de gestion possibles en fonction du degré d'urbanisation et de la puissance de la rivière.....	25
Figure 5-1 – Corridor de mobilité, basé sur l'amplitude maximale des méandres de chaque tronçon homogène	43
Figure 5-2 – Position de l'axe principal des méandres avec prise en compte des positions historiques du chenal.....	47
Figure 5-3 – Tronçons homogènes, axe des méandres et amplitude des méandres sur la rivière de la Roche.	48
Figure 5-4 – Détermination de l'espace de mobilité selon la nature des terrasses pour la rivière de la Roche.	49
Figure 5-5 – Transects et zones d'érosion prévues sur 50 ans sur la rivière North-Branch, avec exemple d'interpolation du taux d'érosion le long d'un transect (graphique encadré).	51
Figure 5-6 – Début de recouplement de méandre sur la rivière de la Roche.	52

Figure 5-7 – Exemple de tronçon à fort dynamisme.....	54
Figure 5-8 – Application de la méthode d’amplitude maximale des méandres en milieu confiné (rivière Matane).	57
Figure 5-9 – Exemple de cartographie des espaces de mobilité (M1 : espace des aléas de mobilité, M2 :corridor de mobilité) et d’inondabilité.....	62
Figure 5-10 – Perturbations anthropiques sur la partie amont de la rivière Yamaska Sud-Est	63
Figure 5-11– Section instable sur la Yamaska Sud-Est et modification manuelle de l’espace des aléas de mobilité.....	66
Figure 5-12 – Mobilité et puissance spécifique sur la rivière Yamaska Sud-Est et le ruisseau de Jackson	75
Figure 6-1 – Modélisation du chenal d’une rivière avec RVR Meander.....	79
Figure 6-2 – Modélisation de la migration de la rivière North-Branch.	86
Figure 6-3 – Résultats des simulations et comparaison avec les positions historiques de la rivière Matane	89
Figure 7-1 – Mobilité et habitats sur le ruisseau de Jackson / Yamaska Sud-Est.....	94
Figure 7-2 – Tronçons homogènes des sections mobiles du ruisseau de Jackson / Yamaska Sud-Est	96
Figure 7-3 – Profil longitudinal du ruisseau de Jackson et de la Yamaska Sud-Est, avec emplacement des tronçons mobile (tronçons numérotés), des principaux confluent et barrages (parties en bleu pointillé : estimation).....	99
Figure 7-4 – Interventions anthropiques visibles au tronçon 5.....	106
Figure 7-5 – La Yamaska Sud-Est au lac Davignon en 1964.	110

Liste des tableaux

Tableau 4-1 – Méthodologies utilisées et implications en termes de risques et d'intégrité	34
Tableau 5-1 – Photographies aériennes utilisées pour la détermination de la mobilité des rivières.....	40
Tableau 5-2 – Critères pour l'identification des tronçons homogènes	44
Tableau 5-3 – Liste des critères utilisés pour la détermination de l'espace des aléas de mobilité	71
Tableau 6-1 – Configuration des modélisations	81
Tableau 6-2 – Débits des rivières à l'extrémité amont des tronçons simulés et débits modélisés.....	83
Tableau 7-1 – Mobilité et habitats, par section (estimation visuelle).....	95
Tableau 7-2 – Caractéristiques géomorphologiques des tronçons mobiles	97
Tableau 7-3 – Habitats dans les tronçons mobiles.....	98
Tableau 7-4 – États des bras morts aux tronçons 7 et 11, en superficie.	108

1 Introduction

Au Québec, l'eau douce est une ressource de premier ordre. Alors qu'elle joue un rôle majeur sur la façon dont est bâtie l'économie de la province, notamment par la production d'hydroélectricité, la valeur des écosystèmes naturels des rivières et des lacs est également de plus en plus reconnue et prise en considération dans nos choix concernant la gestion de cette ressource. Malheureusement, les processus fluviaux sont encore bien souvent mal connus ou pris en compte par les gestionnaires. C'est le cas, en particulier, de la dynamique sédimentaire des cours d'eau et des mécanismes reliés à l'érosion des berges. Alors que les géomorphologues s'intéressent depuis longtemps à l'évolution historique de la position des rivières, celles-ci sont trop souvent vues, dans l'opinion publique tout comme par certains intervenants et gestionnaires du milieu, comme des milieux statiques. L'érosion des berges, pourtant un processus naturel, est alors considérée comme une instabilité, un problème sur lequel il faut intervenir pour empêcher le lit de la rivière de bouger. Il apparaît donc pertinent dans ce contexte de se pencher plus en avant sur l'importance de ce phénomène, sur son rôle environnemental et sur les solutions de gestion qui lui sont reliées et qui sont applicables au Québec. Cela est d'autant plus important qu'avec les changements climatiques à venir, l'érosion des berges pourrait s'amplifier, et les solutions appliquées actuellement, c'est-à-dire bien souvent la stabilisation systématique des berges érodées par des enrochements ou des murs de soutènement, deviendront de moins en moins viables tant économiquement qu'écologiquement. Cette réflexion a été amorcée il y a quelques décennies dans certains

pays avec l'établissement d'espaces de liberté, zones naturelles protégées autour des rivières destinées à redonner l'espace nécessaire à l'ensemble des processus fluviaux. Au Québec, cependant, la mobilité des rivières est toujours trop souvent uniquement considérée comme une nuisance à laquelle il faille à tout prix remédier. Face à ce constat, il est donc nécessaire de cerner plus précisément les avantages possibles de l'implémentation d'un corridor de mobilité protégée pour les rivières du sud du Québec.

2 Contexte conceptuel et revue de littérature

2.1 Contexte géomorphologique de la mobilité

Les rivières sont des agents géomorphiques, c'est-à-dire qu'elles forment et façonnent les paysages en recrutant, transportant et déposant des sédiments tout au long de leur cours. Leur importance en géomorphologie a été établie par les pionniers de cette science, notamment par W.M. Davis en 1902, qui en fait le principal agent responsable de la création des vallées et des plaines à une échelle de temps géologique dans sa fameuse théorie des cycles. Suivant les travaux de Gilbert au début du 20^{ème} siècle, Mackin (1948) poursuit le travail théorique en géomorphologie fluviale avec son concept de rivière à profil d'équilibre ("graded stream"). Selon ce concept, une rivière à profil d'équilibre ne produit ni aggradation ni dégradation (dépôt ou érosion verticale du lit de la rivière) et conserve donc un profil longitudinal fixe, à une échelle de temps inférieure à l'échelle géologique. L'échelle de temps pour laquelle le concept de profil d'équilibre est pertinent est nommée "graded time" par Schumm et Lichty (1965), qui la font correspondre grossièrement aux 1000 dernières années dans le contexte géoclimatique nord-américain. Une rivière à profil d'équilibre ne fait donc que transporter sa charge sédimentaire de l'amont vers l'aval. À l'échelle du bassin versant, les rivières peuvent être modélisées comme à profil d'équilibre sur leur partie centrale, la zone de transport, avec en amont une zone source de sédiments et en aval une zone de dépôt des sédiments (Brierley et Fryirs, 2005), tel qu'illustré à la figure 2-1.

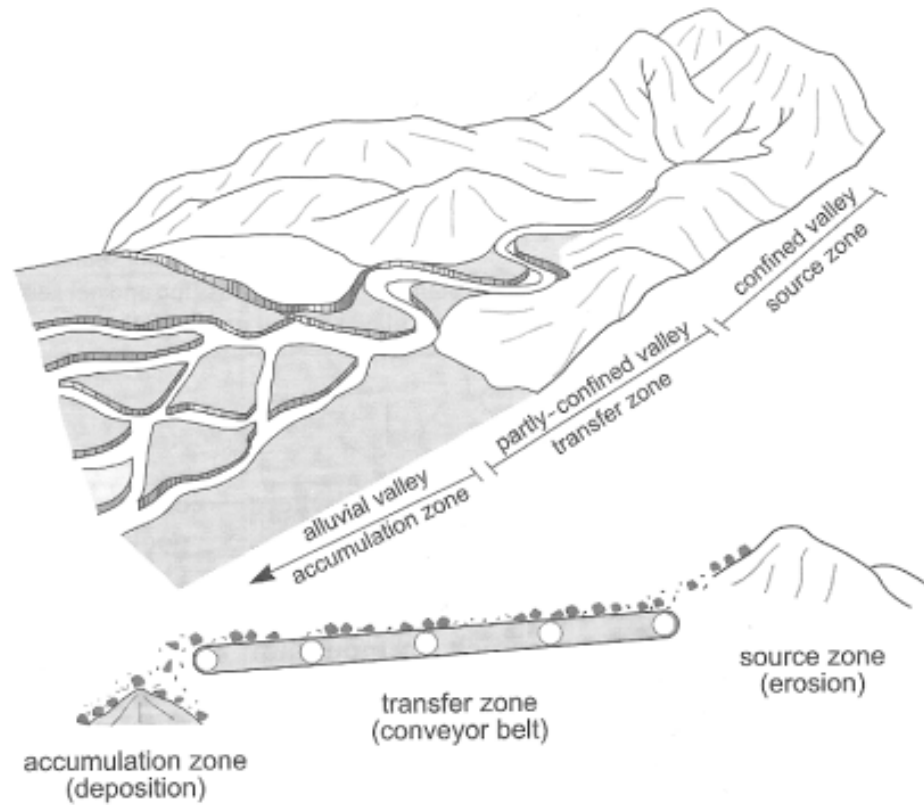


Figure 2-1 – Zone source, zone de transport et zone de dépôt des sédiments à l'échelle du bassin versant.
(Brierley et Fryirs, 2005).

Bien que la zone de transport des rivières soit une portion où le bilan sédimentaire est nul, il ne s'agit cependant pas d'une zone où aucune érosion ne se produit. En effet, les méandres sont à l'origine d'un certain dynamisme fluvial. Dans un méandre, la force centrifuge crée un courant hélicoïdal qui augmente la contrainte de cisaillement de l'eau sur la berge externe et diminue celle sur la berge interne (figure 2-2). Il en résulte une érosion de la berge externe et un dépôt de sédiment sur la berge interne, nommé banc d'accumulation. L'inertie cinétique de l'eau créant une contrainte de cisaillement plus

importante sur la partie aval des méandres que sur la partie amont, et il en résulte une migration progressive des méandres vers l'aval (figure 2-3).

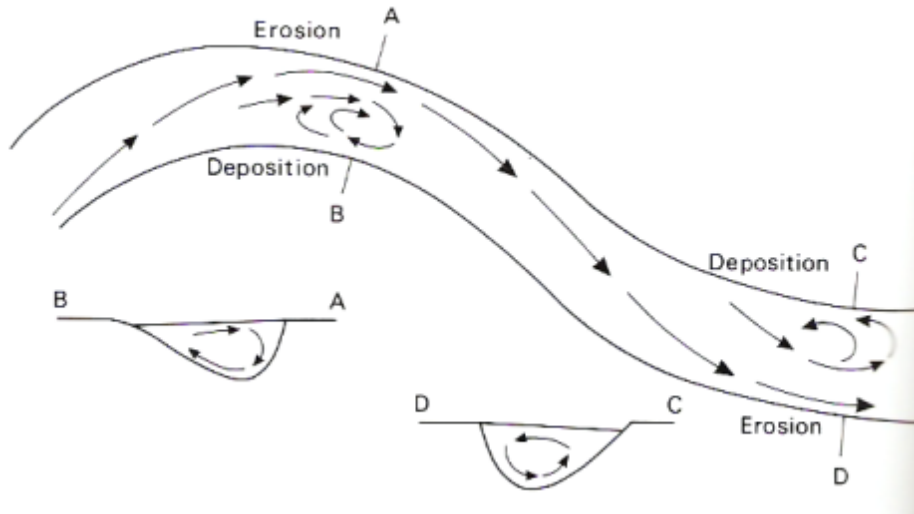


Figure 2-2 – Processus de migration des méandres.

Le courant principal, dans l'axe d'écoulement, est concentré à l'extérieur des méandres (points A et D). Ce courant crée une érosion des sédiments de la berge externe. Le courant secondaire, visible sur les coupes sections transversales A-B et C-D, transporte les sédiments érodés à l'intérieur du méandre (points B et C), où ils se déposent et forment un banc d'accumulation (Summerfield, 1991).

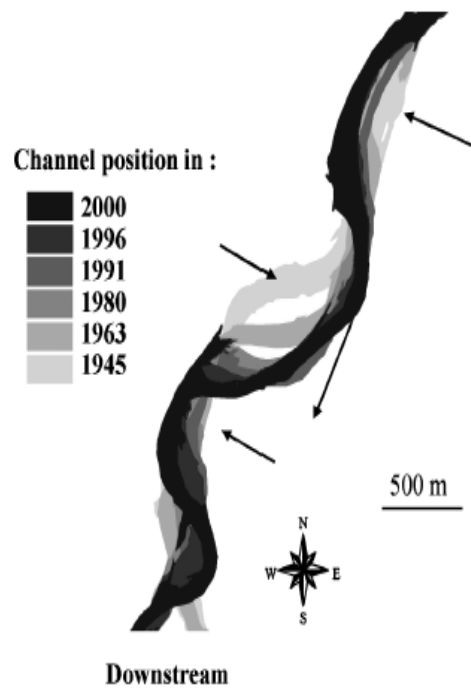


Figure 2-3 – Migration typique de méandres observée par positionnement du chenal sur plusieurs années.

L'érosion et le dépôt des sédiments dans les méandres créent à long terme un déplacement du chenal. L'amplitude des méandres est conservée, alors que ceux-ci migrent vers l'aval (Piégay *et al.*, 2005)

Plutôt que de migrer progressivement, il arrive également qu'une rivière change subitement de place le cours de son lit. Ce phénomène, nommé avulsion, est particulièrement fréquent quand un méandre a migré de manière à rapprocher sa partie amont et sa partie aval. Lors d'une crue, la rivière peut alors effectuer un recoupement du méandre, transformant alors le méandre en bras mort (figure 2-4).

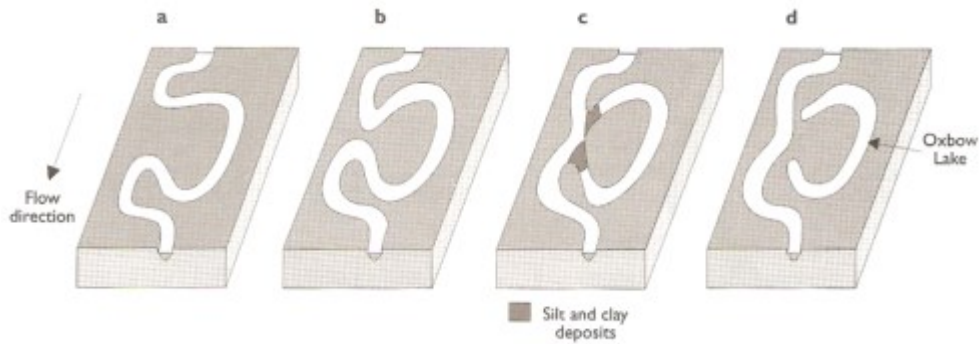


Figure 2-4 – Processus de recouplement d'un méandre.

(Trenhaile, 2010)

Finale­ment, il est également possible dans certains cas d'observer une érosion des berges de rivière qui ne soit pas reliée à la dynamique des méandres. En effet, lorsque la morphologie d'un cours d'eau n'est pas adaptée aux conditions actuelles d'écoulement, l'ajustement de la morphologie du lit peut entraîner une érosion latérale, par exemple par l'élargissement du chenal. Ce type d'ajustement peut se produire à la suite de modifications exogènes au fonctionnement du cours d'eau, qui peuvent être notamment dues à la tectonique, à la modification du niveau des mers, à des changements climatiques, ou bien encore à des perturbations anthropiques (Richards *et al.*, 2002).

2.2 Facteurs influençant l'érosion

De nombreux auteurs ont tenté d'identifier les variables explicatives de la mobilité des rivières. Parmi les variables couramment observées se trouve en particulier la puissance totale (Ω) ou la puissance spécifique (ω). L'utilisation de la puissance spécifique en géomorphologie a été introduite par Bagnold (1966) qui la définit comme suit :

$$\omega = \tau_0 V = \Omega / W$$

$$\text{avec } \Omega = \rho g Q_{bf} S_b$$

où ω est la puissance spécifique (en W/m^2), τ_0 la contrainte de cisaillement (en N/m^2), V la vitesse moyenne du courant (en m/s), Ω la puissance totale (en W/m), ρ la densité de l'eau (en kg/m^3), g l'accélération gravitationnelle (en m/s^2), Q_{bf} le débit plein bord (en m^3/s), S_b la pente du lit et W la largeur plein bord (en m). La puissance d'une rivière est une mesure de sa capacité à transporter des sédiments, donc son pouvoir érosif. Hickin et Nanson (1984) ont ainsi montré que la vitesse de migration des méandres est fonction de la puissance spécifique, de la largeur plein bord, de la taille médiane des sédiments, de la hauteur de la berge et de sa résistance. Une étude postérieure des mêmes auteurs (Nanson et Hickin, 1986) montre par ailleurs que la puissance totale, le débit et la largeur plein bord sont les meilleures variables explicatives de la migration des méandres. Dans un contexte similaire, Walker et Rutherford (1999) ont déterminé 4 méthodes pour estimer la migration des méandres à partir d'une synthèse de la littérature sur le sujet, dont 3 par relations empiriques utilisant comme facteurs la largeur plein bord, le débit plein bord, la puissance totale, la superficie du bassin versant, la pente de la vallée, la hauteur d'eau à plein bord et la résistance des berges (calculée à partir des matériaux constituant la berge). Des considérations sur l'impact de la végétation, ainsi que du ratio entre rayon de courbure et largeur plein bord, sont également abordées par ces auteurs. L'impact de la résistance des berges est également souligné par Rosgen (2001), qui estime l'érosion à partir de deux indices : un premier indice de cohésion des berges basé sur la hauteur de berge, la densité des racines, la profondeur des racines, l'escarpement des berges, ainsi que la surface protégée, pour estimer l'érosion, et un deuxième indice basé sur la vitesse du courant et la contrainte de cisaillement proche des berges. Bartley *et al.* (2008) ont

également modélisé l'érosion des berges en Australie tropicale en fonction de trois paramètres : la puissance totale, le pourcentage de rive végétalisée et la largeur de la plaine alluviale. Ce dernier paramètre est utilisé comme substitut pour les matériaux constituant les berges, basé sur l'hypothèse d'une corrélation entre la largeur de la plaine alluviale et la taille des sédiments constituant les berges.

2.3 La mobilité : un élément structurant les biotopes aquatique et riverain

2.3.1 Considérations à l'échelle du bassin versant

La mobilité des rivières est un processus géomorphologique majeur structurant les milieux physiques et biologiques des rivières ainsi que de la plaine alluviale. À l'échelle du bassin versant, l'apport en sédiments par les parties amont des rivières est un élément fondamental de l'équilibre géomorphologique global des rivières. La structure d'un tronçon de rivière est en effet dépendante de cet apport de sédiments, tel qu'illustré à la figure 2-5. Par exemple, Naiman *et al.* (2010) ont observé pour les rivières de la côte Pacifique des zones amont avec une importante charge de fond et des pentes fortes formant des rivières en tresses, qui évoluent vers l'aval en des rivières anastomosées puis en rivières à méandre où la charge sédimentaire en suspension est dominante. À l'échelle du tronçon, l'apport de sédiments de l'amont et leur dépôt lors des crues permet également la création des milieux physiques spécifiques de la plaine alluviale (figure 2-6). L'érosion des berges pouvant être une contribution majeure à la charge sédimentaire, ce processus est un élément influençant le style fluvial et donc les types de milieux physiques (terrasses, plaines d'inondation, bancs d'accumulation, substrat) (Florsheim *et al.*, 2008).

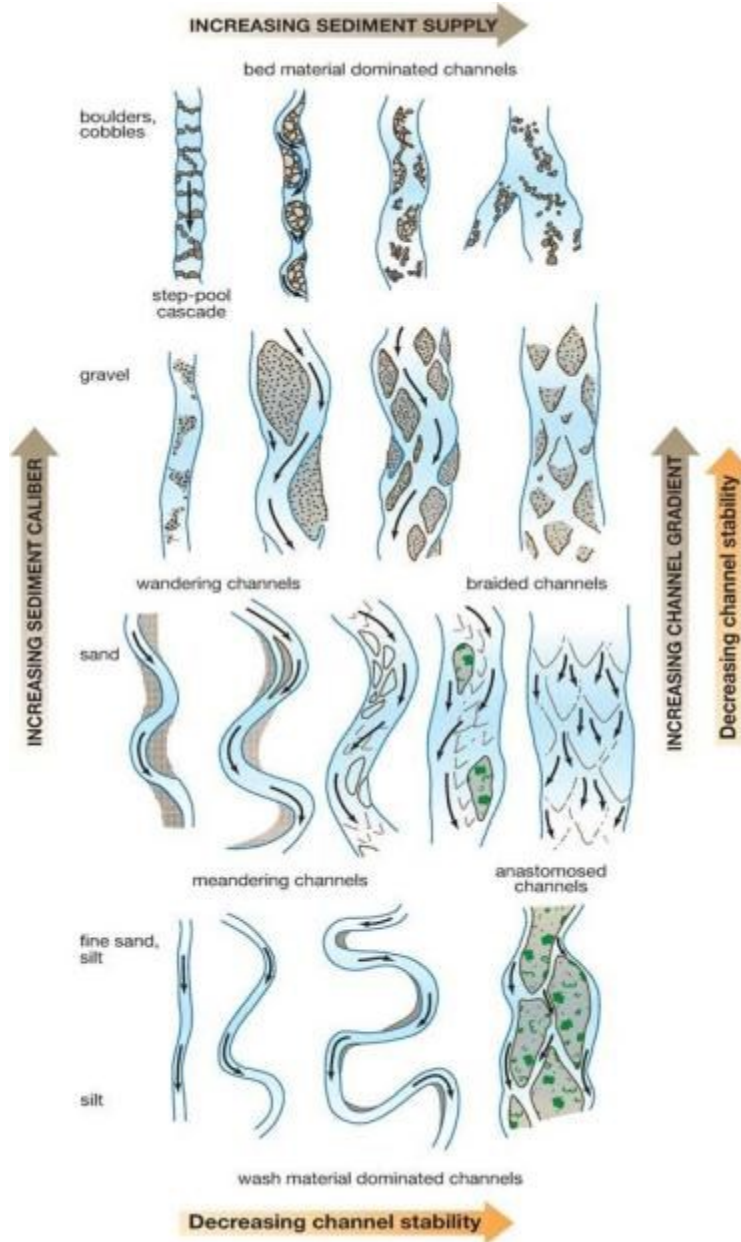


Figure 2-5 – Types de rivière selon la charge sédimentaire et la taille des sédiments (Church, 2006)

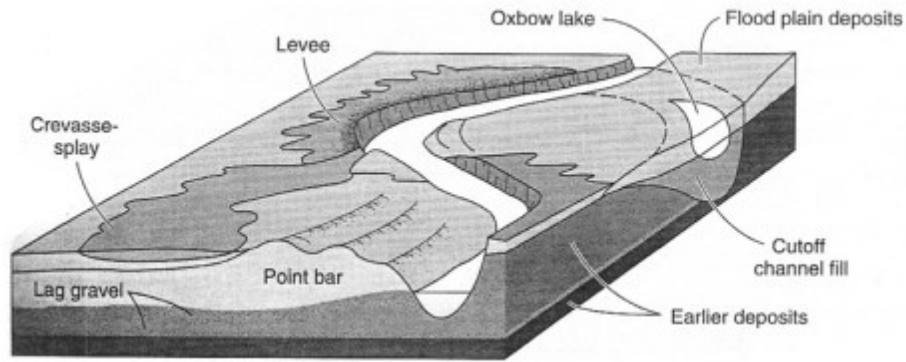


Figure 2-6 – Éléments typiques de la plaine alluviale.

La migration des rivières, ainsi que les inondations, sont les processus à l'origine de la formation du milieu physique de la plaine alluviale et de ces caractéristiques (Easterbrook, 1999).

2.3.2 Importance de la migration et du recouplement des méandres

À l'intérieur de la zone de transport, la mobilité des méandres est réalisée par l'érosion des berges externes des méandres et le dépôt des sédiments le long des berges internes. Ce processus détermine la forme de la section transversale du chenal, qui soutient des niches écologiques spécifiques. Par exemple, en Amérique du Nord, les parois verticales des méandres en zones argileuses sont utilisées par les hirondelles de rivage (*Riparia riparia*) (Kondolf, 2011), et les bancs de sable peuvent servir de zone de repos pour les grues blanches (*Grus americana*) pendant leur migration ainsi que de site de ponte pour la tortue ponctuée (*Clemmys insculpta*) (Florsheim *et al.*, 2008). Le sapement des berges est également reconnu pour offrir des abris aux poissons contre les prédateurs (Florsheim *et al.*, 2008).

Au niveau de la configuration du chenal, l'érosion des berges est un élément qui permet une diversité d'habitat à l'échelle du tronçon, en particulier le maintien des seuils et des mouilles (Kondolf, 2011). Cette diversité d'habitat est nécessaire pour la plupart des espèces de poissons, et notamment pour certaines espèces d'intérêt comme le saumon (Kondolf, 2011).

Le processus de destruction des milieux écologiques par l'érosion et de création de nouveaux habitats par le dépôt des sédiments est également un processus important structurant les écosystèmes. La migration du chenal permet la colonisation des milieux créés, à l'intérieur des méandres, par de nouvelles espèces, ce qui débute une succession temporelle des espèces. Comme ce phénomène est constant, l'ensemble des étapes de successions temporelles se retrouve également le long de transects perpendiculaires à la rivière, et l'ensemble de la diversité des habitats est conservé. C'est le "Patch Dynamics Concept", illustré à la figure 2-7. Ainsi, Latterell *et al.* (2006) et Naiman *et al.* (2010) ont montré que la composition en espèce des forêts de plaine alluviale était directement en lien avec la fréquence de destruction de la forêt par l'érosion des berges. L'hétérogénéité des écosystèmes riverains est donc directement dépendante des processus d'érosion (Latterell *et al.*, 2006, Florsheim *et al.*, 2008, Naiman *et al.*, 2010).

Le recouplement des méandres permet par ailleurs la création de bras morts. Leur connexion hydrologique, et donc écologique, avec le chenal principal, fait de ces bras morts des milieux uniques (Stella *et al.*, 2011), et leur présence contribue à une plus grande biodiversité, notamment pour les poissons et plus particulièrement pour les amphibiens (Ward *et al.*, 1999). Latterell *et al.* (2006), Naiman *et al.* (2010) et Kondolf (2011) précisent que les processus de comblement progressif des bras morts permettent

une succession temporelle des espèces colonisant ces milieux, tout comme le permet la migration des méandres. La figure 2-8 résume comment ces processus contribuent à la biodiversité par le "Patch Dynamics Concept", à différentes échelles temporelles.

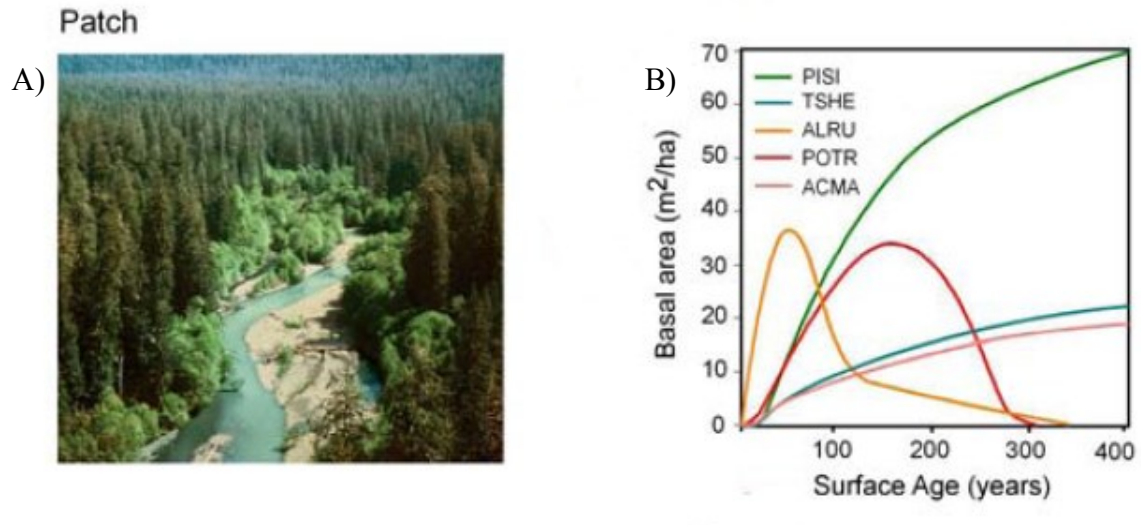


Figure 2-7 – Exemple de "patch" d'habitats différents le long d'une rivière (A) et composition typique en espèces des arbres de la plaine alluviale selon son âge (B), sur la côte Pacifique. La réquisition de la plaine alluviale par la migration des méandres permet le maintien de patch de végétation ayant une composition particulière en espèces (Naiman *et al.*, 2010). (PISI: *Picea sitchensis*; TSHE: *Tsuga heterophylla*; ALRU: *Alnus rubra*; POTR: *Populus balsamifera trichocarpa*; ACMA: *Acer macrophyllum*).

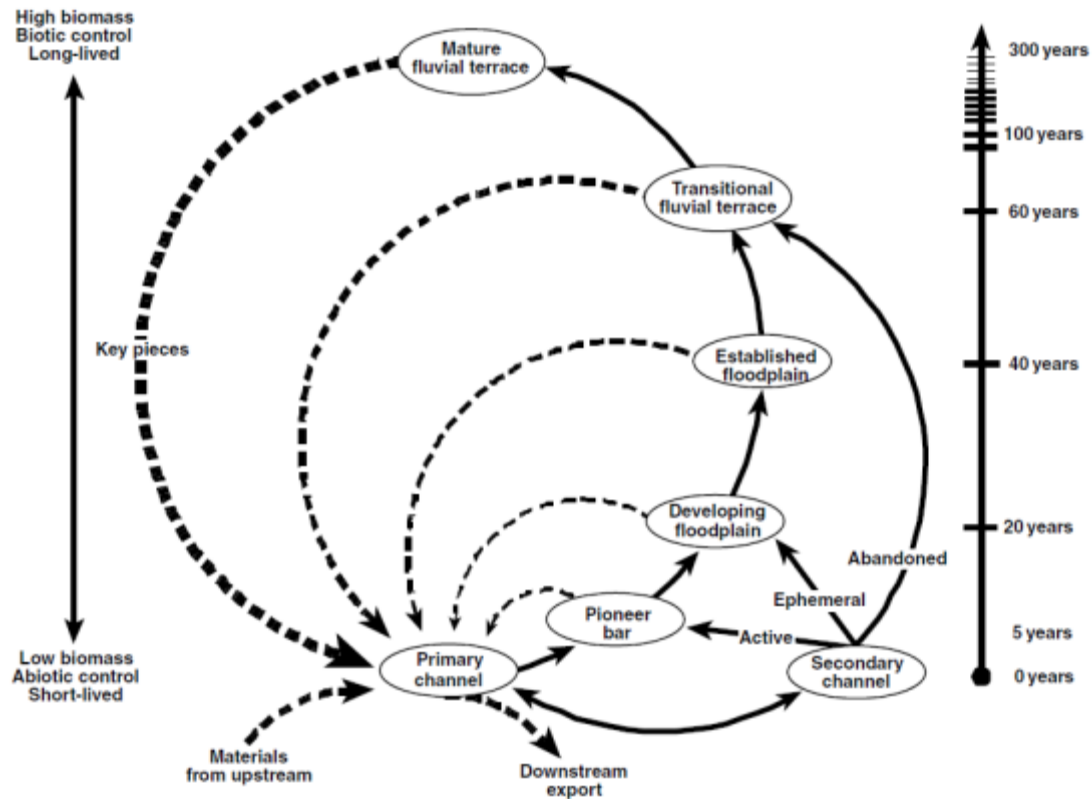


Figure 2-8 – Rôle de la migration et de l'avulsion dans le « Patch Dynamics Concept » (Latterell *et al.*, 2006).

Selon l'hypothèse de perturbation intermédiaire (Kondolf, 2011), et telle qu'illustrée à la figure 2-9, la mobilité des rivières à méandre permet une plus grande biodiversité que des rivières ayant une plus faible mobilité ou une plus forte mobilité (rivières en tresses). En effet, comme précisé par Ward *et al.* (1999), il est nécessaire d'avoir des milieux perturbés à différentes fréquences. La plaine alluviale des rivières en tresses est trop fréquemment remaniée et ne possède que peu de zones ayant une fréquence d'érosion faible, alors que les rivières où l'érosion est faible ont peu de zones fréquemment perturbées. La diversité des régimes de perturbation est optimale pour les rivières à méandres, ce qui en fait un type fluvial particulièrement important.

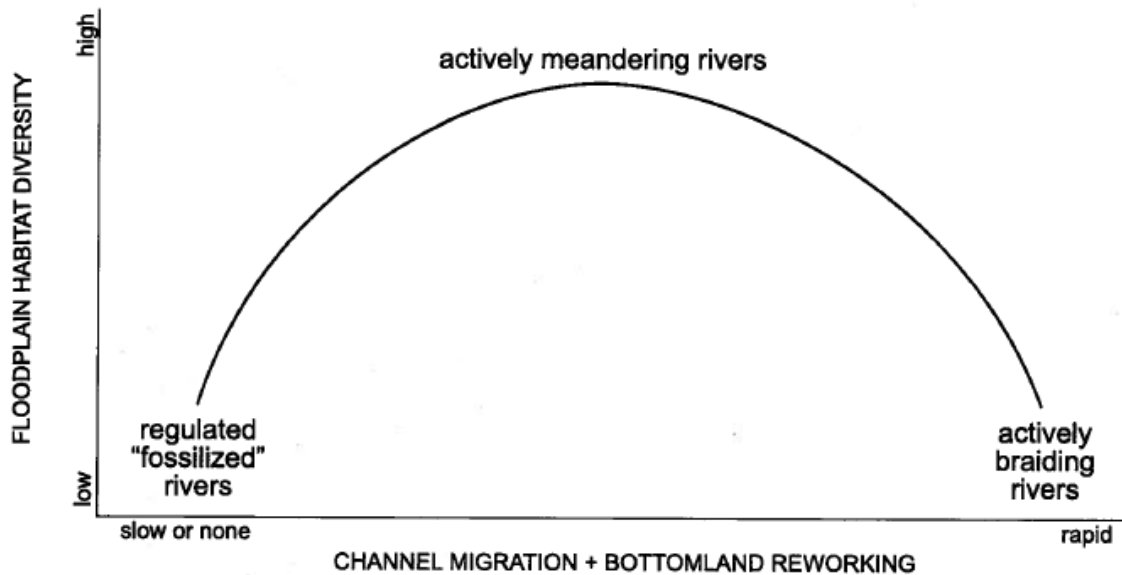


Figure 2-9 – Diversité des habitats en fonction de la fréquence de réquisition de la plaine alluviale par la migration du lit.

(Kondolf, 2011)

2.3.3 Importance du bois mort

En érodant les berges, la mobilité des rivières fournit le chenal en bois mort. La présence de bois mort dans le chenal en modifie la géomorphologie et le complexifie (Florsheim *et al.*, 2008). Dans les rivières à sédiments fins, le bois mort constitue également un substrat important pour les organismes aquatiques (Florsheim *et al.*, 2008). L'accumulation de bois mort crée des embâcles provoquant le piégeage des sédiments en amont et un élargissement du chenal, ce qui contribue également à la diversité des habitats (Latterell et Naiman, 2007). Les embâcles de bois, en limitant l'écoulement et en créant une zone d'aggradation, peuvent par ailleurs favoriser le recouplement des méandres (Rapp et Abbe, 2003).

2.4 Conséquence de la gestion conventionnelle de la mobilité

2.4.1 Conséquences environnementales de la stabilisation des berges

La gestion conventionnelle de la mobilité, c'est-à-dire la stabilisation systématique des berges dès qu'une utilisation anthropique des terrains adjacents est présente, porte nécessairement son lot de conséquences environnementales. La stabilisation des berges peut prendre différentes formes : mur de béton, enrochement (probablement le mode de stabilisation le plus couramment utilisé), utilisation de gabions ou génie végétal (avec empierrement en bas de talus, rabaissement de la pente et végétation).

Une liste exhaustive des mécanismes altérés par la stabilisation des berges et de leurs effets écosystémiques a été établie par Florsheim *et al.* (2008). D'une part, par sa nature même, la stabilisation des berges empêche l'érosion des berges et donc les processus et leurs rôles écosystémiques cités précédemment : dépôt des sédiments dans les bancs d'accumulation et maintien du profil transversal des méandres, conservation de la charge sédimentaire transportée par la rivière, maintien dynamique des habitats riverains par la migration et le recouplement des méandres, etc.

Par ailleurs, la stabilisation des berges diminue l'irrégularité des berges, ce qui augmente et rend plus uniforme la vitesse du courant le long des berges. L'augmentation de la vitesse du courant lors des crues peut empêcher l'établissement ou la survie de certaines plantes de rivage (Florsheim *et al.*, 2008). En diminuant l'irrégularité des berges, la complexité du chenal et donc des habitats est également diminuée (Florsheim *et al.*, 2008).

L'enrochement des berges constitue par ailleurs une destruction de l'habitat des berges elles-mêmes, ce qui peut affecter l'habitat aquatique comme l'habitat terrestre. Bien que certaines des structures de stabilisation puissent inclure des éléments de revégétalisation afin de leur rendre un aspect naturel et restaurer certains de leurs rôles écosystémiques, ces efforts de végétalisation ne permettent cependant pas de conserver la diversité d'habitat (Florsheim *et al.*, 2008). Au niveau des écosystèmes aquatiques, la suppression des habitats riverains peut également avoir des conséquences indirectes, telles que la diminution de l'ombrage et le réchauffement de l'eau, ce qui vient altérer l'habitat du poisson (Richardson *et al.*, 2010).

2.4.2 Viabilité et coût de la stabilisation

Indépendamment des considérations écologiques, certains auteurs remettent en question la stabilisation systématique des berges pour des raisons économiques. En effet, les ouvrages de stabilisation des berges nécessitent des investissements pour les entretenir. Ceux-ci sont conçus pour résister à un certain débit maximal, et la nature stochastique de cette variable implique que les ouvrages de stabilisation soient, tôt ou tard, détruits par une crue importante. Il est alors nécessaire d'effectuer des travaux pour les remettre en état. De plus, les matériaux utilisés, comme le métal des gabions ou le béton, peuvent subir une corrosion avec le temps et affaiblir l'ouvrage. Piégay *et al.* (1997, 2005) proposent donc d'effectuer une analyse coûts-avantages pour établir s'il est économiquement pertinent de stabiliser ou non une berge. Dans leur étude sur la mobilité de la Galaure, en France, Piégay *et al.* (1997) estiment que les coûts pour la stabilisation des méandres du site d'étude serait de 800 000\$ US alors que le prix des terrains agricole et la valeur de la production qui peut y être faite sur 20 ans est de 230 000\$ US. Au

Vermont, les autorités responsables de la gestion des rivières ont établi le même constat d'échec, d'un point de vue économique, de la politique de stabilisation systématique : “Le Vermont s’est retrouvé dans un cycle sans fin et sans cesse croissant de dépenses de plusieurs millions de dollars pour maintenir des rivières, pour réparer et reconstruire des routes et des ponts endommagés par des crues, et pour protéger les terres près des cours d’eau contre l’érosion et les inondations, seulement pour voir ces investissements dans la gestion des cours d’eau: a) échouer durant la prochaine crue ou b) résulter en des dégâts plus importants ailleurs” (Cahoon et Kline, 2006, traduction libre).

2.5 L'approche par corridor de mobilité

2.5.1 Concept et méthode de détermination

Depuis environ deux décennies, la perception de l'érosion des berges des rivières s'est transformée dans le milieu académique ainsi que parmi les gestionnaires. Alors qu'auparavant l'érosion était uniquement vue comme une nuisance provoquant la perte de terrain, et une source de danger à laquelle il fallait donc remédier en domestiquant les rivières, l'évolution des sciences et l'éveil de conscience autour des enjeux environnementaux ont changé cette vision. Aujourd'hui, la mobilité des rivières est ainsi de plus en plus perçue comme un processus naturel avec lequel nos sociétés doivent composer. Ce changement de paradigme, parfois synthétisé par l'expression « Work with nature » (Hooke, 1999, Gregory, 2006, Gregory *et al.*, 2008), est motivé par les intérêts écologiques et économiques déjà mentionnés, ainsi que par des questions de sécurité civile. La détermination précise des risques d'érosion permet en effet de réglementer plus

efficacement sur l'utilisation du territoire (zones de construction) afin de protéger la population (FEMA, 1999).

Dans cette nouvelle optique, des outils ont été développés afin de déterminer les zones riveraines susceptibles d'être érodées par les rivières. Ces zones constituent l'espace de mobilité d'une rivière, également nommé « espace de liberté » ou « espace de divagation » (Malavoi *et al.*, 1998), « Erodible Corridor Concept » (Piégay *et al.*, 2005), « Channel Migration Zone » (Rapp et Abbe, 2003), ou bien encore « Fluvial erosion hazard area » (Kline et Cahoon, 2010). Les méthodologies développées pour déterminer l'espace de mobilité sont souvent réalisées par des agences gouvernementales chargées de la gestion des rivières avec par exemple en France la méthode développée par Malavoi *et al.* (1998) pour l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, dans l'état de Washington celle de Rapp et Abbe (2003) pour le Washington State Department of Ecology et le Washington State Department of Transportation, au Vermont celle développée par le Vermont Agency of Naturel Ressources (Kline et Dolan, 2008, Kline et Cahoon, 2010), ou bien encore dans la province de l'Ontario par la firme Parish Geomorphic sur demande de la Toronto and Region Conservation Authority (Parish Geomorphic, 2004).

Ces méthodologies peuvent être classées en deux catégories principales. Les méthodologies de la première catégorie déterminent un corridor basé principalement sur l'amplitude des méandres (figure 2-10, partie gauche). Ce corridor de mobilité correspond à l'ensemble du territoire pouvant être mobilisé par la rivière, et nécessaire au maintien des fonctions géomorphologiques de la rivière, sans horizon temporel précis. Les méthodologies du Vermont (Kline et Dolan, 2008, Kline et Cahoon, 2010) et de la

région de Toronto (Parish Geomorphic, 2004) tombent dans cette catégorie. La deuxième catégorie de méthodologies tente de prédire les zones probables érodées par la rivière pour un horizon temporel précis (figure 2-10, partie droite). La méthodologie de l'état de Washington (Rapp et Abbe, 2003) entre dans cette catégorie. D'autres méthodologies, comme la méthodologie utilisée en France par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (Malavoi *et al.*, 1998), combinent les deux approches.

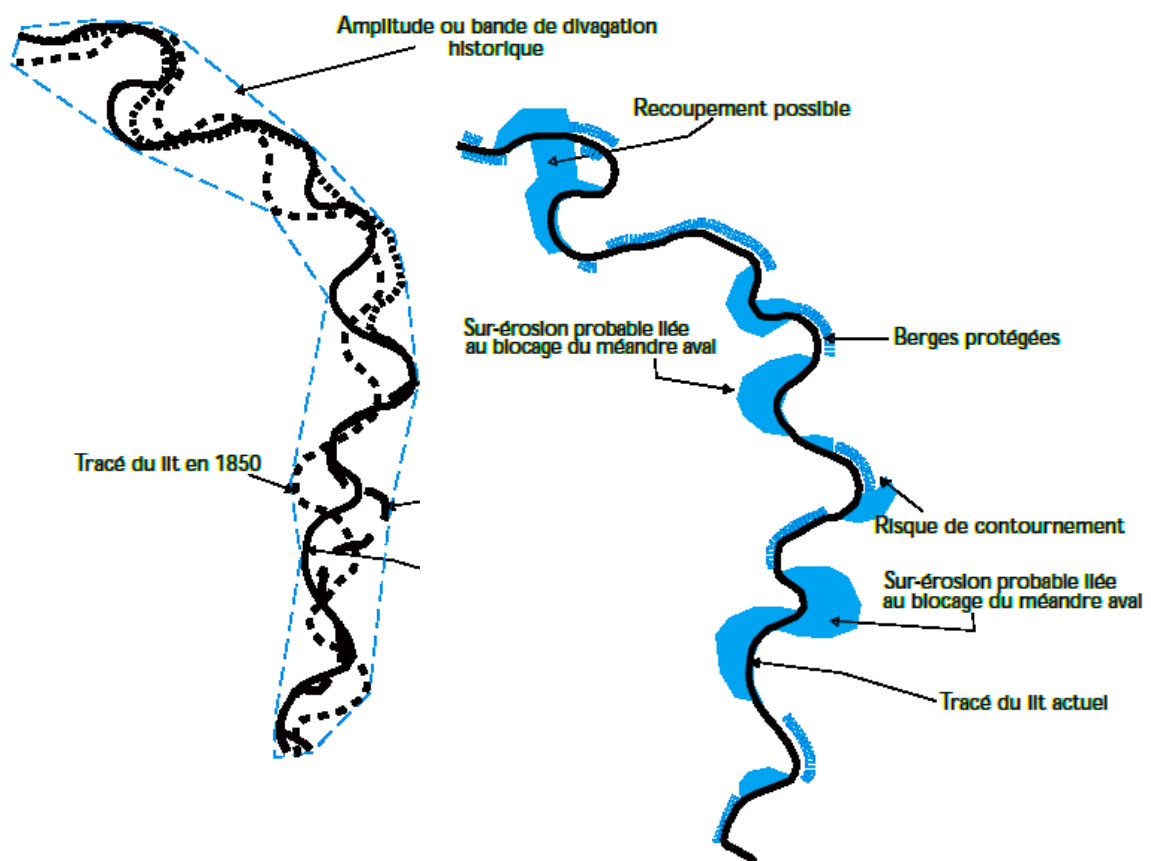


Figure 2-10 – Détermination d'un espace de mobilité basée sur l'amplitude des méandres (à gauche) et sur une prévision de l'érosion dans les 50 prochaines années (à droite), pour un même tronçon.

(Malavoi *et al.*, 1998)

Quelle que soit la méthodologie utilisée pour cartographier la mobilité, la gestion par corridor de mobilité consiste donc à laisser librement l'érosion se dérouler sur ces zones. Il s'agit donc d'une politique de non-intervention face à l'érosion, sur un territoire défini où une réglementation ou une législation spécifique s'applique. Une certaine utilisation anthropique du corridor de mobilité peut être tolérée, par exemple pour l'agriculture, ou bien cette zone peut être intégralement conservée à l'état naturel. Un corridor naturel peut également être aménagé pour permettre des activités récréatives.

2.5.2 Intérêts de la gestion par corridor de mobilité

L'intérêt principal de l'implémentation d'un corridor de mobilité est le maintien des processus de mobilité cités précédemment, dans une perspective de conservation écologique. L'implantation d'un corridor riverain naturel et d'une politique de non-intervention sur les rivières a cependant également d'autres avantages non liés à la mobilité.

2.5.2.1 Habitat riverain et qualité de l'eau

La végétation riveraine permet généralement d'améliorer la qualité de l'eau dans le chenal des rivières, soit par absorption directe des polluants par les végétaux, soit par des effets indirects que les végétaux peuvent avoir sur l'hydrogéologie et la chimie du sol (Dosskey *et al.*, 2010). Trois effets importants de la végétation riveraine ont particulièrement été étudiés : la diminution du ruissellement et de l'apport en sédiments fins qui lui est associé, la diminution des apports en phosphore, et la diminution des apports en azote. Plusieurs méta-analyses existent sur le sujet (ex: Mayer *et al.*, 2005, Wenger, 1999), avec l'identification de liens statistiques entre la largeur de la bande

riveraine végétalisée et l'efficacité de rétention pour ces trois paramètres. Au Québec, ces fonctions d'amélioration de la qualité de l'eau par la végétation riveraine sont reconnues par la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables qui promeut l'implantation de bandes riveraines le long des cours d'eau (MDDEP, 2005).

2.5.2.2 Restauration des cours d'eau

Les modifications directes ou indirectes, par des modifications de l'hydrologie, des cours d'eau par les activités humaines détériorent l'habitat aquatique. Pour des raisons écologiques ou de pêche récréative, ces cours d'eau sont parfois restaurés, très souvent afin d'y améliorer l'habitat du poisson. Dans un contexte d'espace de mobilité, il peut ne pas être nécessaire d'effectuer ce type d'intervention, d'une part parce que ce mode de gestion limite l'impact négatif des activités humaines sur la rivière, et d'autre part parce que les rivières peuvent, si elles possèdent une puissance suffisante, revenir à leur état naturel après perturbation anthropique (Brookes, 1988, Güneralp et Rhoads, 2009, Kondolf, 2011). Les interventions reliées à la restauration des cours d'eau représentent donc à l'heure actuelle un coût qui pourrait possiblement être évité. Bernhardt *et al.* (2005) ont estimé par exemple les coûts des interventions de restauration des cours d'eau aux États-Unis à plus de 1 milliard de dollars. Sur les 14 types d'interventions répertoriés dans cette étude, les 3 plus importantes dépenses, sensiblement équivalentes, sont l'amélioration de la qualité de l'eau, la revégétalisation des berges et l'amélioration de l'habitat du poisson. Il s'agit là de trois actions qui peuvent être partiellement ou totalement remplacées par l'implémentation d'un corridor de mobilité.

Par ailleurs, la dynamique fluviale étant bien souvent mal comprise avant d'entreprendre des travaux de restauration, il arrive que les aménagements réalisés soient rapidement

détruits par les ajustements de la rivière. Ainsi, Kondolf (2006), dans une critique de la populaire technique de restauration de méandres prônée par Rosgen (1996), énumère des exemples d'échec. Il s'agit encore une fois de travaux ayant un coût important et qui peuvent être évités.

2.5.2.3 "Entretien" du chenal

L'utilisation des terrains riverains pour des activités humaines mène bien souvent à des interventions dans le chenal. Il est particulièrement fréquent de voir des modifications de chenal afin de favoriser un écoulement rapide, dans le but de diminuer les risques d'inondation ou d'en atténuer la durée. Ces modifications, souvent perçues comme un "entretien" du chenal, peuvent consister en une linéarisation du chenal ou encore en la destruction des embâcles de bois. Au Québec, cette vision que les rivières doivent être entretenues pour maintenir un écoulement maximal est profondément ancrée. Par exemple, une fiche technique sur la protection de l'habitat du poisson réalisée par le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune en 2003 indique que "il est important de [] retirer du cours d'eau et des rives les déchets, débris, branches et arbres morts susceptibles de nuire à la libre circulation du poisson ou à l'écoulement de l'eau et de provoquer ainsi un embâcle". (MRNF, 2003). L'article 104 de la Loi sur les compétences municipales donne par ailleurs aux Municipalités Régionales de Comtés la possibilité d'établir des règlements relatifs à l'écoulement des cours d'eau, et l'article 105 stipule que "toute municipalité régionale de comté doit réaliser les travaux requis pour rétablir l'écoulement normal des eaux d'un cours d'eau lorsqu'elle est informée de la présence d'une obstruction qui menace la sécurité des personnes ou des biens" (Gouvernement du Québec, 2012). Bien que l'article 105 soit limité aux cas où des questions de sécurité

soient en jeu, ces deux articles ont amené les MRC à établir des règlements obligeant les propriétaires riverains à supprimer systématiquement tout embâcle de bois ou arbre mort dans les rivières, comme à titre d'exemple dans la MRC de Matane (MRC de Matane, 2010) et celle MRC Brome-Missisquoi (MRC Brome-Missisquoi, 2009). Il existe par ailleurs dans cette vision un paradoxe entre la volonté affichée de vouloir permettre un écoulement rapide de l'eau (pour éviter les crues) et les effets à l'échelle du bassin versant. En effet, une augmentation de la capacité de drainage d'un cours d'eau implique une plus forte probabilité de crue en aval (Blann *et al.*, 2009). En ralentissant l'écoulement, par un corridor de mobilité naturel impliquant des embâcles de bois, les risques de crues extrêmes sont donc plus faibles en aval. De plus, lorsque le corridor de mobilité est naturellement végétalisé, la zone riveraine va avoir un effet tampon sur les écoulements d'eau, en permettant un ruissellement plus faible, ce qui permet de réduire les pics de crues dans le chenal lors des événements intenses de pluies.

2.5.3 Limites à la gestion par corridor de mobilité

Malgré les avantages précités, la gestion de l'érosion des berges par la création d'un espace de mobilité n'est cependant pas une panacée. Deux facteurs viennent en effet limiter l'implantation de cette stratégie. D'une part, les conséquences sociales et économiques d'une libre érosion des berges doivent être prises en compte. Sur certains territoires intensément anthropisés, en particulier les zones urbaines, il n'est en effet pas envisageable de permettre l'érosion des berges car cela obligerait à déplacer un trop grand nombre de bâtiments ou autres structures. D'autre part, certains cours d'eau possèdent une très faible énergie, donc un faible pouvoir d'érosion. Si ces cours d'eau sont perturbés par un redressement ou une modification quelconque de leur morphologie, ils peuvent ne pas

revenir à leur état naturel (des solutions de restauration active peuvent alors être envisagées dans ce cas). La figure 2-11 présente différentes options de gestion pour les cours d'eau selon ces deux facteurs. Afin de déterminer si les conditions socio-économiques sont favorables à l'implémentation d'un corridor de mobilité, Piégay *et al.* (1997) utilisent notamment des analyses coûts-avantages ainsi que les consultations auprès des propriétaires riverains. Pour mesurer la faculté de la rivière à revenir à un état naturel, une valeur seuil de 35 W/m^2 pour la puissance spécifique est généralement considérée (Brookes, 1988, Sear, 1996, Rhoads et Urban, 1997, Güneralp et Rhoads, 2009).

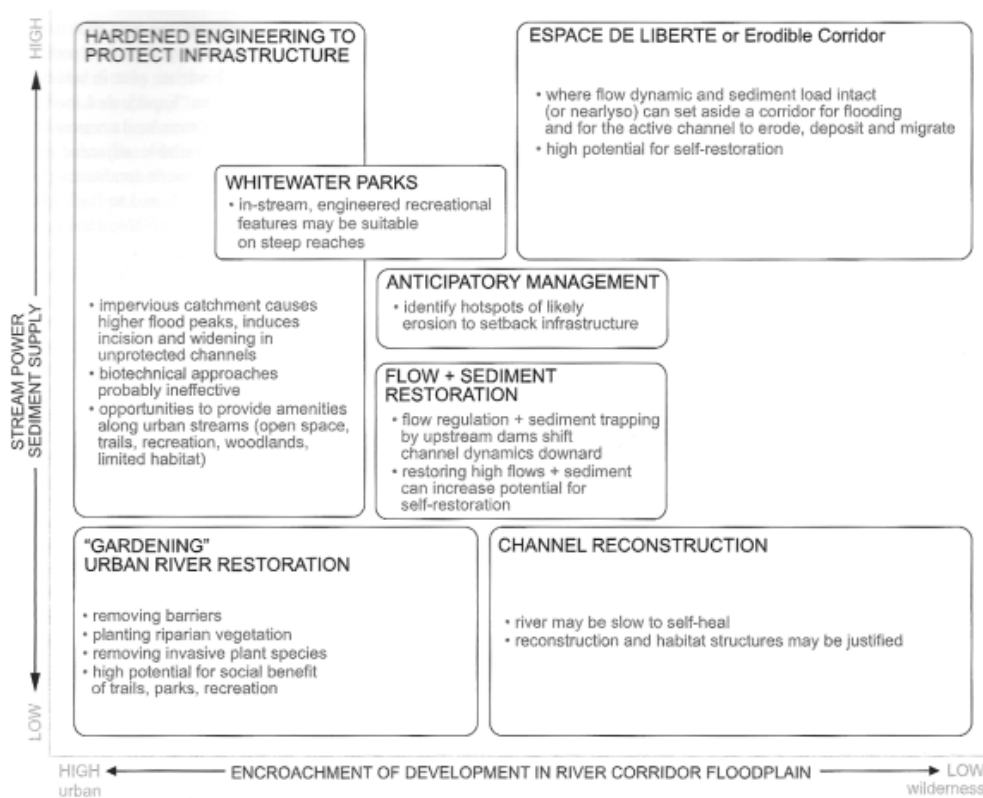


Figure 2-11 – Stratégies de gestion possibles en fonction du degré d’urbanisation et de la puissance de la rivière (Kondolf, 2011)

2.6 Changements climatiques et mobilité

Les changements climatiques prévus pour les prochaines décennies constituent une perturbation majeure à laquelle les rivières devront s'adapter. Pour pouvoir adéquatement déterminer l'espace de mobilité des rivières, les impacts des changements climatiques doivent donc être évalués.

Au Québec, les changements climatiques pourraient se matérialiser par une augmentation des précipitations (Ouranos, 2010). Cet effet pourrait être cependant contrebalancé par une augmentation de l'évapotranspiration due à l'augmentation globale des températures (Boyer *et al.*, 2010). Pour le Québec méridional, il pourrait donc y avoir une augmentation des débits moyens pour les rivières plus au nord et une diminution pour les rivières plus au sud (CEHQ, 2012-a).

L'augmentation des températures entraînerait également une diminution du couvert neigeux et une augmentation des précipitations sous forme de pluie par rapport à la neige. Il en résulterait des crues plus importantes en hiver et moins importantes au printemps, par rapport au climat actuel (Boyer *et al.*, 2010). Les températures plus hautes créeraient également des crues printanières plus précoces (CEHQ, 2012-a). Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de précipitations intenses (Mailhot *et al.*, 2007) pourrait d'ailleurs augmenter la fréquence des crues importantes (Boyer *et al.*, 2010, Ouranos, 2010, Verhaar *et al.*, 2011, CEHQ, 2012-a). Une plus grande variabilité des débits annuels est aussi attendue, créant également des débits d'étiage plus faibles l'été (Boyer *et al.*, 2010, CEHQ, 2012-a).

Les conséquences des changements climatiques sur le transport des sédiments des cours d'eau au Québec ont été abordées par Verhaar *et al.* (2010, 2011). Ces chercheurs ont réalisé des prévisions sur la morphologie de 3 rivières du sud du Québec à partir de différents scénarios concernant l'augmentation du débit des rivières et l'abaissement du niveau du fleuve St-Laurent (principalement due à l'évaporation accrue dans les Grands Lacs). L'impact de cet abaissement du niveau de base, auquel s'ajoute une plus grande capacité de transport des sédiments due à l'augmentation de la fréquence des débits importants, est une tendance à l'incision du lit des rivières étudiées. Les différents modèles de changements climatiques utilisés ont cependant une forte influence sur les résultats obtenus, et une forte variabilité des résultats entre les rivières est observée, malgré des contextes similaires. La nature des ajustements des rivières aux changements climatiques est donc entourée d'une forte incertitude.

L'augmentation de la fréquence des débits de crues importantes, reliée aux événements de précipitations intenses, pourrait augmenter le dynamisme fluvial, c'est-à-dire la mobilité du chenal. En effet, une augmentation de la fréquence des débits importants implique une augmentation de la puissance spécifique des rivières, qui est un paramètre explicatif du taux de migration des méandres (Güneralp et Rhoads, 2009). L'étude de Bauch et Hickin (2011) sur la rivière Squamish (Colombie Britannique) a d'ailleurs montré que l'augmentation des crues intenses de cette rivière depuis les années 1980 a mené à une augmentation de l'érosion des berges.

3 Contexte et objectifs de recherche

3.1 Contexte de recherche

La recherche présentée dans ce document s'inscrit dans un projet de plus grande envergure, le projet « Espace de Liberté ». Ce projet, mené par Pascale Biron de l'Université Concordia, a pour but principal la cartographie de l'espace de liberté de trois rivières du sud du Québec (les rivières de la Roche, Matane et Yamaska Sud-Est, cartes de localisation à l'annexe I, présentées plus en détail à la section 4.1) et l'évaluation monétaire des avantages et des coûts d'implémentation de cet espace de liberté, dans une perspective de changements climatiques. Ce projet comporte notamment une étude de l'espace de mobilité des rivières (présentée dans ce document), une étude de l'espace d'inondabilité (réalisé par le Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'UQAR, sous la direction de Thomas Buffin-Bélanger), ainsi qu'une analyse des milieux humides et de la connectivité entre les rivières et les eaux souterraines réalisée sous la direction de Marie Larocque de l'UQÀM. L'ensemble des résultats de cette étude, incluant certains résultats présentés dans ce document, est publié sous forme d'un rapport remis à Ouranos et aux différents partenaires du projet (Biron *et al.*, 2013-a).

3.2 Objectifs de recherche

L'étude présentée ici vise à :

1 - Quantifier la mobilité passée et future de trois rivières du sud du Québec.

La première étape de la démarche consiste à identifier quelle est la mobilité de trois rivières du Sud du Québec : les rivières Matane, Yamaska Sud-Est et de la Roche. La mobilité passée doit être évaluée, ainsi que la mobilité future qui doit également être cartographiée. Les paramètres géomorphologiques ou anthropiques favorisant ou limitant la mobilité doivent être identifiés.

2 - Évaluer les conséquences possibles des changements climatiques sur la mobilité des rivières.

Les changements climatiques prévus pour les prochaines décennies impliquent une probabilité plus élevée d'événements extrêmes. Ces changements se traduiront par des modifications de l'hydrologie des rivières, entraînant à leur tour une probable augmentation de la mobilité des rivières. Il est donc nécessaire de quantifier l'impact de ces changements sur l'espace de mobilité des cours d'eau.

3 - Mettre en évidence les liens entre la mobilité et des habitats spécifiques sur la rivière Yamaska Sud-Est.

Afin de mieux connaître le rôle de la mobilité en tant qu'élément structurant le biotope aquatique et riverain, il est nécessaire d'identifier les habitats résultants de la mobilité du chenal des rivières et les processus et conditions permettant le maintien de ces habitats.

La stabilisation des berges limitant la mobilité des rivières, il convient également d'évaluer l'impact des activités humaines au niveau de la perte potentielle d'habitat.

En répondant à ces trois objectifs, il sera possible d'identifier à la fois les conséquences environnementales de la gestion actuelle de l'érosion des berges des cours d'eau ainsi que la viabilité de ce mode de gestion dans un futur proche.

4 Méthodologie générale

Compte tenu que le développement d'outils méthodologiques constituait une composante importante de ce projet de maîtrise, une synthèse méthodologique est présentée dans ce chapitre, alors que les détails sont présentés au début de chacun des trois chapitres suivants en lien avec les trois objectifs de recherche.

4.1 Zone d'étude

L'évaluation de la mobilité des rivières et de ses implications pour les écosystèmes riverains et aquatiques et pour la gestion des rivières a été réalisée pour trois rivières du sud du Québec : la rivière de la Roche, la rivière Yamaska Sud-Est (ainsi qu'un de ces affluents, la rivière North-Branch), et la rivière Matane (cartes de localisation aux annexes I et II).

La rivière de la Roche est un petit cours d'eau (débit moyen annuel de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ à Saint-Armand) qui s'écoule principalement au Vermont, avec une boucle d'environ 10km en Montérégie qui constitue notre zone d'étude. C'est un affluent de la baie Missisquoi. La superficie du bassin versant est de 146 km^2 , dont environ un tiers se trouve au Québec (CEHQ, 2012-b). Il s'agit d'une zone à fort usage agricole (environ 60% du territoire) avec une présence importante de forêt (environ 40% du territoire), très faiblement urbanisée.

La rivière Yamaska Sud-Est s'écoule également en Montérégie. Il s'agit d'un cours d'eau légèrement plus important que la rivière de la Roche, avec un débit moyen annuel de $7.8 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'embouchure et une superficie de bassin versant de 408 km^2 (CEHQ, 2012-b). Elle prend sa source dans les contreforts du massif appalachien, aux monts Sutton, et se

jette dans la rivière Yamaska. Son bassin versant est principalement forestier, avec une transition vers l'agriculture en aval dans les basses-terres du Saint-Laurent. La zone d'étude inclut la rivière Yamaska Sud-Est elle-même, sur un tronçon d'environ 47 km, ainsi qu'un de ses affluents principaux, la rivière North Branch, sur un tronçon de 9 km.

La rivière Matane est quant à elle de taille plus importante, avec un débit moyen annuel de 46.7 m³/s et une superficie de bassin versant d'environ 1700 km² (CEHQ, 2012-b). Il s'agit également d'un cours d'eau plus puissant, dynamique, descendant des monts Chic-chocs en Gaspésie. C'est une rivière à saumons à lit de gravier. La pression anthropique est importante dans sa partie aval, où de nombreux tronçons ont des berges artificialisées. La zone d'étude sur cette rivière correspond aux 50 km de l'extrémité aval de la rivière, depuis la réserve faunique de Matane jusqu'à l'embouchure dans le fleuve Saint-Laurent.

4.2 Analyse de la mobilité

L'analyse de la mobilité des rivières, tout comme l'ensemble des analyses spatiales et des cartographies exposées dans ce document, a été réalisée avec ArcGIS version 10.1. Cette analyse est réalisée en déterminant deux espaces de mobilité distincts. Le premier espace de mobilité, nommé espace des aléas de mobilité, correspond aux zones où un risque élevé d'érosion ou d'avulsion (recoupement de méandre) est présent dans un horizon de 50 ans. La méthodologie pour cartographier cet espace de mobilité est largement inspirée des méthodologies existantes développées en France par Malavoi *et al.* (1998), dans l'état de Washington par Rapp et Abbe (2003), ainsi que des travaux réalisés sur la rivière Matane (Olsen *et al.*, 2012). Un horizon temporel de 50 a été choisi car il s'agit de l'horizon temporel utilisé dans certaines des méthodologies de référence (Malavoi *et al.*,

1998, Olsen *et al.*, 2012). Cet horizon a semblé par ailleurs être une perspective temporelle raisonnable en termes de gestion et d'aménagement du territoire, tout en correspondant également à l'horizon temporel utilisé pour les projections climatiques. Le deuxième espace, nommé corridor de mobilité, plus large et englobant généralement l'espace des aléas de mobilité, correspond à l'espace où la rivière peut potentiellement migrer à long terme. Il s'agit d'un espace correspondant à la notion de corridor de mobilité développée en particulier par Piégay *et al.* (1997, 2005), et qui est également l'objet des méthodologies utilisées au Vermont par le Vermont Agency of Naturel Ressources (Kline et Dolan, 2008, Kline et Cahoon, 2010), ainsi qu'en Ontario par la firme Parish Geomorphic (2004). Cette cartographie en deux espaces de mobilité permet d'une part d'identifier l'espace de mobilité nécessaire à la conservation des processus fluviaux à long terme (corridor de mobilité), et d'autre part d'identifier les zones plus sensibles, pour une gestion à plus court terme (espace des aléas de mobilité). La détermination des espaces de mobilité est donc basée à la fois sur des questions de gestion de risque et de maintien de l'intégrité géomorphologique et écologique des systèmes. Le tableau 4-1 présente les méthodologies utilisées, leur importance en termes de risque et d'intégrité, et le classement des différentes zones identifiées dans le corridor de mobilité ou dans l'espace des aléas de mobilité.

Tableau 4-1 – Méthodologies utilisées et implications en termes de risques et d'intégrité

Type d'aléa	Méthodologie	Intensité de l'aléa	Apports à l'intégrité du système fluvial	Classement
Érosion des berges	Corridor basé sur l'amplitude des méandres			
	taux de renouvellement de plaine alluviale inférieur à 25% sur 50 ans	faible	maintien des processus hydro-géomorphologiques et écologiques	Corridor de mobilité
	taux de renouvellement de plaine alluviale supérieur à 25% sur 50 ans	forte	maintien de l'hétérogénéité des habitats	Espace des aléas de mobilité
	Taux d'érosion historiques			
	berges naturelles (extrapolation sur 50 ans) *	forte	maintien des apports en sédiment création de niches écologiques	Espace des aléas de mobilité
	berges stabilisées (90 ^e centile des taux historiques par tronçon homogène, sur 50 ans)	forte	perturbation de la dynamique sédimentaire perte d'habitats écologiques	Espace des aléas de mobilité
Avulsion	Cartographie de formes hydrogéomorphologiques			
	zones de recoupement de méandres	forte	création de bras morts (milieux humides)	Espace des aléas de mobilité

* : Méthodologie développée et appliquée sur la rivière Matane par Olsen *et al.* (2012).

L'espace de mobilité est déterminé en grande partie à partir de la mobilité historiquement observée sur les rivières, obtenue par l'étude de photographies aériennes prises à différentes années. Pour la rivière de la Roche, des photographies des années 1930, 1964, 1979, 1997 et 2009 ont été utilisées, alors que des photographies des années 1950, 1965, 1979, 1997 et 2009 et des années 1963, 1993, 2001 et 2009 ont respectivement servi à l'étude de la Yamaska Sud-Est et de la Matane. Ces photographies ont été géoréférencées et la position des rivières y a ensuite été numérisée. Un sectionnement des rivières en tronçons géomorphologiquement homogène a également été effectué. L'établissement d'un corridor de mobilité basé sur l'amplitude historique des méandres, selon une méthode adaptée de Parish Geomorphic (2004), a été effectué en premier lieu et a permis la détermination du corridor de mobilité pour chaque tronçon homogène. La prise en compte des processus géomorphologiques à une échelle plus fine tels que les risques d'avulsion et les taux d'érosion historiquement localement observés, a permis ensuite de déterminer des zones à plus forte probabilité d'être mobilisées par la rivière constituant l'espace des aléas de mobilité. Le calcul des taux de renouvellement de la plaine alluviale a également servi à quantifier le dynamisme des rivières à l'intérieur de leur corridor de mobilité. Enfin, la limitation de la mobilité par l'enrochement des berges a également été prise en considération pour la détermination de l'espace des aléas de mobilité.

Pour compléter l'analyse de la mobilité des cours d'eau, des mesures de la puissance spécifique ont été réalisées le long des trois cours d'eau, et la corrélation spatiale entre la mobilité et la puissance spécifique a été étudiée sur la rivière Yamaska Sud-Est et sur un de ses affluents, le ruisseau de Jackson (carte de localisation à l'annexe II). L'hypothèse de travail était qu'une mobilité plus importante serait observée pour les zones où la

puissance spécifique est la plus forte, sur la base des travaux de Larsen *et al.* (2006) et de Güneralp et Rhoads (2009).

L'ensemble de l'analyse de la mobilité est présenté en détail au chapitre 5.

4.3 Évaluation de l'impact des changements climatiques sur la mobilité des cours d'eau

Comme il a été déjà précisé, les changements climatiques à venir amèneront une augmentation probable des précipitations moyennes ainsi qu'une augmentation des événements de précipitation intenses qui pourrait mener à une augmentation de la mobilité des rivières. À partir de données sur les prévisions de débits des rivières étudiées sur les prochaines décennies, une évaluation de l'impact de ces changements sur la mobilité future des rivières a été effectuée. Cette évaluation est basée sur deux simulations effectuées avec le modèle RVR Meander (Abad et Garcia, 2006), calibrées sur le comportement historiquement observé des cours d'eau. Elle a permis d'observer les effets d'une augmentation des débits morphogènes, et d'envisager également l'impact de ces changements sur la cartographie de la mobilité effectuée précédemment. Cette analyse est présentée au chapitre 6.

4.4 Lien entre mobilité et habitats

L'implantation d'un espace de mobilité protégé, tel que cartographié au chapitre 5, aurait pour principal objectif la protection environnementale des rivières et des milieux riverains. Afin d'approfondir les connaissances actuelles sur le rôle environnemental des espaces de mobilité, une étude des relations entre mobilité et habitats a été réalisée au

chapitre 7. Trois types d'habitats ont été cartographiés sur la rivière Yamaska Sud-Est et sur un de ses affluents, le ruisseau de Jackson : les bancs d'accumulation de sédiments, les bras morts ainsi que les embâcles de bois. Ces habitats ont été identifiés grâce à des photographies à haute résolution prises par hélicoptère, ainsi que par des relevés de terrain. À partir des données sur la mobilité obtenues au chapitre 5, une analyse spatiale entre la mobilité observée, différents paramètres géomorphologiques (incluant les activités humaines) et les différents habitats observés a été effectuée.

5 Détermination de l'espace de mobilité

5.1 Rappel des objectifs et contexte de recherche

La cartographie des espaces de mobilité des rivières Yamaska Sud-Est, de la Roche et Matane est un livrable important du projet « Espace de Liberté ». Cette cartographie, qui représente la mobilité future des rivières et est principalement basée sur l'étude de la mobilité passée, est réalisée en s'inspirant des techniques utilisées par des organismes gouvernementaux en France, au Vermont, dans l'état de Washington, et tout particulièrement celle utilisée en Ontario (Parish Geomorphic, 2004). Deux espaces ont été déterminés, afin de pouvoir cartographier des zones requises par les rivières à des échelles temporelles différentes, et ayant des implications différentes en terme de gestion. Le corridor de mobilité, plus large, représente l'espace requis pour la conservation de l'ensemble des processus fluviaux, à long terme. Le deuxième espace, l'espace des aléas de mobilité, est centré sur un objectif temporel plus court, 50 ans, plus proche de l'échelle temporelle utilisée pour la gestion des cours d'eau.

5.2 Méthodologie

5.2.1 Pré-traitement des données

La plupart des méthodes utilisées pour la détermination de l'espace de mobilité des rivières font appel à l'étude historique de la position du chenal. Ces méthodes se basent donc sur des cartes ou photographies aériennes établies sur plusieurs décennies pour déterminer la mobilité des cours d'eau. Très utilisées en Europe (e.g. Piégay *et al.*, 1997,

Pont *et al.*, 2009, Rinaldi *et al.*, 2009, Ollero, 2010), où la disponibilité de cartes historiques est plus importante qu'en Amérique du Nord, ces techniques ont cependant été également appliquées sur le nouveau continent (e.g. Graf 2000), où les plus anciens documents disponibles ayant une précision suffisante sont souvent des photographies aériennes datant des années 1930 (Rapp et Abbe 2003). Les analyses effectuées par Gurnell (1997) ont montré par ailleurs qu'une période de 50 ans de données peut permettre d'obtenir des résultats probants.

Pour réaliser l'ensemble des opérations nécessaires à la détermination de l'espace de mobilité des cours d'eau, ces cartes doivent être numérisées, géoréférencées, et la position des cours d'eau doit ensuite y être numérisée. Les photographies utilisées pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est sont listées au tableau 5-1. Pour la rivière Matane, ces opérations ont été effectuées par Olsen *et al.* (2012), sur des photographies de 1964, 1993, 2001 et 2009.

Tableau 5-1 – Photographies aériennes utilisées pour la détermination de la mobilité des rivières

	Année	Échelle d'origine	Source	Support d'origine
Rivière de la Roche	1930	1 / 20 000	Photothèque Nationale de l'Air	Papier
	1964-65	1 m/pixel	MRC Brome-Missisquoi	Numérique
	1979	1 / 15 000	Cartothèque UQÀM	Papier
	1998	1 / 15 000	Cartothèque UQÀM	Papier
	2009	1 m/pixel	DOQ (Digital Orthophoto Quad), USGS	Numérique
Rivière Yamaska Sud-Est	1950	Entre 1 / 16 000 et 1 / 18 000	Cartothèque UdeM (amont de Cowansville) Cartothèque UQÀM (aval de Cowansville)	Papier
	1964-65	1 / 15 840	Cartothèque UQÀM	Papier
	1979	1 / 15 000	Cartothèque UQÀM	Papier
	1997-1998	1 / 15 000	Cartothèque UQÀM	Papier
	2009	0.3 m/pixel	MRC Brome-Missisquoi	Numérique

5.2.1.1 Numérisation des photographies

La numérisation des photographies aériennes papier a été effectuée avec une résolution de 600 ppp. Partant d'une échelle de photographie entre 1/15000 et 1/20000, cette

résolution permet d'obtenir une résolution finale entre 0.64 et 0.85 m/pixel, du même ordre de grandeur que la résolution de 1 m/pixel des fichiers DOQ (*Digital Orthophoto Quad*) de l'USGS ou que la résolution de 0.3 m/pixel des photographies de 2009 de la MRC Brome-Missisquoi, ce qui, d'après Hugues *et al.* (2006), permet de limiter la perte de données lors du géoréférencement. Cette résolution est également similaire à celle utilisée par d'autres auteurs pour la mesure de la mobilité du lit des rivières, comme De Rose et Basher (2011) qui utilisent des images à 0.75 m/pixel.

5.2.1.2 Géoréférencement

Le géoréférencement a été réalisé en utilisant entre 10 et 18 points de contrôle par photographie. Le référencement a été effectué par rapport aux photographies de 2009, en prenant des points de contrôle proches du cours d'eau, comme suggéré par Hugues *et al.* (2006). D'après les recommandations de ces mêmes auteurs, une transformation polynomiale du second ordre et une convolution cubique ont été sélectionnées pour le calcul des matrices géoréférencées. L'erreur de positionnement a été calculée à partir de deux photographies en prenant des points-tests indépendamment des points utilisés pour le géoréférencement, comme préconisé par Hugues *et al.* (2006). Le géoréférencement de l'ensemble des photos a été par ailleurs effectué en conservant un RMSE (*Root Mean Square Error*) inférieur à 4 mètres.

L'erreur de géoréférencement des photographies a été mesurée avec 11 points tests sur une photographie de 1979 sur la rivière de la Roche et avec 10 points tests sur une photographie de 1950 sur la Yamaska Sud-Est (secteur de Cowansville). L'erreur moyenne de géoréférencement a été estimée à environ 3,2 mètres, et inférieure à 5,2 mètres dans 95% des cas (considérant une distribution normale des erreurs). Cette erreur

est comparable aux estimations d'erreurs dans des études similaires : des erreurs moyennes de 3,6 et 3,7 mètres ont été obtenues pour deux échantillons de points de contrôle dans l'analyse de Gurnell (1997) et une moyenne approximative de 3,8 mètres a été obtenue sur les différentes expériences de Hugues *et al.* (2006). L'erreur pour un intervalle de confiance de 95%, arrondie à 5 mètres, est utilisée dans les méthodologies de détermination des espaces de mobilité.

5.2.1.3 Numérisation des cours d'eau

Le chenal principal des cours d'eau a été numérisé sur les photographies géoréférencées, visualisées à une échelle entre 1:800 et 1:1500, en plaçant un point tous les 5m approximativement. Ce procédé a été appliqué sur les deux berges de la rivière Yamaska Sud-Est en aval du confluent avec le ruisseau de Jackson (numérisation double-ligne), et avec une seule ligne placée au centre du chenal pour la partie plus en amont de la Yamaska Sud-Est ainsi que pour la rivière de la Roche (la faible largeur des cours d'eau ainsi que la couverture forestière riveraine ne permettant pas d'y distinguer suffisamment les berges). Dans le cas de numérisation double-ligne, le contour de berge a été effectué en prenant la largeur plein-bord de la rivière. Lorsque le relief de la berge n'est pas visible à cause de la végétation, le positionnement des berges a été effectué en suivant les troncs de la première rangée d'arbres.

5.2.2 Détermination du corridor de mobilité

Le corridor de mobilité est essentiellement déterminé par l'amplitude maximale des méandres pour chaque tronçon homogène, tel qu'illustré à la figure 5-1. Une fois le corridor basé sur l'amplitude des méandres établie, l'espace de mobilité est ensuite

restreint par les dépôts de surface non érodables ou la lithologie présents à l'intérieur de ce corridor.

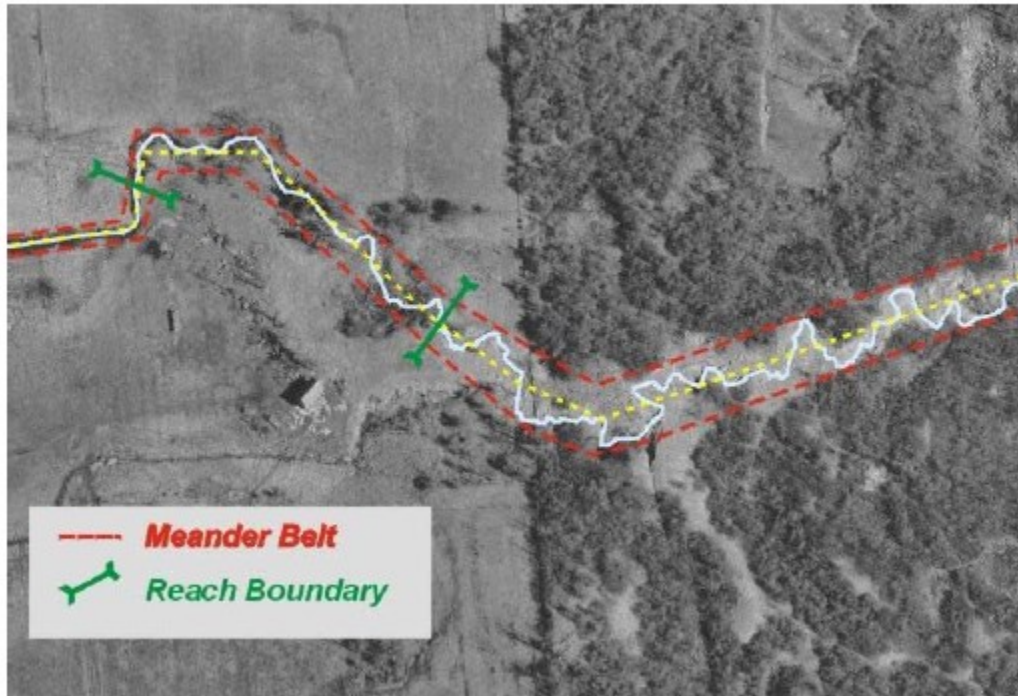


Figure 5-1 – Corridor de mobilité, basé sur l'amplitude maximale des méandres de chaque tronçon homogène
(Parish Geomorphic, 2004)

5.2.2.1 Détermination de l'amplitude maximale des méandres par tronçon

L'amplitude des méandres doit donc être déterminée séparément pour chaque tronçon géomorphologiquement homogène, c'est-à-dire pour chaque portion de rivière présentant des caractéristiques géomorphologiques uniformes. Les changements de type fluvial, de pente, de sinuosité, de taille de sédiments, de confinement, ainsi que les variations de débit (confluence) permettent la détermination des tronçons. Le découpage en tronçon a

été effectué en considérant les cartes, données numériques et les observations de terrain listées au tableau 5-2.

Tableau 5-2 – Critères pour l’identification des tronçons homogènes

Critère pour le découpage en tronçon	Source de données
Variations de pente	Courbes de niveau aux 10m, Base de Données Topographiques du Québec
Confluences avec les tributaires principaux	Réseau hydrographique, Base de Données Topographiques du Québec
Changements de configuration en plan du chenal	Photographies aériennes de 2009
Changements dans les dépôts de surface traversés	Cartes de dépôts de surface, Ministère des Forêts, Service des inventaires forestiers
Changements dans la taille de sédiments du lit et des berges	Observations de terrain
Changements dans la morphologie du cours d’eau (largeur, vitesse de courant, présence de seuils et mouilles, présence de bancs, incision)	Observations de terrain

L’axe principal des méandres, qui correspond à l’axe de la vallée, est ensuite déterminé sur la base de la position de la rivière sur les photographies les plus récentes, tel que préconisé par Parish Geomorphic (2004). Des corrections ont cependant été apportées afin d’incorporer les tracés plus anciens de la rivière et les bras morts. En effet, la position de la rivière sur les photographies les plus récentes peut occasionnellement être

décentrée par rapport à l'axe principal des méandres historiquement observé, sans pour autant qu'il soit considéré que l'axe principal des méandres se soit déplacé dans le temps (figure 5-2). Afin de tracer l'axe principal des méandres, il est par ailleurs nécessaire d'évaluer le degré de confinement de la rivière pour déterminer si les boucles observées dans le tracé de la rivière sont imposées par la topographie environnante ou bien sont de véritables méandres. Selon le degré de confinement, l'axe principal des méandres suit en effet plus ou moins fidèlement le tracé de la rivière (figure 5-3). Pour chaque tronçon homogène, le confinement de la rivière a été évalué en fonction des observations de terrain et de l'étendue de la plaine alluviale (cartographiée par le Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'UQAR).

Une fois l'axe principal des méandres déterminé, l'amplitude maximale des méandres peut être calculée. Cette distance est la distance entre l'axe principal des méandres et le point le plus éloigné de la rivière sur l'ensemble des années disponibles. L'amplitude maximale des méandres est ensuite augmentée de 5 mètres afin d'obtenir un corridor de mobilité qui prenne en compte l'erreur de géoréférencement de manière conservatrice.

Si, selon les données historiques disponibles, il apparaît par ailleurs que l'amplitude maximale des méandres a significativement augmenté au cours du temps, l'augmentation historique est extrapolée sur 50 ans pour déterminer le corridor de mobilité, d'une manière similaire à la méthode de Parish Geomorphie (2004).

5.2.2.2 Érodabilité des terrasses

Dans les cas où la rivière est confinée par des terrasses non érodables, le corridor de mobilité déterminé par l'amplitude maximale des méandres peut inclure des zones non

mobilisables par la rivière. Dans ces situations, tel qu'indiqué par Kline et Cahoon (2010), l'espace de mobilité des rivières peut être déterminé par la zone alluviale présente. Cette méthodologie, développée pour le Vermont, permet la cartographie de l'espace de mobilité par l'étude des cartes de dépôt de surface et de la topographie. Bien que les données topographiques et la cartographie des dépôts de surface disponibles pour les rivières Yamaska Sud-Est et de la Roche ne soient pas assez précises, la cartographie de la plaine alluviale établie par le Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'UQAR permet la mise en application de cette méthode. Pour chaque tronçon homogène, le confinement de la rivière a été évalué en fonction des observations de terrain et des patrons de mobilité observés sur les photographies aériennes. Ainsi, à titre d'exemple, sur la rivière de la Roche, la partie aval de la rivière montre une sinuosité régulière et une amplitude de méandre constante (figure 5-4). Sur ce tronçon, la cartographie de la plaine alluviale permet de constater que les méandres ont érodé les terrasses, ce qui a été confirmé sur le terrain par l'observation de signes d'érosion sur les méandres accotant les terrasses. Ce type d'analyse permet pour chaque tronçon de déterminer si les terrasses sont érodables ou non. Dans le cas de terrasses considérées comme non érodables, le corridor de mobilité est alors restreint à la plaine alluviale.

Pour la rivière Matane, la disponibilité d'un modèle d'élévation numérique de haute précision (données Lidar, fournies par le Ministère de la Sécurité Publique), ainsi que de cartes de dépôts de surface, a permis pour ce cours d'eau une distinction plus précise des terrasses, des murs de vallées et de la plaine alluviale. L'érosion historique des terrasses a été mesurée pour ce cours d'eau afin de déterminer leur érodabilité.

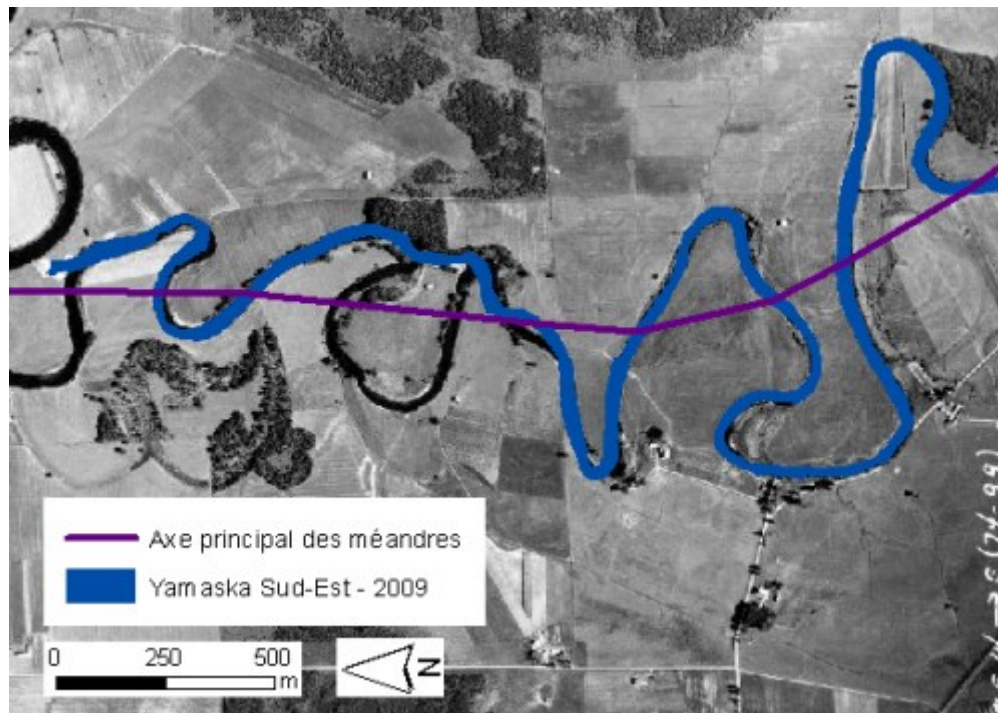


Figure 5-2 – Position de l’axe principal des méandres avec prise en compte des positions historiques du chenal.

La photographie date de 1950. À la seule vue de la position du chenal en 2009 (en bleu), la partie aval (à gauche de l’image) semble avoir un axe principal de méandre décalé vers le haut de l’image, et une amplitude de méandre inférieure à la partie amont à droite de l’image. L’étude des positions historiques du chenal montre que deux recouvrements de méandres ont eu lieu entre 1950 et 2009, ce qui modifie la position de l’axe principal des méandres.

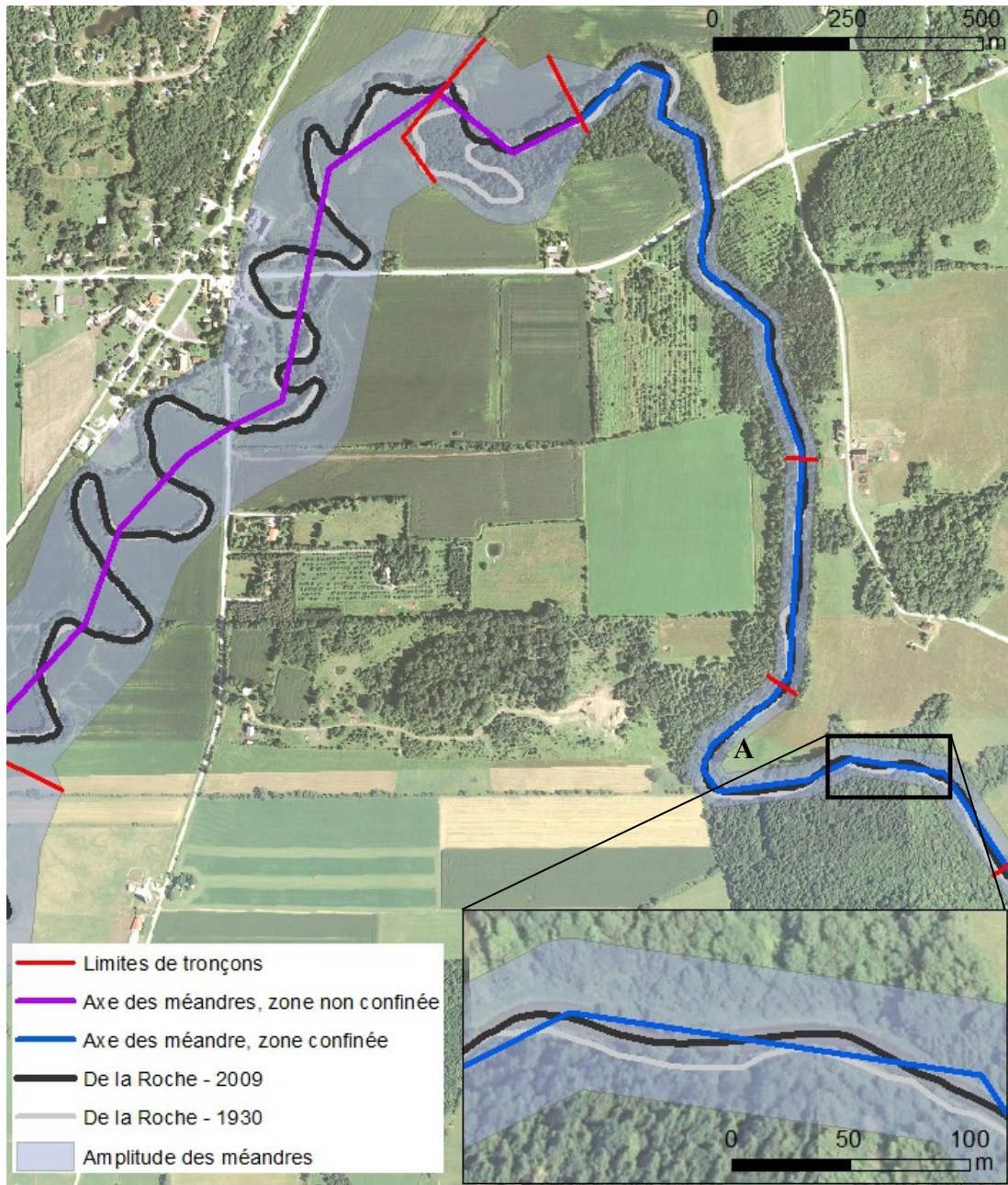


Figure 5-3 – Tronçons homogènes, axe des méandres et amplitude des méandres sur la rivière de la Roche.

Les tronçons situés en amont, à l'est, sont fortement confinés par la topographie, contrairement aux tronçons plus en aval, à l'ouest. Sur la partie amont de la rivière, l'amplitude de mobilité est déterminée par des mouvements latéraux de la rivière à une échelle plus fine (carte encadrée). Les formes visibles à une échelle plus large, telle que la boucle A, sont imposées par la topographie et ne constituent pas de véritables méandres. L'axe des méandres, bleu en amont, violet en aval, doit donc suivre plus fidèlement la rivière en amont qu'en aval.

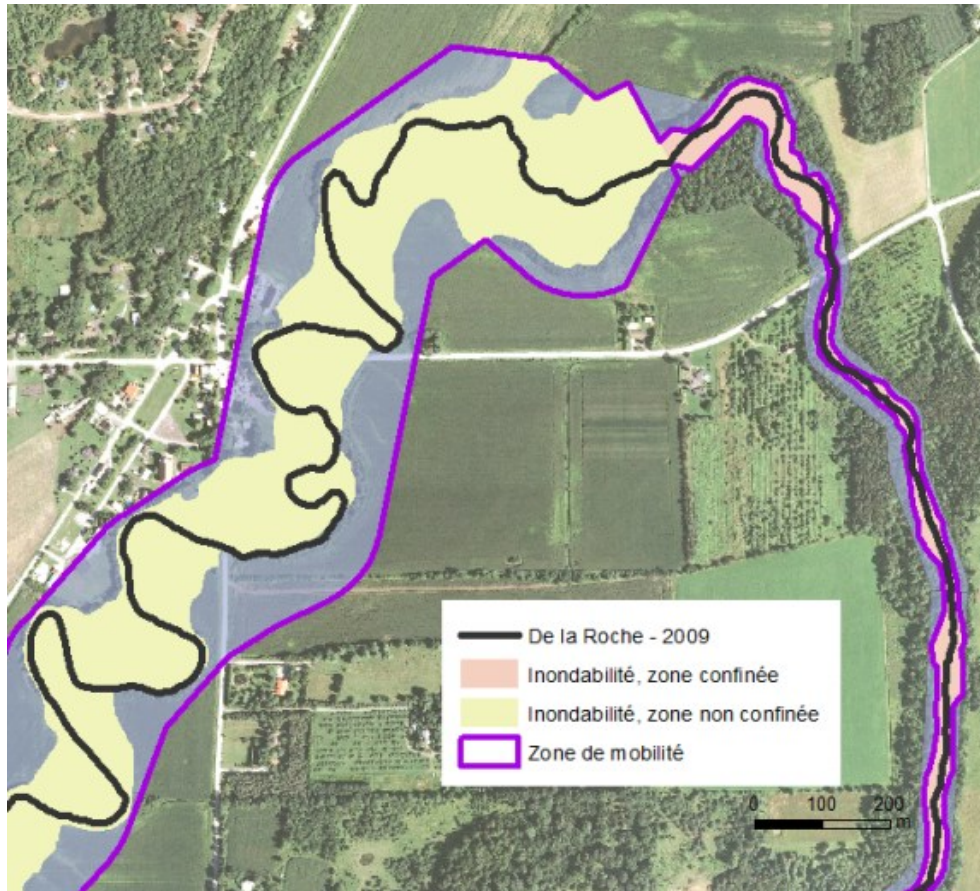


Figure 5-4 – Détermination de l’espace de mobilité selon la nature des terrasses pour la rivière de la Roche.

La limite de l’espace d’inondabilité permet de situer l’emplacement des terrasses. Sur cet exemple, les tronçons situés plus à l’ouest ont des terrasses qui peuvent être érodées par la rivière, alors que les tronçons situés plus à l’est ont un comportement inverse.

5.2.3 Détermination de l’espace des aléas de mobilité

L’espace des aléas de mobilité est une cartographie de la mobilité possible du chenal des rivières à court terme (50 ans). Cet espace est composé de plusieurs éléments évalués et cartographiés séparément : 1) les zones probables de migration, déterminées par extrapolation des taux d’érosion historiques, 2) les zones probables d’avulsion, 3) les

zones à fort dynamisme, pour lesquelles l'extrapolation des taux d'érosion historiques n'est pas possible, 4) les zones protégées par enrochement.

5.2.3.1 Détermination des zones probables de migration

L'érosion des berges des rivières peut être mesurée en calculant un taux d'érosion historique sur des transects espacés régulièrement le long des rivières (e.g. Gurnell, 1997). Le taux d'érosion historique peut ensuite être extrapolé pour obtenir une estimation des zones probables de migration future (figure 5-5). Cette méthodologie a été appliquée grâce à l'utilisation du logiciel DSAS (Thieler *et al.*, 2009), *Digital Shoreline Analysis System*, pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est. Une analyse similaire a été conduite sur la rivière Matane par Buffin-Bélanger *et al.* (2011). Conçu originellement par le USGS pour l'étude de l'évolution des zones côtières, DSAS est un outil ArcGIS qui peut également être employé pour l'étude de la migration des rivières (ex. Curran et McTeague, 2011). Cet outil permet de créer des transects le long des rivières (placés au 5 mètres), en suivant une ligne tracée perpendiculairement à la direction de migration. Des corrections ont ensuite été manuellement effectuées aux transects générés automatiquement, afin de mieux les faire concorder avec les directions d'érosion et la courbure des méandres. Pour chaque transect, DSAS permet d'obtenir une interpolation linéaire du mouvement du chenal (incluant le taux d'érosion historique, le coefficient de détermination et l'intervalle de confiance). Pour la rivière Yamaska Sud-Est, numérisée en double ligne, l'interpolation a été effectuée à partir des points situés à mi-chemin entre les berges. Une fois l'interpolation réalisée, une extrapolation est faite sur 50 ans à partir du taux d'érosion mesuré pour chaque transect, dans la direction du transect. Seuls les points extrapolés pour lesquels l'interpolation du taux d'érosion donne

un coefficient de détermination R^2 supérieur à 0.5 ont été conservés. Les points extrapolés situés en deçà de l'erreur de géoréférencement, c'est-à-dire à moins de 5 mètres du chenal, ont également été supprimés afin de ne conserver que les zones d'aléas à une distance significative du chenal.

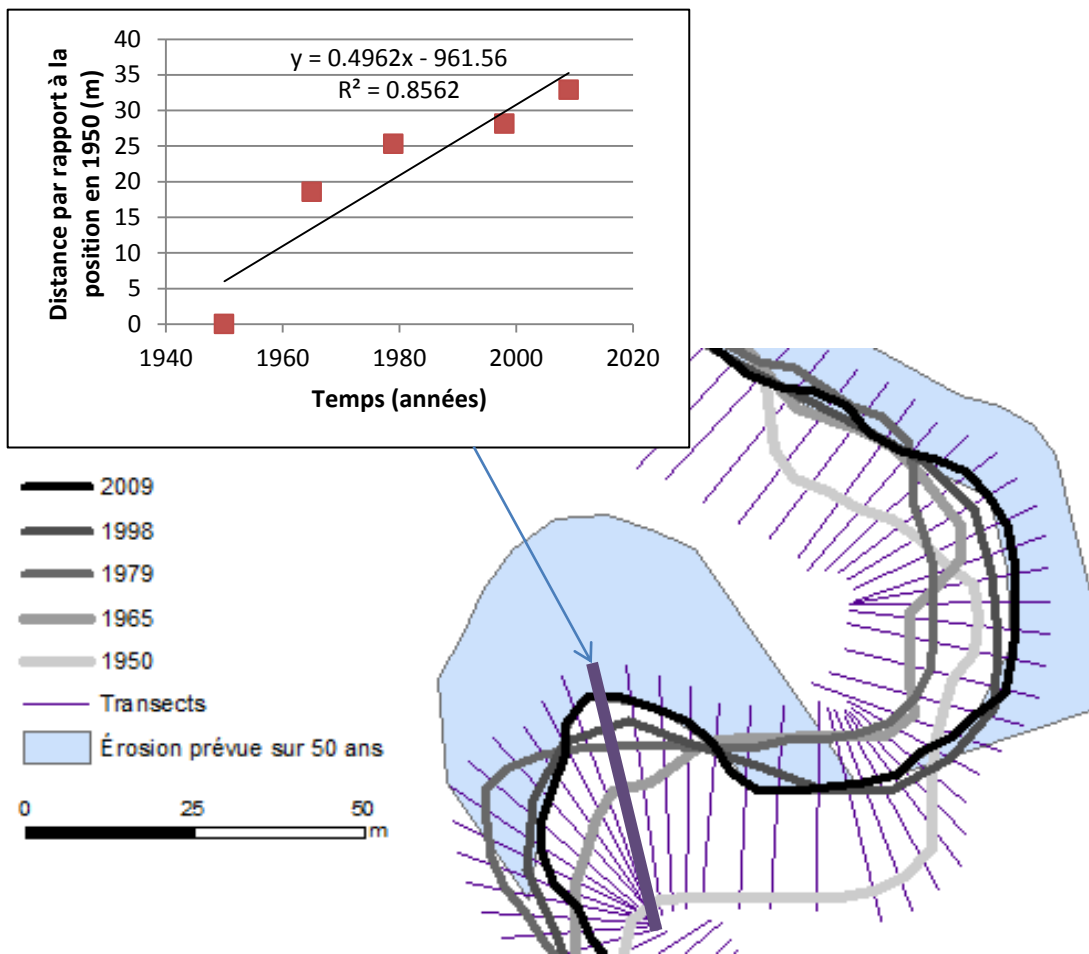


Figure 5-5 – Transects et zones d'érosion prévues sur 50 ans sur la rivière North-Branch, avec exemple d'interpolation du taux d'érosion le long d'un transect (graphique encadré).

5.2.3.2 Détermination des zones probables d'avulsion

Les risques de recoupement de méandres ont été évalués sur les trois rivières étudiées. Pour établir une cartographie de ces risques, deux méthodes sont utilisées. La première

méthode consiste à observer sur les photographies aériennes des traces d'érosion sur la plaine alluviale. Ces traces permettent d'identifier des zones où des recoupements sont en cours lors des crues (figure 5-6). La deuxième méthode consiste à considérer empiriquement que les méandres présentant un pincement d'une largeur inférieure à 4 fois la largeur de la rivière sont susceptibles de se recouper. Lors de l'application de cette deuxième méthode, les probabilités de migration sont incluses et le critère de 4 fois la largeur de la rivière est appliqué à partir de la position projetée de la rivière dans 50 ans, obtenue par la méthode d'extrapolation des taux d'érosion.



Figure 5-6 – Début de recoupement de méandre sur la rivière de la Roche.

5.2.3.3 *Prise en compte des tronçons à fort dynamisme*

La mesure de taux d'érosion interpolé linéairement dans le temps et dans l'espace (suivant une ligne droite définie par le transect), telle qu'utilisée pour déterminer les zones probables de migration, s'applique mal aux tronçons où un dynamisme important

est présent (figure 5-7). Dans ces situations, l'évaluation du taux de renouvellement de la plaine alluviale est un indicateur souvent utilisé (ex. O'Connor *et al.*, 2003, Piégay *et al.*, 2005, Konrad 2011). Sur l'ensemble des tronçons des rivières étudiées, le taux de renouvellement du corridor de mobilité a donc été calculé. Pour cela, il est nécessaire dans un premier temps d'obtenir pour chaque tronçon la superficie moyenne des terres érodées par année par la rivière en mesurant la superficie des polygones formés par les différentes positions historiques du chenal. Le taux de renouvellement est ensuite obtenu en divisant cette superficie moyenne des terres érodées par année par la superficie du corridor de mobilité.

Suite au calcul des taux de renouvellement sur l'ensemble des tronçons des trois rivières étudiées, il a été constaté que la méthode d'extrapolation des taux d'érosion interpolés linéairement le long de transects est difficilement applicable pour les tronçons dont le taux de renouvellement est inférieur à 200 ans. Ces tronçons ont donc été considérés comme fortement dynamiques et l'ensemble de leur corridor de mobilité a alors été reclassé dans l'espace des aléas de mobilité. Du point de vue des aléas, un taux de renouvellement de 200 ans indique une érosion de 25% du corridor de mobilité sur 50 ans (horizon temporel de l'espace des aléas de mobilité), ce qui constitue une proportion jugée suffisamment importante du corridor de mobilité pour justifier son reclassement dans l'espace des aléas de mobilité.

L'erreur de position du chenal pouvant prendre une proportion importante dans les calculs des taux de renouvellement pour les tronçons ayant une faible largeur de plaine alluviale, les tronçons pour lesquelles l'erreur moyenne de positionnement pouvait

contribuer à plus de 50% des taux de renouvellement calculés n'ont pas été reclassés dans l'espace des aléas de mobilité, quel que soit leur taux de renouvellement.

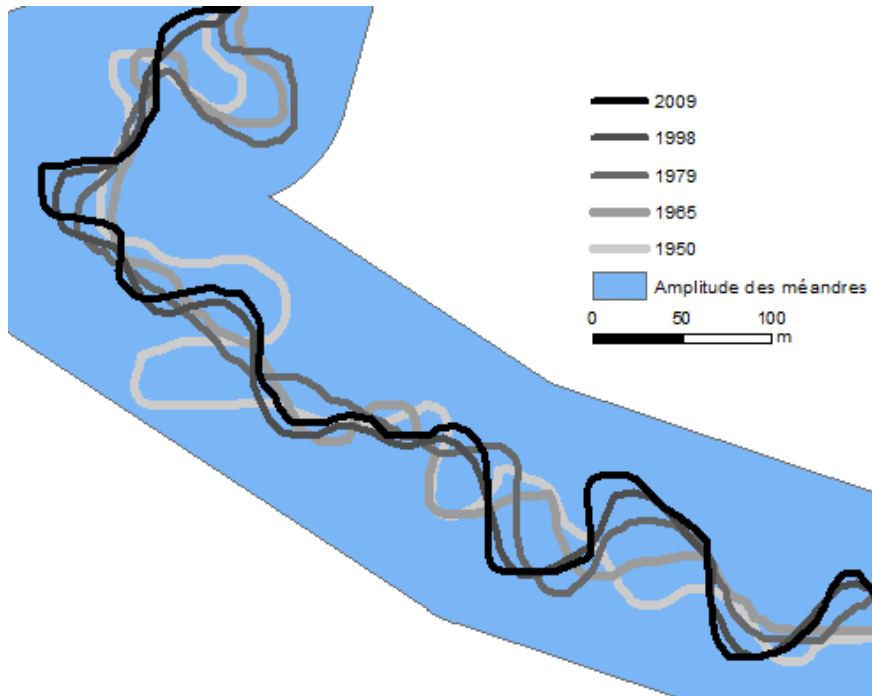


Figure 5-7 – Exemple de tronçon à fort dynamisme.

Les taux de migration, non linéaires, et les nombreux recoupements intervenus durant la période historique observée, ne permettent pas l'utilisation de transects et l'extrapolation des taux de migration (rivière North-Branch).

5.2.3.4 Prise en compte des stabilisations de berge

Pour prendre en compte le dynamisme probable des zones stabilisées, pour lesquelles la mobilité historique peut ne pas être représentative de la mobilité naturelle, une zone tampon est ajoutée à l'espace des aléas de mobilité derrière les secteurs stabilisés. Cette zone permet de représenter l'érosion naturelle qui devrait avoir lieu au niveau des berges stabilisées. Pour chaque tronçon, le 90^{ième} centile supérieur des taux d'érosion interpolés sur le tronçon est appliqué sur 50 ans pour obtenir la largeur de l'espace des aléas de

mobilité à ajouter. Cette méthodologie permet de prendre en considération le dynamisme propre au tronçon, en prenant un taux élevé, car l'hypothèse est faite que les stabilisations sont réalisées principalement dans les secteurs les plus dynamiques, tout en excluant les valeurs extrêmes qui peuvent être dues à des particularités locales non généralisables à l'ensemble du tronçon.

5.2.4 Mesure de la puissance spécifique

Afin de déterminer les facteurs influençant la mobilité, la pente, le débit plein-bord et la largeur de la rivière ont été mesurés le long des rivières. Ces données ont permis d'établir les puissances spécifiques des rivières. Pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, la pente de la surface de l'eau a été mesurée sur le terrain au moyen d'un DGPS (Trimble R8 GNSS), et la largeur déterminée à partir des photographies aériennes les plus récentes. Le débit plein-bord a été déterminé à partir de la superficie du bassin versant, en utilisant une relation de géométrie hydraulique établie à partir d'un échantillon de 20 rivières du Vermont (VANR, 2006) ayant une superficie de bassin versant entre 7,8 et 360 km². L'interpolation réalisée sur cet échantillon de rivière donne la relation débit plein-bord – aire drainée suivante :

$$Q = 0,3376 A^{0,9487} (R^2 = 0,92)$$

où Q est le débit plein-bords (en m³/s) et A est la superficie du bassin versant (en km²). L'application de cette relation au niveau des stations CEHQ pour la rivière de la Roche et Yamaska Sud-Est donne des débits plein-bords de 19,2 et 54,9 m³/s, respectivement (aire drainée aux stations : 70,9 et 214 km²). Ces résultats sont proches des débits de

réurrence 1,5 an calculés avec les séries historiques, respectivement de 15,7 et 57,5 m³/s, au regard des données disponibles (11 ans et 44 ans).

Les mesures de puissance spécifique ont également été effectuées sur un affluent de la rivière Yamaska Sud-Est, le ruisseau de Jackson (voir chapitre 7). Les mesures de taux d'érosion du chenal au 5 mètres par interpolation sur le ruisseau de Jackson ont également été effectuées selon la méthodologie exposée à la section 5.2.3. Pour la rivière Matane, des algorithmes ont été développés pour permettre d'automatiser l'extraction de la largeur et de la pente à partir des données Lidar disponibles pour ce cours d'eau. Ce processus d'extraction dépassant les objectifs fixés pour le présent document, il ne sera pas présenté ici. Celui-ci est exposé en détail par Biron *et al.* (2013-b).

5.3 Résultats et discussion

L'ensemble de la cartographie des espaces de mobilité, réalisée pour trois rivières, est disponible dans un rapport Ouranos transmis à l'ensemble des partenaires du projet (Biron *et al.*, 2013-a). Un exemple de cette cartographie est présenté à la figure 5-9. L'application de la méthodologie pour réaliser cette cartographie a permis de mettre en évidence plusieurs limites méthodologiques, ainsi que de constater l'influence des interventions humaines sur l'espace de mobilité.

5.3.1 Détermination du corridor de mobilité

La détermination du corridor de mobilité par l'amplitude des méandres est une méthodologie couramment utilisée pour déterminer l'espace de mobilité (e.g. Parish Geomorphic, 2004, Kline et Cahoon, 2010). Bien que la détermination des tronçons

homogènes fasse intervenir une certaine subjectivité, l'utilisation de l'amplitude des méandres demeure une méthode robuste. Cependant, pour les situations où la rivière est fortement confinée par des terrasses ou des murs de vallée, comme c'est le cas pour la rivière Matane, l'amplitude des méandres est une méthode pouvant sous-estimer l'espace de mobilité réel (figure 5-8). Une largeur plus importante que l'amplitude des méandres peut en effet parfois être mobilisable par la rivière, dans le cas où l'amplitude effective des méandres est inférieure à l'amplitude que ceux-ci auraient s'ils n'étaient pas confinés. Il n'est toutefois pas possible, bien souvent, de pouvoir évaluer l'amplitude naturelle des méandres dans cette situation. Par ailleurs, intégrer toute la plaine alluviale dans le corridor de mobilité pourrait amener à une surestimation de cet espace, si la largeur de la plaine devient ponctuellement plus large que l'amplitude naturelle des méandres. Conséquemment, malgré les réserves formulées, la méthode par amplitude maximale des méandres a été conservée même en situation confinée.

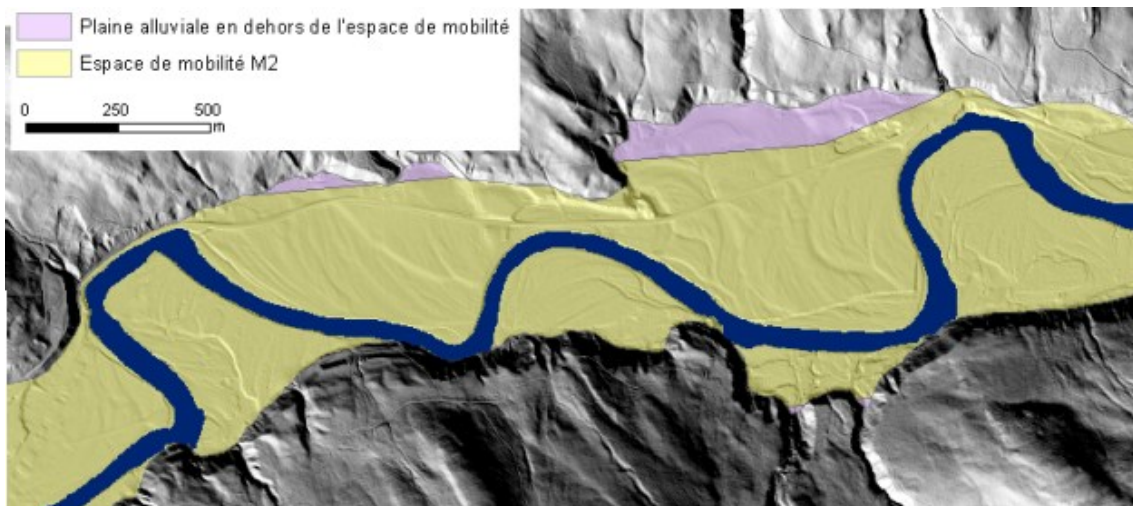


Figure 5-8 – Application de la méthode d'amplitude maximale des méandres en milieu confiné (rivière Matane).

(Ombrage réalisé à partir du Lidar fourni par le Ministère de la Sécurité Publique)

La méthode par amplitude de méandre est également moins bien adaptée pour les situations où le cours d'eau a été ou est actuellement fortement modifié par les activités humaines, ou bien encore là où une instabilité est présente. Des méthodes palliatives ont été appliquées dans ces cas, en accord avec la méthodologie de Parish Geomorphic (2004). La figure 5-10 illustre les effets des interventions anthropiques sur l'espace de mobilité des cours d'eau et les méthodes utilisées pour définir le corridor de mobilité dans un tel contexte. Sur cette figure, le village de Sutton Junction, au sud de la carte (point A), est un secteur où la rivière est maintenue artificiellement rectiligne. Le secteur juste en aval du village a très probablement été linéarisé peu avant 1950, date de la première photographie disponible, et est actuellement en cours de reméandrement. Pour déterminer le corridor de mobilité dans ce contexte, le taux de migration récent observé au point B, là où l'érosion est la plus forte, a été extrapolé sur 50 ans. La largeur du corridor résultant peut être comparée aux cicatrices de méandres visibles sur la plaine alluviale. L'adéquation de ces deux méthodes confirme la validité des choix effectués pour la largeur du corridor pour ce secteur. Il est également considéré sur le secteur visualisé à la figure 5-10 que le tronçon de rivière artificialisé, dans le village de Sutton Junction, a un comportement similaire au tronçon en aval précédemment décrit. La largeur du corridor précédemment calculé peut donc être transposée au secteur artificialisé.

Les méthodes employées dans les cas où les interventions humaines ont modifié le comportement des cours d'eau ont pour but de permettre une cartographie de l'espace naturel de mobilité, c'est-à-dire dans le cas où les occupations humaines n'auraient pas

modifié cet espace. Ainsi les zones urbaines, tel le village de Sutton Junction sur figure 5-10, de même que les infrastructures de transport, peuvent être incluses dans l'espace de mobilité. Cependant, lorsque des modifications humaines ont eu lieu avant les premières photographies disponibles, il est possible que l'espace de mobilité cartographiée soit établi sur la base de ces modifications, de par la méthodologie employée. Ainsi, au point C de la figure 5-10, des cicatrices de méandres sont visibles de l'autre côté de la voie ferrée, par rapport à l'emplacement actuel de la rivière. Il est fort possible que lors de la construction de la voie ferrée, à la fin du 19^{ième} siècle, la rivière ait été déplacée. L'axe principal de la rivière ayant été changé, le corridor de mobilité cartographié a été basé sur le nouvel axe de la rivière. Le déplacement du pont de la voie ferrée pour mieux respecter l'axe naturel de la rivière étant peu probable, le corridor cartographié représente le corridor de mobilité dans la situation actuelle.

Sans avoir nécessairement un déplacement de l'axe de la rivière, comme à la figure 5-10, les ponts sont également des éléments venus perturber l'espace de mobilité des rivières. Il est attendu que les ponts situés en bordure du corridor de mobilité auront des conséquences géomorphologiques plus importantes que ceux situés dans l'axe principal des méandres (l'érosion étant plus importante aux extrémités des méandres qu'aux points d'inflexion entre les méandres). Les ponts les plus problématiques ont donc été identifiés dans le rapport produit pour les partenaires du projet (Biron *et al.*, 2013-a).

Pour les secteurs où les interventions humaines sont importantes, l'espace de mobilité cartographié possède malgré tout une incertitude plus grande que pour les secteurs naturels. En particulier les secteurs de Cowansville sur la Yamaska Sud-Est, et de la ville de Matane sur la rivière Matane, sont des centres urbains dans lesquels les rivières ont été

fortement modifiées, et pour lesquels il n'existe pas d'information sur le comportement des rivières avant l'urbanisation. La cartographie de l'espace de mobilité pour ces secteurs doit donc être considérée avec une plus grande circonspection.

Finalement, le dernier cas particulier pour l'application de la méthode de détermination de l'amplitude maximale des méandres concerne les zones de deltas fluviaux. En effet, sur ces zones, les risques d'avulsion sont plus importants et la trajectoire future après avulsion peut être située n'importe où sur le delta, sans lien avec le tracé actuel de l'axe principal des méandres. Sur les rivières étudiées, deux secteurs deltaïques ont été identifiés : les embouchures de la rivière Matane dans le Saint-Laurent et de la Yamaska Sud-Est dans le lac Davignon. Dans le cas de la rivière Yamaska Sud-Est, l'amplitude de mobilité n'a pas été évaluée sur ce tronçon, et l'espace de mobilité a été évalué comme étant l'ensemble de la plaine alluviale. Pour la rivière Matane, la présence de méandres dans la partie deltaïque a permis la cartographie d'un corridor basé sur l'amplitude maximale des méandres. Dans ce dernier cas, le corridor de mobilité déterminé comprend cependant une incertitude plus forte que pour les autres tronçons.

Déterminer si les terrasses peuvent être érodées ou non, et si par conséquent elles limitent ou non l'espace de mobilité, est également une étape méthodologique possédant certaines limitations. Les signes géomorphologiques concernant l'érodabilité des terrasses n'étant pas toujours évidents, et les informations sur les matériaux constituant ces terrasses et l'épaisseur des dépôts étant rarement disponibles, une approche conservatrice (inclusion dans le corridor de mobilité) a été adoptée dans les cas litigieux. Il en résulte que certaines terrasses non (ou très peu) érodables peuvent être incluses occasionnellement dans la cartographie produite. Pour la rivière Matane, une analyse plus poussée de

l'érodabilité des terrasses a pu être effectuée, grâce en particulier à la disponibilité de données Lidar et d'une cartographie des dépôts de surface qui ont permis une distinction entre les murs de vallées et les terrasses présentes dans la vallée, ainsi que leur nature. À partir des mesures d'érosion historique réalisées par le Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluvial de l'UQAR, effectués tous les 50m le long de la rivière sur la période 1993 - 2009, les taux d'érosion pour chaque point où la rivière semblait être en contact avec les terrasses depuis 1993 ont été extraits. La distance maximale d'érosion observée sur les terrasses étant de 2.6m, quelle que soit la nature des terrasses, cette distance est inférieure à l'erreur moyenne de mesure (3m). Il a donc été conclu que les terrasses de la rivière Matane ne peuvent pas être érodées par la rivière à court terme.



Figure 5-9 – Exemple de cartographie des espaces de mobilité (M1 : espace des aléas de mobilité, M2 :corridor de mobilité) et d’inondabilité.

(Cartographie de l’espace d’inondabilité et conception cartographique réalisées par le Laboratoire de recherche en géomorphologie et dynamique fluviale de l’UQAR).

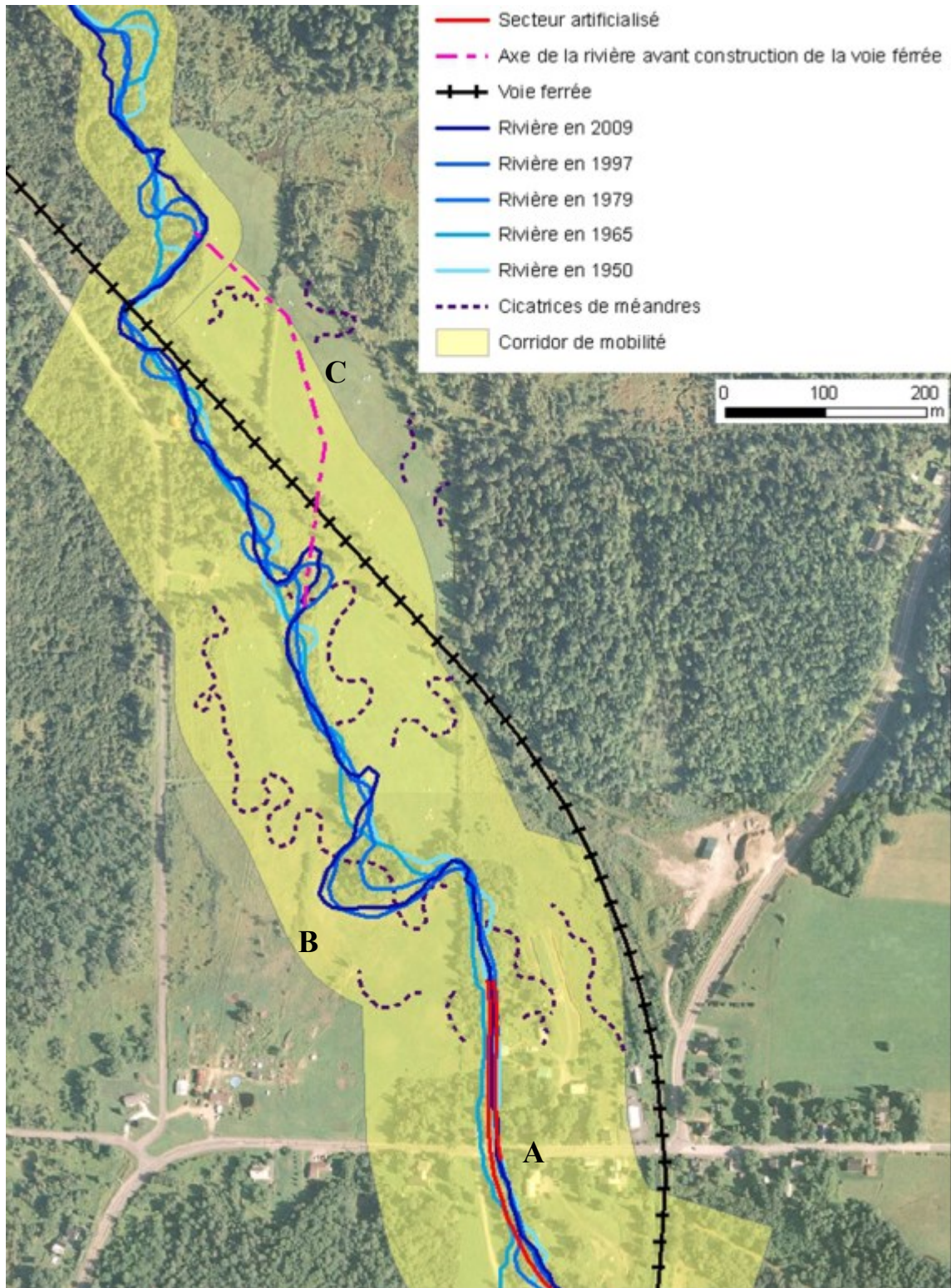


Figure 5-10 – Perturbations anthropiques sur la partie amont de la rivière Yamaska Sud-Est

Pour ce qui concerne la gestion du territoire, il est important de remarquer que le corridor de mobilité est déterminé selon une méthodologie indépendante du dynamisme des tronçons. Deux tronçons de rivière ayant une largeur de corridor équivalente peuvent en effet montrer des taux d'érosion très différents. Conséquemment, la cartographie du corridor de mobilité est un outil qui permet de mettre en évidence des zones d'intérêt écologique, mais qui est étrangère à la notion de risque. Cette limitation peut être importante pour la gestion des cours d'eau, car si le corridor de mobilité répond à des impératifs de protection environnementale, la protection des populations contre les effets potentiellement négatifs de la migration des cours d'eau est un élément important à prendre en compte. À l'échelle du tronçon, la mesure des temps de renouvellement de la plaine alluviale, c'est-à-dire le temps mis par la rivière pour balayer l'ensemble de son corridor de mobilité, peut permettre de mesurer le dynamisme de la rivière. Cette mesure pourrait par ailleurs être intégrée dans la cartographie afin d'obtenir une évaluation sommaire de l'aspect temporel de la mobilité par tronçon. Dans le cadre de la présente étude, la cartographie des aléas de mobilité vient apporter cette information temporelle manquante au corridor de mobilité, à une échelle plus fine que le tronçon dans la plupart des cas.

5.3.2 Détermination de l'espace des aléas de mobilité

Dans des conditions de dynamisme relativement faible par rapport à la durée de la période d'interpolation et l'horizon temporel voulu, l'extrapolation des taux de migration peut permettre de prédire les zones de migration future. La figure 5-5 illustre le résultat de cette démarche. Cependant, tel qu'énoncé dans les choix méthodologiques effectués pour la cartographie de l'espace des aléas de mobilité, l'extrapolation des taux d'érosion

historique linéairement, dans le temps et dans l'espace, est une simplification ayant certaines limites. Pour les tronçons les plus dynamiques, le reclassement du corridor de mobilité dans l'espace des aléas de mobilité basé sur un seuil de renouvellement de la plaine alluviale permet en partie de pallier ces limites. Pour les zones où le taux de renouvellement de la plaine alluviale est plus faible, il est toutefois possible que l'évolution d'un méandre particulièrement dynamique ne puisse être modélisée correctement par extrapolation. Il a donc été nécessaire, ponctuellement, d'ajouter aux zones obtenues par extrapolation des corrections afin de prendre en compte la direction de la migration des méandres (figure 5-11). Ces ajustements ont principalement été ajoutés sur des secteurs instables, en cours de réméandrement suite à une linéarisation.

La méthode de détermination des zones susceptibles d'être érodées dans les 50 prochaines années comporte également une très forte incertitude. L'erreur de géoréférencement des photographies aériennes et de numérisation des cours d'eau est en effet relativement importante par rapport à la magnitude des phénomènes observés. Ainsi, sur la Yamaska Sud-Est, pour la mesure des taux d'érosion, seuls 43% des points utilisés pour la prédiction de l'érosion des berges montrent une tendance significative (à 95%, considérant une erreur moyenne de positionnement de 3 mètres). La cartographie de l'espace des aléas de mobilité est donc globalement une cartographie indicative.

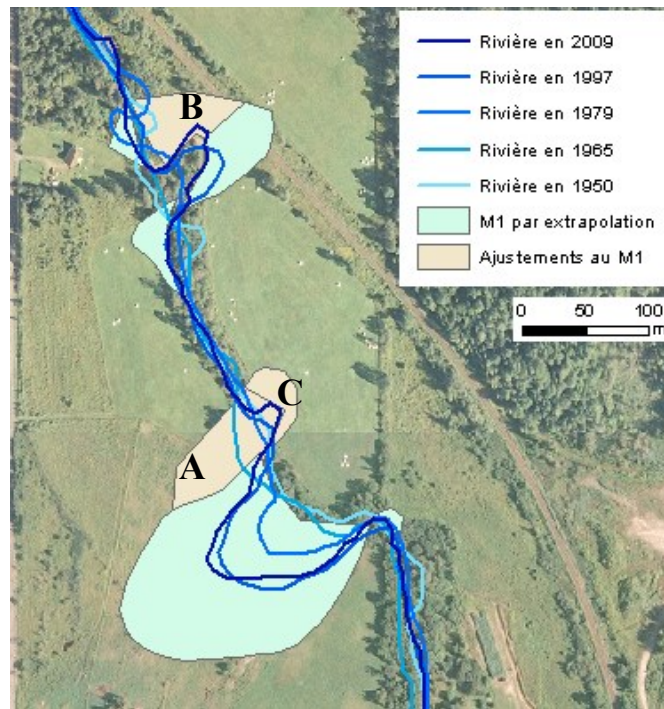


Figure 5-11– Section instable sur la Yamaska Sud-Est et modification manuelle de l'espace des aléas de mobilité.

Le reméandrement en cours ne peut être évalué correctement par la méthode d'extrapolation des taux d'érosion. Aux zones obtenues par extrapolation, en vert, doivent être ajoutées certaines zones supplémentaires (couleur sable). En particulier, il est fort probable que les méandres en développement migrent vers l'aval (zones A et B), et qu'un nouveau méandre se développe également en aval (zone C).

Concernant l'évaluation des risques d'avulsion, les comparaisons entre les photographies des différentes années ont montré que les traces d'érosion sur la plaine alluviale en zone agricole étaient plus visibles sur les photographies les plus anciennes. À partir des photographies de 1979, les traces sont moins visibles, celles-ci ayant probablement été effacées par l'utilisation de machinerie agricole.

Le critère pour déterminer les risques de recoupement des bras morts, lorsque la largeur du pincement d'un méandre est inférieure à 4 fois la largeur du chenal, a par ailleurs été validé par comparaison des dynamismes passés et prévus pour les cinquante prochaines années grâce à ce critère sur les rivières Yamaska Sud-Est et de la Roche. Deux recoupements de méandres ont eu lieu depuis 1950 pour la Yamaska Sud-Est et depuis 1964 pour la rivière de la Roche. À ces deux recoupements historiques, il faut ajouter trois autres recoupements qui ont été empêchés par des interventions humaines et auraient certainement dû avoir lieu durant cette période. Le rapport entre la largeur du pincement et la largeur des rivières n'est inférieur à 4 que pour 2 de ces 5 recoupements. Conséquemment, il apparaît que le critère de 4 fois la largeur est trop faible, des recoupements pouvant apparaître pour des valeurs nettement supérieures (jusqu'à 10 fois la largeur). Cependant, le critère de 4 fois la largeur a permis d'identifier 9 sites possibles de recoupements pour les 50 prochaines années, ce qui est déjà supérieur au nombre de recoupements historiques pour une période de temps relativement équivalente. Bien que dans le cadre de cette étude il soit acceptable d'avoir un nombre de recoupements classés à risque (donc dans l'espace des aléas de mobilité) supérieur au nombre probable de recoupements futur, une augmentation du critère amènerait à la classification d'un nombre vraisemblablement trop important de sites à risque. Une solution alternative serait d'utiliser pour l'identification des risques de recoupement un critère basé sur l'augmentation de la pente en cas de recoupement. Pour les 5 recoupements historiques, les recoupements créent une augmentation de la pente du cours d'eau entre 494% et 932%. Sur l'ensemble des méandres actuels, seul 1 méandre se situe dans cette catégorie de risque, ce qui montre bien l'adéquation de ce critère. Il est par ailleurs possible

d'établir un seuil pour le classement dans l'espace des aléas de mobilité des risques de recouplement de méandre correspondant au même niveau d'aléa que le critère d'un pincement de méandre inférieur à 4 fois la largeur, c'est-à-dire un seuil permettant d'identifier 9 recouplements possibles pour les 50 prochaines années. Ce seuil correspond approximativement à une augmentation de 250% de la pente. Une comparaison des méandres identifiés par ce nouveau critère fait apparaître que 7 des 9 méandres identifiés par le premier critère (largeur du pincement inférieur à 4 fois la largeur du cours d'eau) sont communs avec ceux identifiés par ce deuxième critère. Par conséquent, et bien qu'un critère basé sur une augmentation de la pente soit jugé préférable, le critère initialement choisi du pincement inférieur à 4 fois la largeur paraît acceptable.

Pour ce qui concerne la rivière Matane, aucun recouplement de méandre n'a été observé historiquement et aucun n'a été prévu. Bien que des recouplements soient possibles sur la rivière Matane (comme le montre l'observation des données Lidar), le confinement du chenal semble rendre cette rivière moins propice à la création de bras mort.

Plus globalement, il est également important de remarquer que, pour l'ensemble des méthodes utilisées, l'hypothèse a été faite que les phénomènes futurs pouvaient être prédits à partir de l'observation des phénomènes passés. Cependant, le comportement des rivières peut se modifier dans le temps, en fonction en particulier de changements hydrologiques liés à l'utilisation du sol ou de la rivière, comme par exemple l'abandon de la drave sur la rivière Matane. Ces modifications constituent la trajectoire géomorphologique des rivières. Ainsi, pour la rivière Matane, les taux d'érosion historiques ont été établis sur la période 1993-2009 pour procéder à la détermination des zones possiblement érodées dans les 50 prochaines années. Il a en effet été jugé que

l'érosion observée avant 1993 n'était pas représentative de l'érosion future. Sur les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, l'étude de la trajectoire géomorphologique des rivières n'a cependant pas été effectuée. Si les conditions définissant la morphologie de ces deux rivières ont évolué dans le temps, le dynamisme passé des rivières peut ne pas être un indicateur fiable de la mobilité future. Plus l'intervalle de temps sur lequel sont basées les observations historiques est long (59 ans pour la rivière Yamaska Sud-Est, 89 ans pour la rivière de la Roche), plus il est possible que le dynamisme de la rivière ait évolué. Extrapoler le dynamisme passé d'une rivière pour prédire le dynamisme futur est donc d'autant plus hasardeux que la période d'observation historique est grande. Dans un contexte où la trajectoire morphologique est négligeable, et où conséquemment les observations du dynamisme passé sont de bons indicateurs du dynamisme futur, il convient cependant d'effectuer les interpolations linéaires sur la plus grande période de temps disponible, afin de maximiser la qualité de l'interpolation effectuée. Il est donc nécessaire, idéalement, d'effectuer une interpolation des taux d'érosion sur la période la plus longue possible, mais tout en s'assurant que la période de temps choisie demeure représentative du dynamisme actuel des cours d'eau. Dans le même ordre d'idée, les recouvrements de méandres peuvent obéir à des cycles (Hooke, 2003) qui ne sont pas pris en compte par la méthodologie. Il est également possible, avec les changements climatiques, que les débits des rivières soient modifiés. L'analyse de la sensibilité de la mobilité, présentée au chapitre 6, permet d'évaluer l'influence de ce dernier facteur.

Il apparaît donc, globalement, que l'identification des espaces d'aléas de mobilité fait appel à plusieurs décisions méthodologiques, listées au

tableau 5-3. Certaines de ces décisions relèvent d'une expertise géomorphologique, alors que d'autres sont des décisions de gestion de risque. La mise en place d'une cartographie des aléas de mobilité sur une rivière doit donc être effectuée en s'assurant que ces paramètres correspondent d'une part au contexte géomorphologique étudié (en particulier, en termes d'échelle temporelle des processus), et d'autre part aux objectifs de gestion désirés.

Pour conclure, la cartographie de l'espace des aléas de mobilité est un exercice difficile, qui comporte des décisions d'experts et qui inclut de nombreuses sources d'erreur. Bien que la cartographie finale doive être prise avec circonspection, elle permet d'obtenir des indications sur la mobilité des rivières que ne permet pas la méthode du corridor de mobilité. Tout d'abord, l'espace des aléas de mobilité fournit des informations sur le dynamisme des rivières, et en particulier sur quels tronçons la mobilité est plus importante ou plus faible. Il s'agit également d'un espace délimité avec un horizon temporel spécifique, ce qui le rend plus facilement comparable et intégrable à d'autres aléas naturels (ex. inondations) pour une gestion globale et territoriale des risques. Enfin, il met en évidence un dynamisme des rivières à une échelle spatiale plus fine que le tronçon, ce qui permet d'identifier les méandres les plus dynamiques, et en particulier ceux présentant une instabilité due à des perturbations anthropiques. Il s'agit donc d'un outil complémentaire à la cartographie du corridor de mobilité.

Tableau 5-3 – Liste des critères utilisés pour la détermination de l'espace des aléas de mobilité

Méthodologie	Critère choisi	Influence du critère
Extrapolation de l'érosion historique		
Intervalle de temps entre photographies	Variable (environ 15 ans)	En réduisant l'intervalle de temps, il est possible d'augmenter le nombre d'années où l'on dispose de photographies pour la même période d'interpolation, ce qui diminue l'erreur sur l'interpolation.
Période d'interpolation	Variable	Une grande période d'interpolation permet de mieux évaluer le dynamisme de la rivière. Il est cependant nécessaire de s'assurer que le système soit demeuré stable durant cette période.
Période d'extrapolation	50 ans	La période d'extrapolation choisie est un choix de gestion. Plus la période de temps est grande, moins le résultat est fiable.
Distance entre transects	5 m	Plus la distance entre les transects est petite, plus il est possible de travailler sur des méandres de petite longueur d'onde.

Tableau 5-3 (suite)

Méthodologie	Critère choisi	Influence du critère
Stabilisation		
Taux d'érosion	95 ^{ème} centile des taux d'érosion du tronçon	Le critère sélectionné doit être représentatif de du taux d'érosion naturel, en l'absence de stabilisation
Tronçons fortement dynamiques		
Temps de renouvellement de la plaine alluviale	200 ans	Limite d'applicabilité de la mesure par interpolation des taux d'érosion
Recoupement des méandres		
Critères de recoupement	Largeur du pincement inférieur à 4 fois la largeur du cours d'eau	Pour ces deux méthodologies, le seuil choisi doit correspondre à un niveau d'aléa jugé acceptable pour la période de temps équivalente à la période d'extrapolation. Définir le niveau d'acceptabilité de l'aléa est une décision de gestion de risque.
	Augmentation potentielle de la pente supérieure à 250%	

5.3.3 Lien entre mobilité et puissance spécifique

La puissance spécifique mesurée, selon la méthode exposée à la section 5.2.4, est comparée à la mobilité mesurée, obtenue par interpolation des taux d'érosion historique, à la figure 5-12. Contrairement aux hypothèses de travail, la mobilité ne semble pas être

corrélée positivement avec la puissance spécifique à l'échelle du bassin versant. En effet, le découpage en sections alternant une forte et une faible mobilité, effectué à la figure 5-12, permet de constater que les sections où la puissance spécifique est la plus forte ne montrent pas ou peu de mobilité. Une mobilité maximale de 0,12 m/an a été observée sur les sections ayant une puissance spécifique supérieure à 150 W/m², et une mobilité maximale de 0,33 m/an a été observée sur les sections ayant une puissance spécifique supérieure à 50 W/m², alors que le maximum de mobilité observé (1,57 m/an) est situé à un point ayant une puissance spécifique de 3,4 W/m². Cette corrélation spatiale inverse entre la mobilité et la puissance spécifique mesurée va donc à l'encontre des hypothèses de recherches formulées. L'hypothèse d'une corrélation entre la puissance spécifique et la mobilité des cours d'eau a été formulée sur la base des travaux de Larsen *et al.* (2006) et de Güneralp et Rhoads (2009). Hors, les travaux réalisés par ces auteurs ont été effectués dans des contextes géomorphologiques relativement uniformes, avec en particulier peu de variation du substrat géologique (dépôt de surface et roche mère) ou de variation dans l'utilisation du sol dans le bassin versant. Schmitt *et al.* (2000, 2007), dans leurs travaux sur l'étude des variables pertinentes pour la détermination des tronçons des rivières, ont montré cependant qu'à l'échelle du bassin versant la mobilité et la puissance spécifique des rivières sont des paramètres qui doivent être tous deux pris en considération, et que l'un ne pourrait se substituer à l'autre. Des observations de terrain sur notre zone d'étude ont permis de constater que les sections pour lesquels la puissance spécifique est la plus forte (tronçon 2 en particulier), sont des tronçons fortement confinés dans les dépôts de sédiments, voire dans la roche mère. Ces conditions expliquent vraisemblablement l'absence de mobilité observée pour ces sections. Ces résultats corroborent en effet avec

la sectorisation effectuée par Schmitt *et al.* (2000) pour des rivières des Vosges (France), qui constate une absence de mobilité latérale pour les rivières de forte énergie (ω supérieur à 200 W/m^2), dans les vallées en V, et une mobilité variable, pouvant être importante, pour les rivières de moindre puissance, selon le contexte géologique. L'influence du contexte géologique sur la morphologie des cours d'eau, indépendamment de la puissance spécifique, a d'ailleurs été soulignée par Bernot *et al.* (1996). Il semble donc que, sur la section de rivière à l'étude, l'influence des facteurs géologiques sur la mobilité soit prépondérante sur l'influence de la puissance spécifique sur ce même facteur.

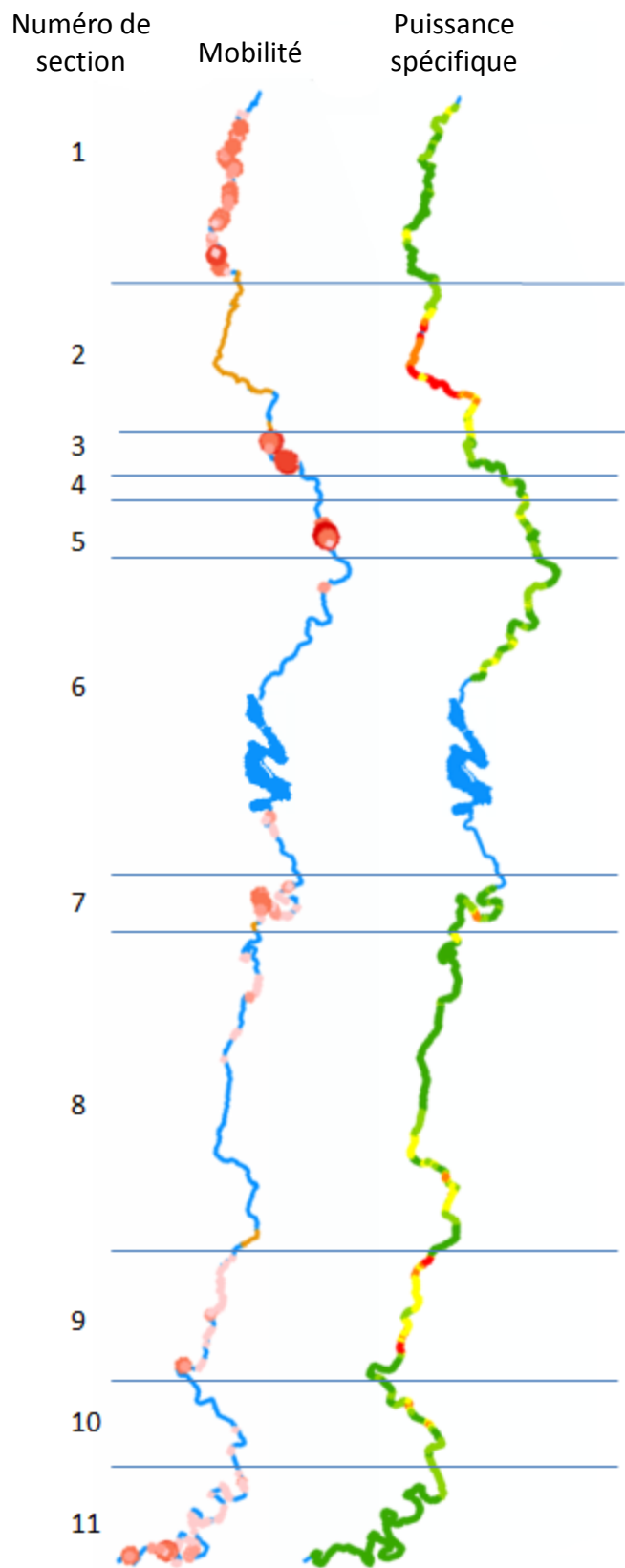


Figure 5-12 – Mobilité et puissance spécifique sur la rivière Yamaska Sud-Est et le ruisseau de Jackson (écoulement du haut vers le bas)

Taux d'érosion (m/an)

- 0.0 - 0.2
- 0.2 - 0.4
- 0.4 - 0.6
- 0.6 - 0.8
- 0.8 - 1.6
- non évaluée

Puissance spécifique (W/m^2)

- 0 - 20
- 20 - 50
- 50 - 100
- 100 - 150
- 150 - 350



6 Analyse de sensibilité aux changements climatiques

6.1 Rappel des objectifs et contexte de recherche

L'analyse de sensibilité aux changements climatiques permet de tester les modifications du comportement des rivières suite aux modifications probables du régime hydrique, en conséquence des changements climatiques. L'influence des changements climatiques sur le régime hydrique des rivières Yamaska Sud-Est et Matane a été analysée dans le cadre du projet « Espace de liberté » par un couplage entre des simulations climatiques et des modèles hydrologiques (couplage réalisé par François Brissette, École de Technologie Supérieure, à partir des données fournies par Ouranos ; analyse et interprétation réalisées par Marie-Audray Ouellet, UQÀM). Les résultats montrent que pour le débit de récurrence 2 ans, débit proche du débit plein-bord, des variations entre -1% et +15% sont attendues sur la rivière Yamaska Sud-Est et entre -8% et +13% sur la rivière Matane pour 2050.

L'objectif de l'analyse de sensibilité aux changements climatiques est de tester la robustesse de la cartographie des espaces de mobilité réalisée au chapitre 5, en évaluant l'effet d'une augmentation probable des débits morphogènes sur la mobilité des rivières.

6.2 Méthodologie

L'analyse de sensibilité aux changements climatiques est réalisée grâce au logiciel RVR Meander, un outil ArcGIS développé par Abad et Garcia (2006). Ce programme permet

de simuler l'évolution d'un chenal dans le temps, en combinant l'utilisation d'un modèle hydraulique 2D et un modèle d'érosion des berges. À chaque étape de la simulation, l'hydraulique du chenal est recalculée sur la base des modifications morphologiques simulées. L'érosion des berges et l'hydraulique des rivières étant des phénomènes complexes, une bonne approximation de la réalité ne peut être obtenue que par des modèles avancés (modèle hydraulique 3D, prise en compte des caractéristiques pédologiques et de la végétation, etc.) dont l'utilisation dépasse les objectifs du présent projet. En raison des simplifications importantes apportées à la réalité par le modèle RVR Meander, la migration réelle des chenaux ne peut être modélisée avec précision. Contrairement à des modèles plus complexes, la simplicité du modèle RVR Meander permet cependant la simulation de la mobilité d'un chenal à l'échelle d'un tronçon.

Deux sections de rivière ont été modélisées avec RVR Meander. La première modélisation avait pour objectif de tester l'impact d'un changement de débit sur l'amplitude du corridor de mobilité et le dynamisme global d'un tronçon dans un contexte alluvial (avec des méandres pouvant migrer librement sur la plaine). Une deuxième modélisation a été effectuée pour tester l'évolution d'un méandre dans un milieu où la migration est confinée par des murs de vallée et des enrochements de berges. Pour chaque modélisation, deux simulations ont été effectuées. Une première simulation a permis la calibration du modèle, en cherchant à reproduire le plus fidèlement possible le comportement historiquement observé des rivières. Une deuxième simulation a été effectuée ensuite sur chaque rivière, avec les mêmes paramètres et un débit augmenté de 10%, pour tester la sensibilité aux changements climatiques. Des variations du débit de récurrence 2 ans entre -1% et +15% pour la rivière Yamaska Sud-Est et entre -8% et

+13% pour la rivière Matane étant attendu pour 2050, l'augmentation du débit de 10% utilisée pour simuler l'impact de ces changements sur la mobilité est un choix conservateur, car supérieur aux valeurs médianes des changements attendus (respectivement de 7% et -2% pour les rivières Yamaska Sud-Est et Matane), mais tout de même probable.

6.2.1 Description du modèle

Le modèle RVR Meander est composé d'un modèle hydraulique 2D en plan, calculant une vitesse moyenne sur l'ensemble de la colonne d'eau, jumelé avec un modèle d'érosion des berges. Le modèle hydraulique a été développé par Garcia et al. (1996), sur la base des travaux d'Ikeda et al. (1981). Dans ce modèle, le cours d'eau est considéré ayant une largeur constante, et une profondeur fonction du rayon de courbure (figure 6-1). Le modèle hydraulique est basé sur les équations de Navier-Stoke, avec quelques simplifications (en particulier, l'effet des berges sur l'écoulement est négligé). Ces équations sont intégrées sur la profondeur (axe des z), afin d'obtenir une vitesse moyenne du courant pour la colonne d'eau, définies par les équations résultantes 1 et 2 :

$$U_1(s, n) = a'_1(n)e^{-a'_2s} + n \left(\underbrace{a'_3C(s)}_A + \underbrace{a'_4e^{-a'_2s} \int_0^s C(s)e^{a'_2s} ds}_B \right) \quad (1)$$

$$V_1(s, n) = \frac{a'_2}{2}e^{-a'_2s} \left(2 \int_1^n U_1(0, n)dn - nU_1(0, n) + U_1(0, 1) \right) + \frac{a'_2}{2} (nU_1(s, n) - U_1(s, 1)) + \frac{a'_5}{2} (n^2 - 1) \quad (2)$$

Dans ces équations (tirées de Motta *et al.*, 2011), U_1 et V_1 sont les vitesses (sans dimensions), longitudinalement (axe s) et transversalement (axe n). $C(s)$ est le rayon de courbure du chenal. Les constantes a'_1 , a'_2 , a'_3 , a'_4 et a'_5 sont définies par des paramètres considérés uniformes sur l'ensemble du tronçon (notamment le nombre de Manning, le débit, la largeur, et la pente). Il peut être remarqué que, dans l'équation 1, la vitesse longitudinale du courant est dépendante uniquement du rayon de courbure local (terme A) et des conditions en amont, elles-mêmes déterminées uniquement par le rayon de courbure (terme B).

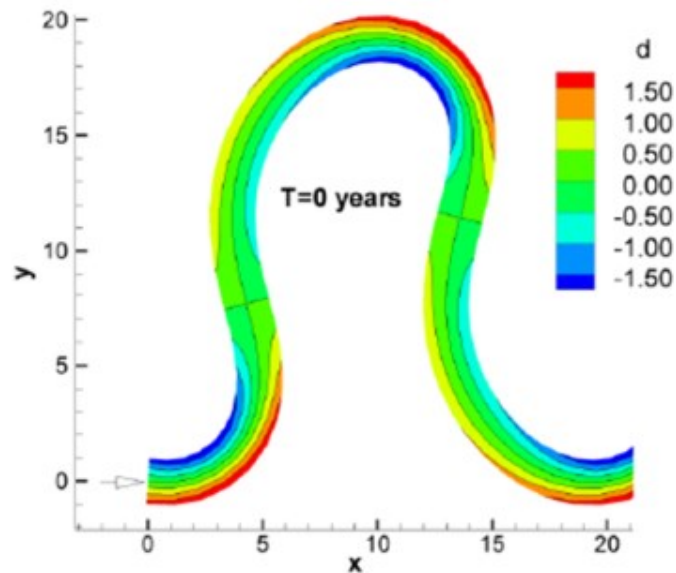


Figure 6-1 – Modélisation du chenal d'une rivière avec RVR Meander.

La rivière a une section trapézoïdale, avec une largeur constante, des berges verticales et un lit possédant une pente transversale avec une profondeur moyenne constante (d : différence par rapport à la profondeur moyenne). La pente transversale est proportionnelle au rayon de courbure (Motta, 2011).

Pour l'érosion, deux modèles sont disponibles dans RVR Meander. Le premier modèle, nommé modèle à coefficient de migration, a été développé par Ikeda *et al.* (1981). L'érosion y est modélisée comme proportionnelle à la différence entre la vitesse locale du courant et la vitesse moyenne du tronçon, tel que montré à l'équation 3 :

$$R^* = E_0(U_b^* - U_{ch}^*) \quad (3)$$

où R^* est le taux de migration (en m/s), E_0 est le coefficient de migration (sans dimension), U_b^* est la vitesse du courant au niveau de la berge (en m/s), et U_{ch}^* est la vitesse moyenne du courant pour le tronçon (en m/s).

Motta *et al.* (2011) ont développé le deuxième modèle d'érosion utilisable avec RVR Meander, nommé modèle à base physique. Dans ce modèle, l'érosion est proportionnelle à la différence entre la contrainte de cisaillement, obtenue par le modèle hydraulique, et la contrainte critique de cisaillement, définie pour la berge (équation 4).

$$E^* = M^* \frac{(\tau^* - \tau_c^*)}{\tau_c^*} \quad (4)$$

où E^* est le taux de migration (en m/s), M^* est un coefficient de taux de migration (en m/s), τ^* est la contrainte de cisaillement au niveau de la berge (en N/m²), et τ_c^* la contrainte critique de cisaillement (en N/m²).

6.2.2 Sections modélisées et calibration

Le premier tronçon modélisé est un tronçon d'environ 1200m de la rivière North-Branch. Ce tronçon a été sélectionné pour son dynamisme important, et le peu de perturbations

anthropiques présentes. Les simulations ont été effectuées à partir de la position de la rivière en 1950, sur 60 ans. Le deuxième tronçon modélisé est un tronçon d'environ 2000m de la rivière Matane. Ce tronçon a été sélectionné pour la présence d'un méandre migrant naturellement et d'un méandre stabilisé. L'amplitude des méandres est également confinée par les murs de vallée sur ce tronçon. La calibration des modèles a été effectuée avec les paramètres présentés au tableau 6-1.

Tableau 6-1 – Configuration des modélisations

	Modélisation 1 - North-Branch	Modélisation 2 - Matane
Débit	1 m ³ /s	150 m ³ /s
Largeur	10 m	58 m
Taille des sédiments	2 mm	65 mm
Pente de la vallée	0.0035	0.002
Coefficient de Manning	0.05	0.05
Modèle d'érosion	À coefficient de migration	À base physique
Coefficient de migration	10 ⁻⁷	S.O.
Coefficient de taux de migration	S.O.	10 ⁻⁷ m/s
Contrainte critique de cisaillement	S.O.	22 N/m ²
Début de la simulation	1950	1963
Temps de simulation	60 ans	50 ans
Pas de simulation	0.25 an	0.25 an

Les premiers paramètres fixés pour les simulations ont été la pente (basée sur les mesures DGPS), le coefficient de Manning (déterminé à une valeur arbitraire vraisemblable pour la Yamaska Sud-Est, évalué à partir d'observations de terrain par le Laboratoire de géomorphologie et de dynamisme fluvial de l'UQAR pour la rivière Matane), et la taille des sédiments (basée sur des observations de terrain pour la North-Branch, et fixée à une valeur vraisemblable pour la rivière Matane).

En partant de la plus ancienne position du chenal disponible (1950 pour la rivière North-Branch, 1963 pour la rivière Matane), les débits ont ensuite été ajustés pour reproduire les longueurs d'onde des méandres observées sur les rivières. Pour cela, plusieurs simulations ont été effectuées en utilisant le modèle à coefficient de migration avec une valeur du coefficient de migration largement supérieure à sa valeur réelle. Ce paramétrage permet d'obtenir un dynamisme plus important des rivières modélisées et de mieux constater comment le débit modifie la longueur d'onde des méandres (un débit plus grand provoquant une longueur d'onde plus grande). Sur l'exemple exposé par Motta *et al.* (2011), le débit utilisé pour la modélisation est situé entre le débit moyen annuel et le débit moyen annuel maximal observé sur les données disponibles aux auteurs. Cependant, Garcia *et al.* (1996) et Larsen et Greco (2002) utilisent le débit de récurrence 2 ans, pris comme proxy pour le débit plein-bord, pour effectuer le même type de simulations. Le tableau 6-2 permet de comparer ces valeurs calculées sur les rivières avec les paramètres retenus pour les modèles. Le débit permettant de maintenir la longueur d'onde observée pour la rivière North-Branch correspond aux critères énoncés par Motta *et al.* (2011), et se situe pour la rivière Matane entre les critères de Motta *et al.* (2011) et le débit plein-bord. Comme souligné par Larsen *et al.* (2006-a), le modèle

utilisé ici fait l'hypothèse que la migration des méandres à long terme peut être modélisée par l'application d'un débit constant.

Tableau 6-2 – Débits des rivières à l'extrémité amont des tronçons simulés et débits modélisés

	Modélisation 1 – Rivière North-Branch	Modélisation 2 – Rivière Matane
Débit moyen annuel	0.86 m ³ /s ¹	25.7 m ³ /s ³
Débit moyen annuel maximal	1.63 m ³ /s ¹	35.5 m ³ /s ³
Débit plein-bord	9.76 m ³ /s ²	276 m ³ /s ³
Débit utilisé pour la modélisation	1 m ³ /s	150 m ³ /s

1 – par application d'une relation géométrique débit-aire drainée, construite pour chaque débit donné à partir des deux stations de jaugeage du CEHQ sur la rivière.

2 – par application d'une relation géométrique débit-aire drainée construite à partir d'un échantillon de rivières du Vermont, d'après VANR (2006), voir section 0.

3 - par application d'une relation géométrique débit-aire drainée, construite par la mesure de sections transversales, de la pente et du coefficient de Manning (travail effectué par le Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'UQÀR), et pour chaque débit donné à partir des données de la station de jaugeage du CEHQ sur la rivière.

Pour la modélisation de la rivière North-Branch, les recoupements de méandres ont été ajoutés manuellement aux simulations, ce comportement ne pouvant être modélisé avec RVR Meander. Pour cela, le modèle a été utilisé pour simuler la migration des méandres sur une durée de 10 ans, puis des recoupements de méandres ont été effectués où le pincement des méandres était inférieur à 2 fois la largeur (ce critère a été choisi pour reproduire l'amplitude maximale des méandres observée sur la rivière). Ces étapes sont effectuées 6 fois pour obtenir un temps de simulation total de 60 ans.

Le choix et le paramétrage du modèle d'érosion ont ensuite été effectués. Le modèle à base physique est un modèle plus complexe à paramétrer que le modèle à coefficient de migration. Celui-ci permet en contrepartie une modélisation plus fidèle de l'évolution des méandres (Motta *et al.* 2011). Pour la modélisation de la rivière North-Branch, le modèle à coefficient de migration a été conservé pour sa facilité d'utilisation (l'étape de recouplement manuel des méandres augmentant considérablement le temps nécessaire pour effectuer une simulation), et parce que cette modélisation avait pour but d'évaluer des caractéristiques mesurables à l'échelle du tronçon, et non du méandre. La précision du modèle à base physique ne semblait donc pas requise. Ce dernier modèle a été choisi pour la deuxième modélisation, pour la rivière Matane, puisque le but de cette simulation est l'analyse du comportement de la rivière à une échelle plus fine, celle du méandre.

Le modèle RVR Meander permet par ailleurs de configurer les paramètres pour l'érodabilité des berges (coefficient de migration, ou coefficient de taux de migration et contrainte critique de cisaillement), soit homogènes pour l'ensemble de la simulation, soit déterminés pour chaque cellule d'une matrice. Ces paramètres ont été considérés homogènes pour la modélisation de la rivière North-Branch, et hétérogènes pour la rivière Matane, avec production d'une matrice SIG, afin d'empêcher toute migration du chenal au niveau des enrochements et des murs de vallée. Plusieurs essais ont ensuite permis de définir les paramètres d'érodabilité des berges sur les deux modélisations afin de reproduire le comportement historique de la rivière. Pour la rivière North-Branch, le taux d'érosion moyen sur l'ensemble du tronçon a été la métrique choisie pour la calibration de la modélisation, alors que pour la rivière Matane la calibration du modèle a cherché à reproduire l'évolution de la position de la rivière.

6.3 Résultats et discussion

6.3.1 Modélisation 1 – Rivière North-Branch

La première modélisation est effectuée sur un secteur dynamique de la rivière North-Branch. La figure 6-2 montre la position du chenal simulé, à partir de la position de 1950, en comparaison avec l'évolution historique du chenal. Sur ce tronçon, le taux d'érosion moyen historique est de 0,67 m/an, et le taux d'érosion moyen sur la simulation est de 0,69 m/an. L'amplitude du corridor est historiquement de 78 m et celle-ci atteint 98 m sur la simulation. Malgré une différence de 26% entre ces deux valeurs, la simulation est jugée représentative du comportement historique de la rivière : la largeur du corridor est en effet semblable sur la majeure partie du tronçon simulée. La différence de largeur de corridor s'observe uniquement sur la partie amont du tronçon, et cette différence peut être attribuable à une imprécision dans le placement de l'axe principal des méandres et aux limites du modèle utilisé (en particulier, présence d'un enrochement non pris en compte dans la modélisation). Les positions obtenues par la simulation avec un débit augmenté de 10% sont présentées en comparaison avec la simulation en débit actuel sur la figure 6-2. Le taux d'érosion moyen en débit augmenté est de 0,69 m/an et l'amplitude du corridor de 102 m. Par rapport au climat actuel, la simulation ne montre donc pas d'augmentation du taux d'érosion moyen et une augmentation de 4% de l'amplitude du corridor de mobilité.

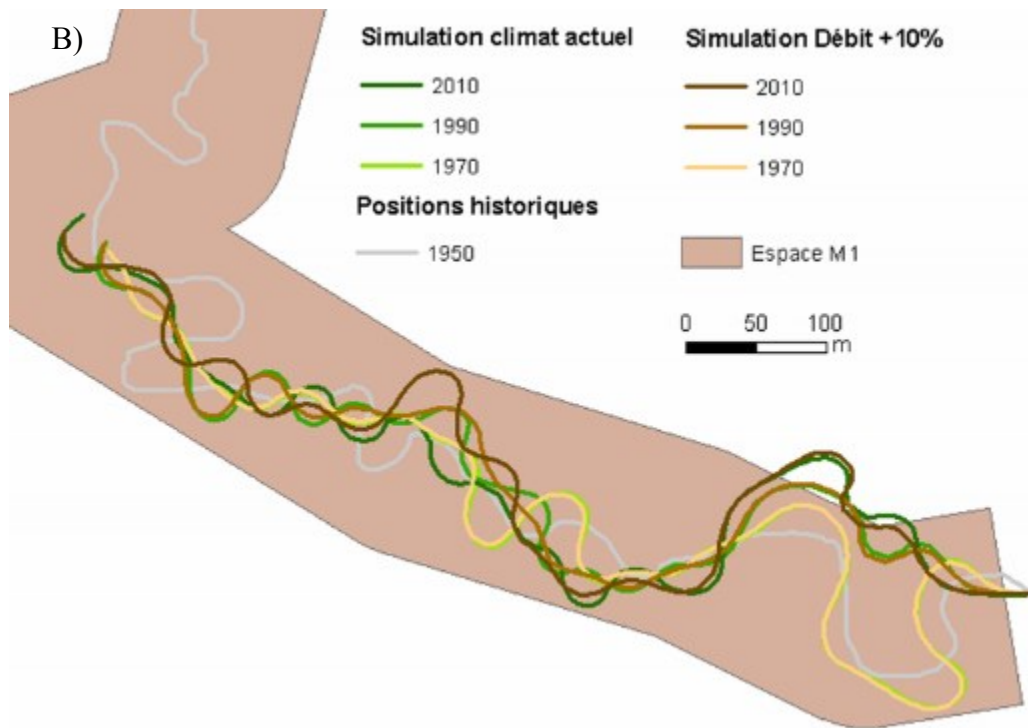
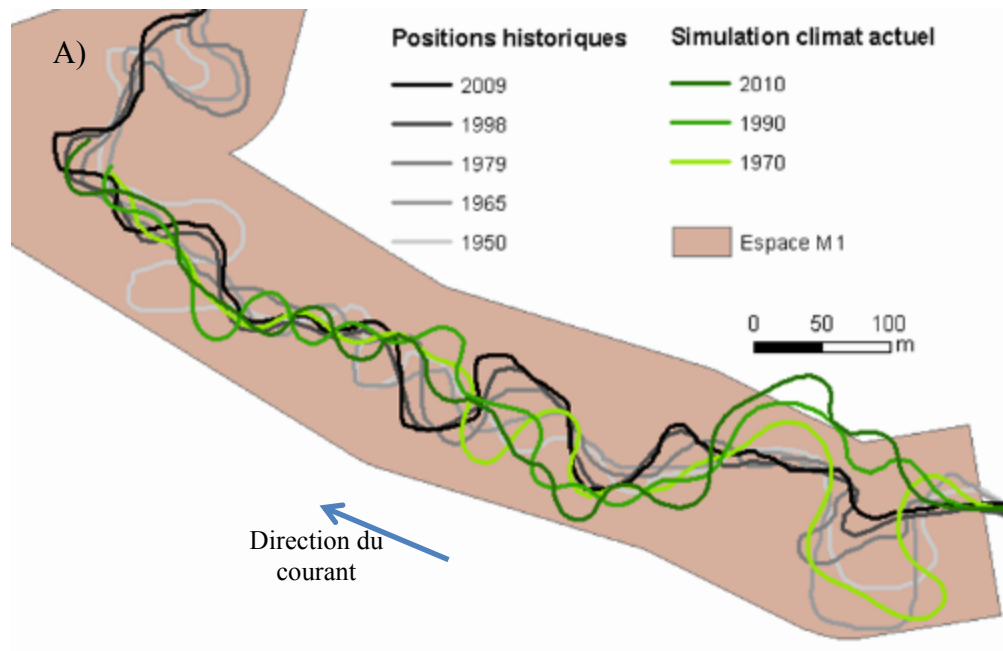


Figure 6-2 – Modélisation de la migration de la rivière North-Branch.

A) Comparaison des positions historiques du chenal et des positions obtenues par la simulation en climat actuel. B) Comparaison des positions du chenal obtenues par la simulation en climat actuel et la simulation avec un débit augmenté de 10%.

Dans le cas d'un système alluvial comme celui de la rivière North-Branch, sur le tronçon modélisé, l'amplitude du corridor de mobilité est principalement contrôlée par les recoupements de méandres. Ces derniers empêchent en effet le développement de méandres complexes, et des simulations effectuées pour la calibration du modèle ont montré que l'amplitude du corridor de mobilité est fortement sensible au seuil de recoupement des méandres. Par conséquent, l'augmentation des débits n'a dans ce contexte que peu d'influence sur l'amplitude du corridor de mobilité.

Il peut par ailleurs sembler surprenant que le taux moyen d'érosion ne soit pas affecté par une augmentation du débit. L'importance des recoupements de méandre est encore une fois ici un processus dominant : le taux d'érosion moyen est fortement tributaire des recoupements effectués, qui sont similaires dans les deux simulations (il ne s'agit d'ailleurs pas à proprement parlé d'un taux d'érosion, mais plutôt d'un taux de mobilité, puisque la mobilité par recoupement de méandres y est incluse). À long terme, la simulation en débit augmenté devrait montrer une augmentation du taux d'érosion moyen, mais cette tendance ne peut être observable sur la durée de la simulation effectuée, trop courte.

Globalement, le corridor de mobilité cartographié étant déterminé par l'amplitude des méandres et le confinement par les terrasses ou murs de vallées, il est au vu de cette simulation estimé que la cartographie du corridor de mobilité est peu sensible aux changements climatiques. Pour les mêmes raisons, la distinction entre les tronçons peu dynamiques et ceux fortement dynamiques, basée sur le taux de mobilité moyen de la rivière pour le tronçon et permettant de reclasser les tronçons les plus dynamiques dans

l'espace des aléas de mobilité, sera également peu affectée par les changements climatiques.

6.3.2 Modélisation 2 – Rivière Matane

La deuxième modélisation, réalisée pour un tronçon de la rivière Matane à partir de sa position en 1963, permet d'évaluer l'augmentation des taux ponctuels d'érosion. La figure 6-3 montre l'évolution historique de la zone modélisée ainsi que les résultats des deux simulations effectuées (avec le débit actuel et avec une augmentation de 10% du débit). La simulation en débit actuel a été paramétrée pour reproduire l'érosion observée au point A de la figure 6-3. À cet endroit, l'érosion observée est de 0,68 m/an, celle obtenue par la simulation en débit actuelle est de 0,65 m/an, et celle obtenue avec le débit augmenté est de 0,73 m/an, soit une augmentation de 13%. Au point B, le déplacement de chenal a été bloqué dans les simulations, en raison de l'enrochement existant à cet endroit. Sur cet enrochement, les simulations montrent une augmentation maximale de 8,5% de la contrainte de cisaillement suite à l'augmentation du débit. Malgré les différences importantes entre la simulation à débit actuel et l'évolution historique du chenal en aval du point C, la modélisation est jugée représentative du comportement de la rivière. En effet, lorsque la rivière frappe le mur de vallée au point C, une partie importante de son énergie est probablement dissipée (présence d'une zone de recirculation), ce qui n'est pas pris en compte dans la modélisation effectuée.

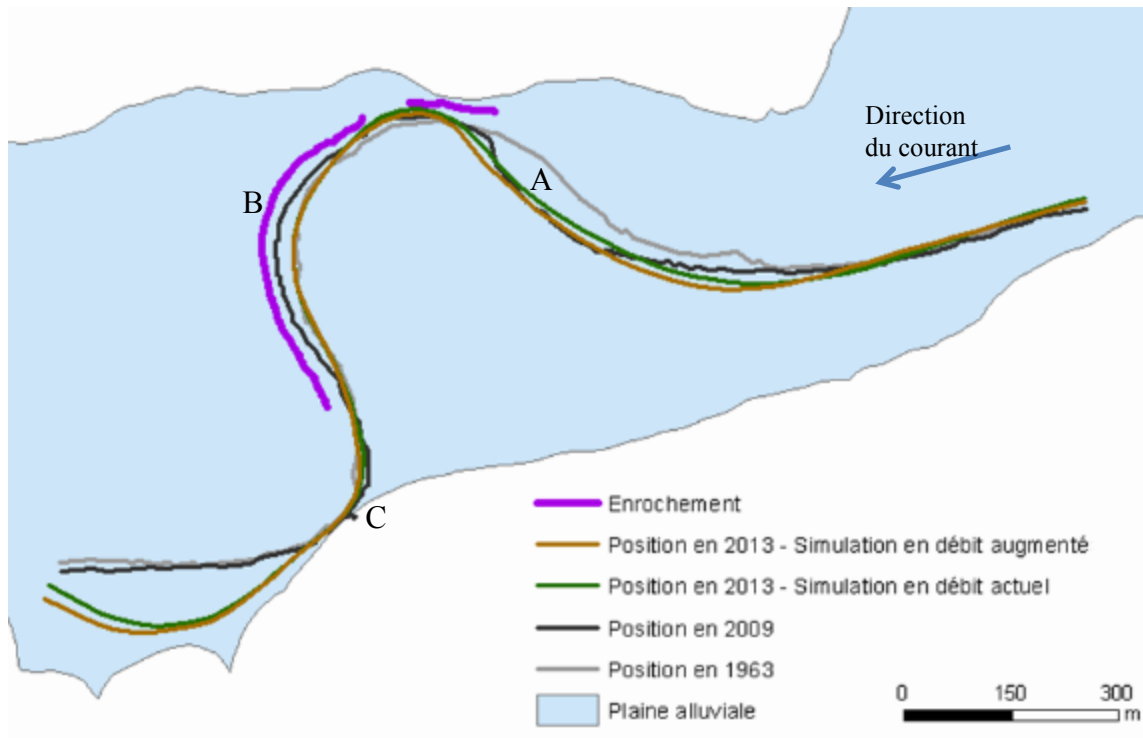


Figure 6-3 – Résultats des simulations et comparaison avec les positions historiques de la rivière Matane

Les résultats de cette modélisation montrent donc que l'érosion peut être ponctuellement augmentée sur un méandre par une augmentation des débits. Cette augmentation pourrait conséquemment avoir une influence sur la cartographie de l'espace des aléas de mobilité. Cependant, comme il a été discuté à propos de la cartographie de la mobilité par extrapolation des taux de mobilité mesurés ponctuellement, de nombreuses sources d'erreur et d'incertitudes entrent déjà dans cette méthodologie. L'incertitude apportée par les changements climatiques n'est pas majeure par rapport aux incertitudes déjà considérées, et ne semble donc pas significativement modifier la cartographie de l'espace des aléas de mobilité. Il convient cependant dans un tel contexte d'insister à nouveau sur le fait que la cartographie de la mobilité à court terme, représentée par l'espace des aléas

de mobilité, est une cartographie établie au meilleur des connaissances actuelles mais qui demeure malgré tout approximative.

Au-delà des modifications comportementales des rivières montrées par les deux modélisations effectuées, il est par ailleurs possible que les changements climatiques amènent des modifications géomorphologiques plus fondamentales. Une modification du débit morphogène peut en effet entraîner une modification de la longueur d'onde des méandres, et il en résulterait non pas une augmentation de l'érosion des zones déjà actuellement mobiles, mais plutôt une redistribution spatiale des zones d'érosion et de déposition qui ne peut être prévue. L'augmentation des contraintes de cisaillements, démontrée lors de la simulation sur la Matane, pourrait également dépasser des seuils critiques actuellement non atteints et entraîner une mobilité sur des secteurs de rivière actuellement non mobiles. D'autres modifications morphologiques de la rivière pourraient également résulter des changements climatiques, notamment par la modification de la répartition intra-annuelle des débits, par l'augmentation des risques d'embâcles de glace due à l'augmentation des périodes de dégel hivernales, ou bien encore par une incision du lit (Verhaar *et al.*, 2010). Des modifications dans l'utilisation du sol, par l'urbanisation en particulier, pourraient également venir modifier l'hydrologie et la morphologie des rivières dans un avenir proche. L'impact de ces modifications sur la mobilité des rivières est peu prévisible, et c'est pourquoi l'implémentation d'un espace de mobilité protégé correspondant au corridor de mobilité est une mesure de mitigation aux changements climatiques nécessaire.

7 Lien entre mobilité et habitats

7.1 Rappel des objectifs et contexte de recherche

Afin d'évaluer l'amélioration en termes de qualité environnementale que pourrait avoir l'implémentation d'un corridor de mobilité avec des restrictions d'usage, il convient de mieux identifier les liens entre la mobilité observée et différents habitats produits par cette mobilité. Il convient également d'identifier l'impact des activités humaines sur ces habitats.

7.2 Méthodologie

L'évaluation des habitats reliés à la mobilité a été effectuée en cartographiant trois types d'habitats : les bras morts de méandres, les embâcles de bois, et les bancs d'accumulation de sédiments. Les embâcles de bois ont été identifiés sur le terrain, les bras morts ont été mesurés par SIG à partir des photographies aériennes de 2009, et les bancs d'accumulation ont été mesurés sur des photographies à haute résolution (7cm/pixel), prise par hélicoptère à l'automne 2011 sur la rivière Yamaska Sud-Est, grâce à la collaboration de Normand Bergeron (INRS-ETE). Les photographies par hélicoptère ayant été réalisées sur le ruisseau de Jackson, puis sur la Yamaska Sud-Est à partir de la confluence entre ces deux rivières, cette zone constitue la zone d'étude pour ce chapitre (voir carte à l'annexe II). Les mêmes données, ainsi que les observations de terrain, ont permis également l'identification des ouvrages de stabilisation des berges.

Une analyse spatiale entre les différents habitats observés, la mobilité historique, et les différents paramètres mesurés a ensuite été effectuée. Une première analyse a été réalisée à l'échelle du bassin versant, pour identifier les corrélations spatiales à cette échelle entre la mobilité et les différents types d'habitats cartographiés. Cette étude a été complétée par un découpage en tronçons géomorphologiquement homogènes des zones mobiles, qui a permis l'identification des facteurs, liés à la géomorphologie de la rivière ou à des perturbations anthropiques, favorisant la présence ou l'absence des différents habitats.

7.3 Résultats et discussions

7.3.1 Corrélation spatiale entre mobilité et habitats à l'échelle du bassin versant

La mise en correspondance des habitats cartographiés avec la mobilité sur la rivière Yamaska Sud-Est, effectuée à la figure 7-1, permet de constater que les habitats sont en grande partie concentrés sur les secteurs mobiles. En général, les sections où peu de mobilité est observée ne présentent que peu de bras morts, de bancs d'accumulation ou d'embâcles de bois (tronçons 2, 4, 6, 8 et 10). Cette corrélation spatiale entre les habitats répertoriés et la mobilité mesurée confirme donc l'hypothèse du lien de causalité entre les types habitats choisis et la mobilité du cours d'eau. L'ensemble des types d'habitats n'est cependant pas présent dans toutes les sections mobiles. Ainsi, la section 1 montre une forte présence de bancs et d'embâcles de bois, avec peu de bras morts. Les sections 3 et 7 sont caractérisées par une quantité importante de bancs, mais peu de bras morts et une absence d'embâcles de bois. La section 7 présente beaucoup de bras morts, peu de bancs

et pas d'embâcle. La section 9 ne montre quant à elle quasiment aucun des habitats répertoriés, et finalement seuls les bras morts sont fortement présents sur la section 11. Ces corrélations observées entre habitats et mobilité sont synthétisées au tableau 7-1. Un gradient amont-aval est globalement présent pour les habitats, avec la présence d'embâcles de bois uniquement sur l'extrémité amont, des bancs de sédiments également plus fortement présents sur la moitié amont de la rivière, et à l'opposé des bras morts plutôt présents sur la partie aval de la rivière.

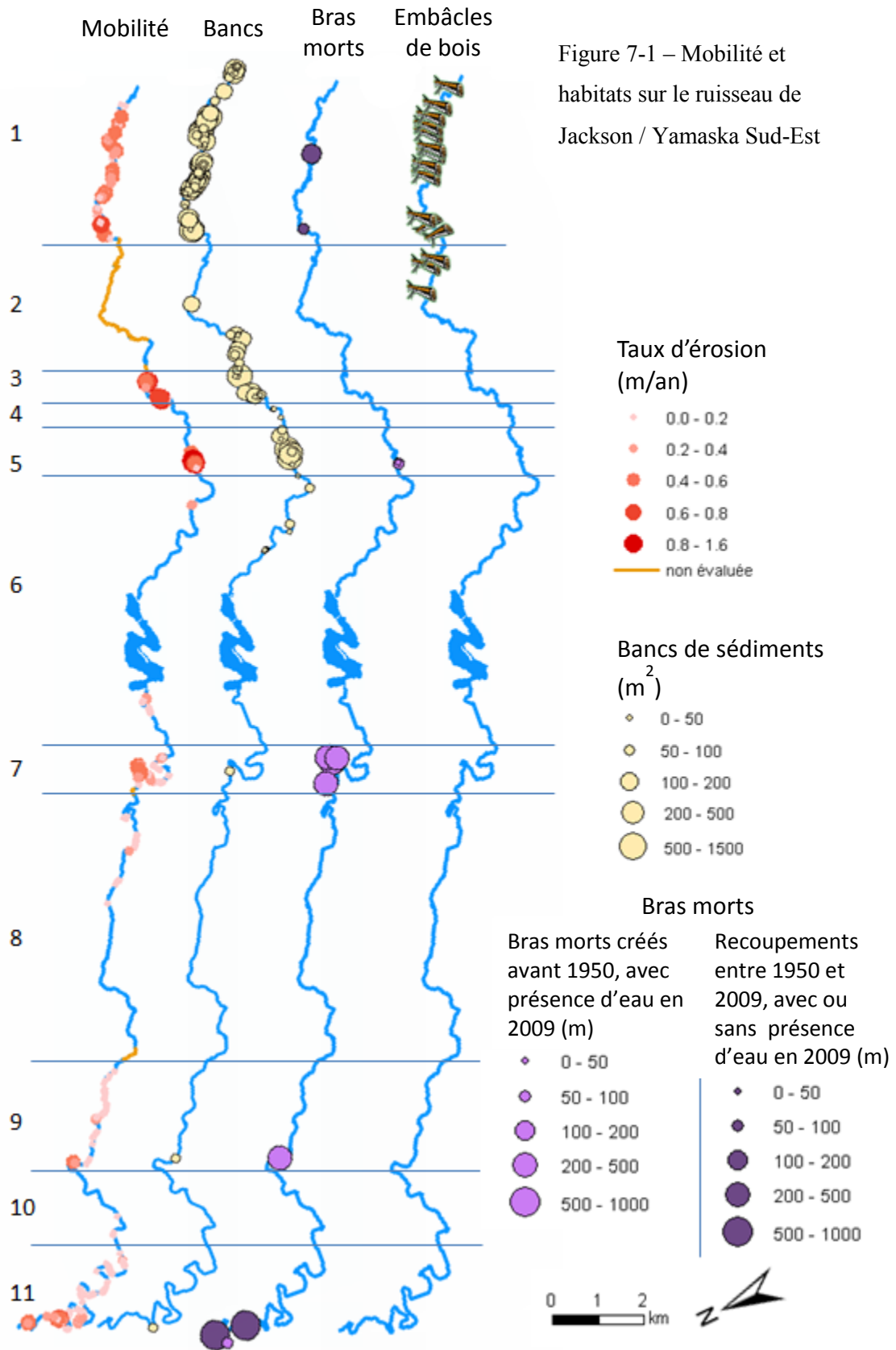


Figure 7-1 – Mobilité et habitats sur le ruisseau de Jackson / Yamaska Sud-Est

Tableau 7-1 – Mobilité et habitats, par section (estimation visuelle)

Section	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Mobilité	++ +	---	++ +	---	++ +	-	++ +	-	++ +	-	++ +
Bancs	++ +	+	++ +	-	++ +	-	-	---	-	---	-
Bras morts	-	---	---	---	-	---	++ +	---	-	---	++ +
Embâcles de bois	++ +	-	---	---	---	---	---	---	---	---	---

+++ : présence importante / + : présence faible / - : quasi-absence / --- : absence

7.3.2 Caractéristiques des zones mobiles

Le découpage en tronçons, géomorphologiquement homogènes, des sections les plus mobiles (sections 1, 3, 5, 7, 9 et 11) est présenté à la figure 7-2. Les caractéristiques géomorphologiques de ces tronçons sont présentées au tableau 7-2, et les habitats présents sur ces tronçons sont présentés au tableau 7-3. L'emplacement des tronçons mobiles le long du profil longitudinal de la rivière est présenté à la figure 7-3.

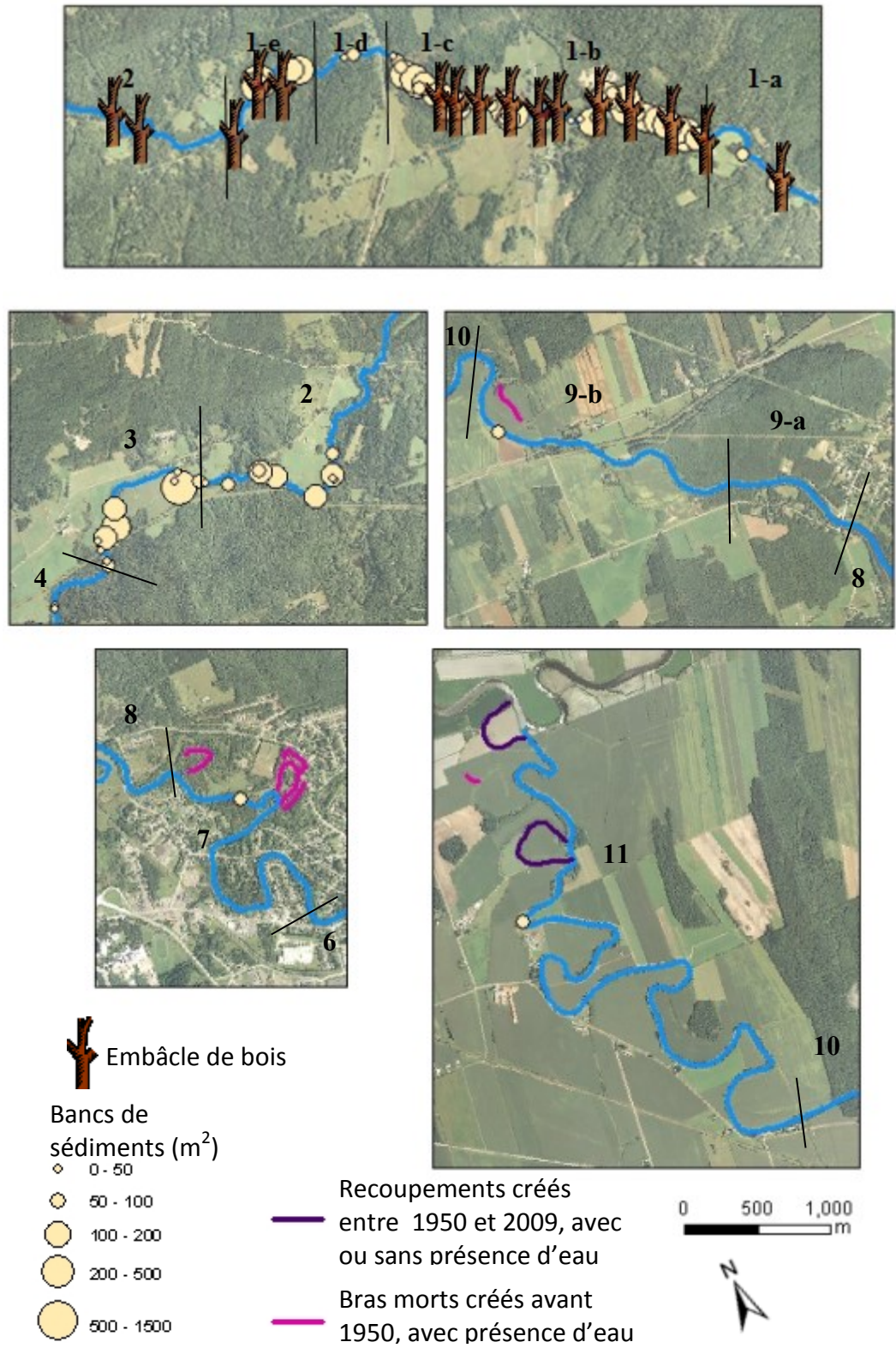


Figure 7-2 – Tronçons homogènes des sections mobiles du ruisseau de Jackson / Yamaska Sud-Est

Tableau 7-2 – Caractéristiques géomorphologiques des tronçons mobiles

Tronçon	1a	1b	1c	1d	1°	3	7	9a	9b	11
Taux d'érosion maximum (m/an)	0,23	0,59	0,57	0,24	0,77	0,92	0,58	0,2	0,48	0,64
Taux d'érosion moyen (m/an)	0,04	0,19	0,17	0,08	0,11	0,34	0,14	0,08	0,11	0,09
Largeur (m)	13,70	12,18	14,37	11,95	13,76	20,88	30,59	42,51	36,59	30,34
Débit (m ³ /s)	8,64	9,49	10,01	10,51	10,93	39,67	77,12	91,64	93,98	99,93
Puissance spécifique (W/m ²)	40,43	17,32	7,67	38,19	8,75	21,67	32,59	105,82	55,90	10,56
Pente	0,0063	0,0024	0,0011	0,0041	0,0011	0,0011	0,0013	0,0049	0,0022	0,0003
Sinuosité	1,06	1,14	1,49	1,04	1,11	1,17	1,11	1,05	1,17	2,34
Amplitude maximale des méandres (m)	20	38	52	15	39	110	223	131	151	450
Longueur (m)	1017	2423	982	611	1182	1325	2241	751	2592	8067
Confinement	Confiné	Semi-confiné	Non confiné	Confiné	Semi-confiné	Non confiné	Semi-confiné	Confiné	Confiné	Non confiné

Tableau 7-3 – Habitats dans les tronçons mobiles

Tronçon	1a	1b	1c	1d	1 ^e	3	7	9a	9b	11
Nombre d'embâcles de bois	1	8	3	0	3	0	0	0	0	0
Nombre de bancs	2	25	15	2	5	8	1	0	0	1
Surface totale des bancs (m ²)	239	5880	2429	121	389	1437	64	0	0	94
Largeur des bancs par mètre de rivière (m)	0,24	2,43	2,47	0,20	0,33	1,08	0,03	0,00	0,00	0,01
Nombre de bras morts créés entre 190 et 2009	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2
Longueur totale des bras morts créés entre 1950 et 2009	0	115	0	0	81	0	0	0	0	1587
Nombre de bras morts avec présence d'eau, en 2009	0	0	0	0	0	0	4	0	1	3
Longueur totale des bras morts avec présence d'eau	0	0	0	0	0	0	1496	0	300	1039

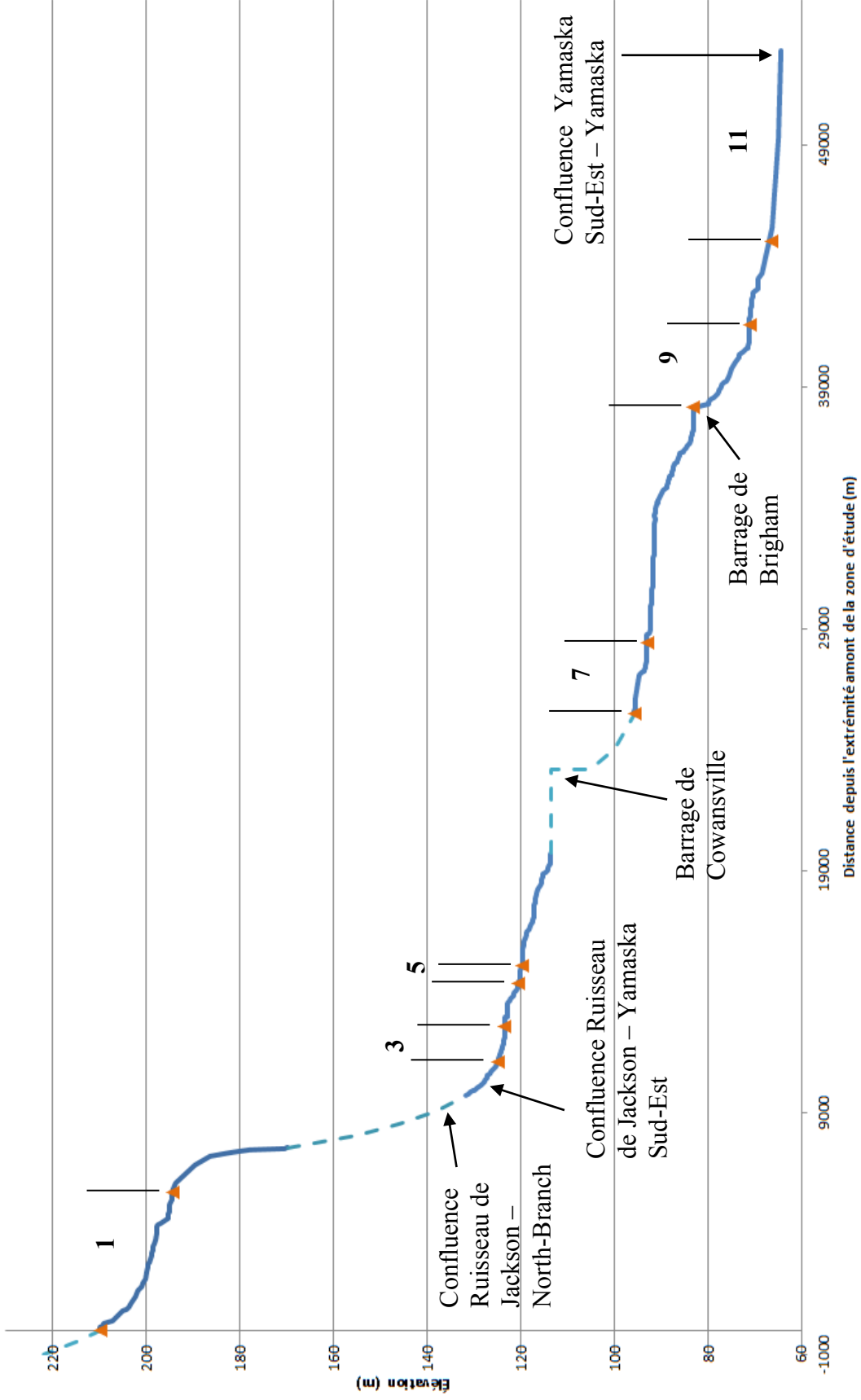


Figure 7-3 – Profil longitudinal du ruisseau de Jackson et de la Yamaska Sud-Est, avec emplacement des tronçons mobile (tronçons numérotés), des principaux confluent et barrages (parties en bleu pointillé : estimation)

Sur la section 1, le ruisseau de Jackson descend des monts Sutton, où il prend sa source, et arrive dans la section avec une pente et une puissance encore importante (tronçon 1-a). Ce tronçon est encore fortement confiné, sous fort contrôle lithologique, et peu mobile. Au tronçon 1-b, la pente diminue progressivement, tout comme le contrôle lithologique de la rivière (présence de méandres irréguliers et d'une alternance seuils-mouilles), alors qu'augmente la mobilité. La rivière finit alors par avoir un comportement alluvial, avec des méandres réguliers et mobiles, au tronçon 1-c. Un affleurement rocheux détermine la séparation avec le tronçon suivant (1-d), où la rivière se trouve à nouveau peu mobile, sur une pente plus forte, confinée et contrôlée par la lithologie. La pente diminue au tronçon 1-e, avec à nouveau des méandres irréguliers, mobiles, et des alternances seuils-mouilles, avant de plonger dans une succession de chutes et d'impressionnantes gorges (section 2). La section 1 est en général peu influencée par les activités humaines, et elle se situe dans un secteur principalement boisé.

La section 3 se situe après la confluence entre le ruisseau de Jackson, la Yamaska Sud-Est et la rivière North Branch. Elle constitue un seul tronçon homogène, à méandres fortement mobiles, avec seuils et mouilles, en zone agricole.

La section 5 est un tronçon fortement perturbé par des activités humaines. En particulier, la mobilité observée sur ce tronçon est due à un reméandrement suite à une linéarisation (voir section 7.3.4). Ce tronçon n'étant pas dans un état d'équilibre, l'analyse des liens entre mobilité et habitat n'y a pas été effectuée.

La section 7 est située juste en aval de la ville de Cowansville. Malgré la présence importante de secteurs urbanisés, ce tronçon homogène est dans un état jugé relativement

peu altéré. Sa plaine alluviale est en effet principalement forestière. Il s'agit d'un tronçon alluvial, caractérisé par une pente faible et de nombreux bras morts.

La section 9, située en aval de la retenue de Brigham, commence par un tronçon aux pentes plus fortes (9-a), avec un lit directement sur la roche mère. Alors que la pente diminue, un lit de galet se forme ainsi que des successions de seuils et de mouilles, avec des méandres irréguliers, souvent confinés (tronçon 9-b).

La section 11, finalement, forme le dernier tronçon homogène de la rivière avant sa confluence avec la rivière Yamaska. Il s'agit d'un tronçon alluvial, avec une pente faible, et une occupation du sol fortement agricole. Ce tronçon marque le début des basses terres du fleuve Saint-Laurent et la fin du piémont.

7.3.3 Lien entre habitats et caractéristiques géomorphologiques des tronçons mobiles

7.3.3.1 Embâcles de bois

La section 1 est la seule section présentant des embâcles de bois mort. Ces embâcles sont concentrés principalement dans les tronçons 1-b et 1-c. Une quantité importante de bois mort doit probablement être apportée du tronçon amont, aux pentes plus fortes, et ce bois se dépose aux tronçons 1-b et 1-c alors que la pente et la puissance de la rivière diminuent. L'érosion horizontale locale, relativement forte, vient compléter les apports de bois. La faible largeur de la rivière, entre 12 et 14 mètres environ, permet alors facilement la formation d'embâcles. Les quelques embâcles observés en aval, à la section 2, sont

probablement formés par des arbres transportés de la section 1. Plus en aval, aucun embâcle de bois n'a été répertorié. Bien que la largeur du cours d'eau ne permette plus la formation d'embâcle en aval de la section 1, peu de bois mort a en général été observé sur le terrain. Sur ces tronçons plus en aval, dans les zones urbaines ou agricoles, l'apport en bois mort peut également parfois être réduit lorsque les berges érodées ne sont pas boisées. Des interventions humaines de « nettoyage » des cours d'eau ont pu également être effectuées dans ces mêmes secteurs. Bien que ces effets anthropiques n'aient pas été évalués, il semble que la présence d'embâcles de bois soit caractéristique des zones de rupture de pente. Des observations de terrains effectuées sur les parties amont des rivières Yamaska Sud-Est et North-Branch, ainsi que sur la partie aval de la zone d'étude de la rivière de la Roche, ont permis d'ailleurs de constater la présence importante d'embâcles de bois, même en milieu agricole, dans des situations géomorphologiques similaires. Dans tous les cas observés, les embâcles se forment dans des zones directement en aval des tronçons montagneux, formant une vallée en V, alors que la pente diminue et la vallée s'élargit. L'apport en bois mort des tronçons amont, à partir des zones montagneuses et forestières, et la perte de puissance spécifique permettant un dépôt de ce bois mort peuvent donc être les éléments principaux responsables de la formation des embâcles de bois, et la présence d'embâcles sur un tronçon pourrait être conséquemment un paramètre indépendant de la mobilité locale du tronçon. De plus, la mobilité des cours d'eau ne peut être vue comme une variable complètement indépendante de la présence d'embâcle de bois. En effet, il est reconnu que les embâcles de bois favorisent des avulsions et un élargissement du chenal (O'Connor *et al.*, 2003). Mobilité et formation d'embâcles de bois sont donc des processus intimement reliés, en constante interaction.

Une étude plus approfondie de la dynamique des débris ligneux sur la Yamaska Sud-Est apparaît donc nécessaire pour pouvoir établir avec plus de certitude les liens entre mobilité et embâcle de bois.

7.3.3.2 *Bancs de sédiments*

Les bancs de sédiments sont principalement observés aux sections 1 (en particulier aux tronçons 1-b et 1-c), 3, ainsi que sur la fin de la section 2. La mesure de la largeur de bancs par mètre de rivière montre que les trois tronçons 1-b, 1-c et 3, pour lesquels cette valeur est la plus élevée, sont également les 3 tronçons les plus mobiles sur l'ensemble de la rivière. Cette relation met en évidence le rôle du dynamisme de la rivière pour le maintien de la diversité d'habitat sur la plaine alluviale. En effet, pour les tronçons ayant une mobilité plus faible, l'absence de bancs de sédiment montre que les processus de dépôt des sédiments sont trop lents pour offrir en quantité suffisante de nouveaux milieux permettant une succession végétale.

Les bancs de sédiments observés sur l'extrémité aval de la section 2, alors que cette section ne présente pas de mobilité historique, sont de nature différente. Ces bancs ne sont en effet pas produits par la migration du chenal mais plutôt par une aggradation. Il est fort probable que la rupture de pente observée peu avant le secteur où ces bancs sont présents favorise le dépôt de ces sédiments. La confluence avec deux importants tributaires, également légèrement en amont de ce secteur, viendrait ajouter des sédiments et contribuerait à l'aggradation. Les derniers 400 mètres de la section 2 sont par ailleurs un tronçon anastomosé, ce qui vient également renforcer l'hypothèse d'un excédant local de sédiments.

7.3.3.3 *Bras morts*

Les bras morts sur la Yamaska Sud-Est et le ruisseau de Jackson sont présents beaucoup plus fortement dans la partie aval de la rivière, et plus spécifiquement aux tronçons 7 et 11. Le tronçon 11 présente un caractère très alluvial, avec un corridor de mobilité très large, des boucles de méandres aux formes complexes, une sinuosité forte, une pente et une puissance spécifique faible. Le tronçon 7 peut sembler à la vue des caractéristiques géomorphologiques du tableau 7-2 légèrement différent. Cependant, ce tronçon présente une homogénéité géomorphologique assez faible, avec des secteurs ayant localement une pente et une puissance plus forte. Sur la partie centrale de ce tronçon, où sont situés les bras morts, une pente de 0.0002 et une puissance spécifique de 6.18 W/m^2 ont été mesurées en moyenne, ce qui correspond aux valeurs obtenues pour le tronçon 11.

Bien que certains recoupements de méandre aient eu lieu entre 1950 et 2009 sur des tronçons plus en amont (tronçons 1-b et 1-e), il peut être par ailleurs remarqué que ces recoupements de méandres ne sont plus des bras morts en 2009 (c'est-à-dire qu'ils ne contiennent plus d'eau). La faculté de drainage de la partie amont de la rivière, avec des dépôts principalement de till et des pentes plus fortes, semble être un facteur explicatif. À l'opposé, parmi les bras morts observés au tronçon 7, aucun n'a été formé récemment. Le drainage de ces bras morts semble donc être beaucoup plus lent, et les pentes faibles, ainsi que les dépôts plus fins (marins) pourraient expliquer ce phénomène. Sur le tronçon 11, bien que de nombreuses cicatrices de bras morts soient visibles dans la plaine alluviale, peu contiennent encore de l'eau sur les photographies de 2009 alors que les dépôts sont également fins et la pente faible. Des activités humaines peuvent être à l'origine de ce phénomène, tel que décrit à la section suivante.

7.3.4 Impacts anthropiques

L'étude des photographies aériennes, ainsi que les observations de terrain, ont permis de constater à plusieurs occasions que la mobilité, et les habitats qui en sont tributaires, peuvent être altérés par des activités humaines.

Ainsi, le tronçon 5, situé au village de West-Brome, montre plusieurs exemples d'interventions humaines non désirables (figure 7-4). En particulier, des interventions de linéarisations importantes ont été effectuées sur ce tronçon. Une forte instabilité c'est développée à cet endroit, avec un reméandrement rapide, et une érosion pouvant atteindre 1,6 m/an. Ce reméandrement est venu menacer la voie ferrée, située très proche de la rivière, et un enrochement important y a été réalisé. Les parties linéarisées de la rivière n'étant pas en processus de reméandrement sont par ailleurs également en grande partie stabilisées. Cet exemple illustre bien comment une intervention humaine peut nuire à l'habitat aquatique et riverain, tout en se révélant être par ailleurs une source d'interventions supplémentaires. Ainsi, non seulement l'habitat du poisson a été très fortement perturbé dans les sections linéarisées et par les nombreux enrochements, mais la diversité d'habitats riverains dans l'espace de mobilité a également fortement diminué. Cette diversité d'habitat semble se rétablir dans la partie en reméandrement, avec l'apparition de secteurs boisés inondables à l'intérieur des méandres et de nombreux bancs. Cependant, les pertes en habitats sont certainement encore importantes dans le secteur.



Figure 7-4 – Interventions anthropiques visibles au tronçon 5.

Les sections entourées en violet sont des sections encore linéarisées. Sur la partie centrale de l'image, un reméandrement important est en cours.

Les interventions humaines peuvent également venir altérer les bras morts, tel que le montre l'étude plus approfondie du tronçon 11. Sur ce tronçon, deux recoupements ont eu lieu récemment, et de nombreuses cicatrices et anciens bras morts sont présents sur la plaine alluviale. Un bilan de l'état des bras morts a été réalisé pour les tronçons 7 et 11, présenté au tableau 7-4. Ainsi, il peut être constaté qu'alors qu'aucune évolution n'a eu lieu sur les bras morts du tronçon 7, 23% de la superficie des bras morts du tronçon 11 a été convertie en milieu agricole, 26% de la superficie des bras morts a été drainée tout en conservant une végétation naturelle, et 51% est demeurée intacte. Les conversions des bras morts en milieu agricole sont, sans ambiguïté possible, le résultat de remblaiements intentionnels effectués par les agriculteurs. Le drainage des bras morts peut également être relié aux activités agricoles, sans que cela soit intentionnel. Il est en effet probable que le drainage des terres agricoles entourant les bras morts abaisse suffisamment le niveau de la nappe phréatique pour drainer également les bras morts. Au total, c'est donc 49% de la superficie de bras morts au tronçon 11 qui a été altérée par les activités

agricoles. À cela, il faut ajouter 61% de bras morts supplémentaires, en superficie, qui aurait probablement dû être créés entre 1950 et 2009, et où des interventions humaines de stabilisation de berge et de terrassement ont visiblement été effectuées pour empêcher ces recouplements. Si l'on considère l'ensemble des bras morts altérés (drainés ou remblayés) et empêchés sur le tronçon 11 par rapport aux bras morts existant en 2009, c'est 213% de plus de bras morts, en superficie, qui devraient exister dans des conditions naturelles. Il apparaît donc que la pression agricole dans le tronçon 11 est très forte, et que cette pression anthropique diminue drastiquement la quantité de bras morts dans ce tronçon.

Tableau 7-4 – États des bras morts aux tronçons 7 et 11, en superficie.

	Tronçon 11	Tronçon 7
Bras morts existant en 1950 (m ²)	2630	40798
Recoupement entre 1950 et 2009 (m ²)	48271	0
Total des bras morts existant en 2009 (m ²)		40798
Bras morts empêchés entre 1950 et 2009 (m ²)	31071	0
Bras morts remplacés par agriculture :		
... parmi ceux créés avant 1950 (m ²)	0	0
... parmi ceux créés entre 1950 et 2009 (m ²)	11528	0
... total (m ²)	11528	0
Bras morts existant en 2009 (avec présence d'eau) :		
... parmi ceux créés avant 1950 (m ²)	1691	40798
... parmi ceux créés entre 1950 et 2009 (m ²)	24524	0
... total (m ²)	26215	40798
Bras morts drainés en 2009 (avec végétation naturelle) :		
... parmi ceux créés avant 1950 (m ²)	939	0
... parmi ceux créés entre 1950 et 2009 (m ²)	12220	0
... total (m ²)	13159	0

Les tronçons 6 et 11 sont donc des exemples où la pression anthropique pour l'utilisation du territoire à des fins agricole est venue limiter la mobilité du chenal et diminuer les habitats spécifiques reliés à cette mobilité. Si la perte de mobilité et de diversité d'habitats dans la plaine alluviale peut être en partie évaluée à partir des photographies aériennes, la perte d'habitats fluviaux est plus difficile à évaluer. En particulier, la destruction historique des embâcles de bois, bien que non étudiée dans la recherche

présentée ici, a été et est probablement encore importante. Le « nettoyage » des cours d'eau est en effet une pratique encore couramment effectuée, et promue, comme il a été vu, par la réglementation en vigueur.

Alors que les tronçons 6 et 11 subissent principalement des pressions anthropiques liées à l'utilisation agricole du territoire, d'autres interventions humaines peuvent venir interférer avec les processus de mobilité et les habitats riverains. Ainsi, sur les centres urbains comme la ville de Cowansville, il n'a pas été possible de connaître la mobilité naturelle du cours d'eau ou les habitats potentiels possibles dans ce secteur en raison du manque de données sur l'état naturel du cours d'eau. Cette section est en effet, depuis les premières photographies disponibles, fortement urbanisée. Il est cependant possible, et même probable, qu'une mobilité y aurait naturellement lieu. Par ailleurs, le barrage de Cowansville, formant le lac Davignon, créé en 1969 pour fournir à la ville une réserve d'eau potable, est venu également détruire une zone où la mobilité était probablement source d'une forte diversité d'habitat. En effet, les photographies disponibles avant l'enneigement du secteur (figure 7-5) montrent que cette zone comportait de nombreux bras morts ainsi que des méandres aux formes complexes.

Il ressort donc globalement de cette étude que les activités humaines peuvent venir limiter directement la mobilité, ou bien les habitats issus de cette mobilité, et ce parfois de manière importante. Ces perturbations anthropiques sont visibles sur l'ensemble du corridor de mobilité, et il apparaît donc pertinent face à ce constat de protéger l'espace de mobilité des cours d'eau.



Figure 7-5 – La Yamaska Sud-Est au lac Davignon en 1964.

8 Conclusion et perspectives de recherche futures

La cartographie des espaces de mobilité sur les trois rivières étudiées a permis de mettre en évidence les limites, avantages et incertitudes reliés aux méthodologies employées. Il en ressort que la prédiction de la mobilité des rivières à court terme, par la cartographie de l'espace des aléas de mobilité, est un exercice difficile, aux nombreuses sources d'erreur et approximations, et nécessitant des décisions relevant de l'expertise d'un hydrogéomorphologue. Des facteurs inconnus ou difficiles à évaluer, comme en particulier les modifications géomorphologiques liées aux changements climatiques, viennent ajouter encore plus d'incertitude à la prédiction de la mobilité. Cependant, les analyses effectuées pour la cartographie de l'espace des aléas de mobilité fournissent des informations précieuses sur le dynamisme des cours d'eau pour une gestion des territoires riverains. La cartographie du corridor de mobilité apparaît en comparaison comme une approche plus simple, plus facilement applicable sur un cours d'eau que la cartographie de l'espace des aléas de mobilité. Il s'agit également d'une approche plus conservatrice, qui va généralement couvrir un plus grand territoire.

Par ailleurs, l'étude des habitats a permis de montrer que la mobilité des rivières peut être source d'une diversité d'habitats qui peut varier selon les caractéristiques géomorphologiques des cours d'eau. Il convient donc d'identifier et de protéger l'ensemble des zones mobiles de nos cours d'eau, d'autant plus que les impacts humains peuvent venir restreindre la mobilité. L'analyse du dynamisme des rivières, telle que réalisée pour établir la cartographie de l'espace des aléas de mobilité, est une méthode

permettant l'identification de ces zones. Il apparaît donc que l'étude du dynamisme des rivières est un outil devant être considéré pour la gestion des rivières, tant d'un point de vue de gestion du risque que pour la préservation de l'intégrité des écosystèmes.

L'étude des habitats reliés à la mobilité, ainsi que l'impact que les activités humaines peuvent avoir sur ces habitats, a montré non seulement l'importance de la mobilité pour le maintien des habitats aquatiques mais aussi pour les habitats riverains. L'importance écologique des bras morts et leur sensibilité aux perturbations anthropiques, ainsi que le rôle de l'érosion et des dépôts de sédiments pour le renouvellement de la plaine alluviale, montrent qu'il est pertinent de protéger l'ensemble du corridor de mobilité des cours d'eau. L'étude des liens entre habitats et mobilité au Québec apparaît par ailleurs à approfondir. En particulier, il existe des lacunes dans la littérature scientifique sur les espèces et écosystèmes tributaires des processus de mobilité pour le nord-est de l'Amérique du Nord. Le rôle environnemental des bras morts, des débris ligneux et du renouvellement de la plaine alluviale pourrait être approfondi. Une étroite collaboration entre biologistes et géomorphologues fluviaux est nécessaire pour cela.

Afin de rétablir la mobilité, et la diversité d'habitats qui lui est associée, la mise en place d'un espace de mobilité, correspondant au corridor de mobilité cartographié, à l'intérieur duquel les interventions humaines sont limitées et plus fortement réglementées, semble donc une option pertinente. Limiter les activités humaines dans cet espace semble d'ailleurs une nécessité face aux incertitudes liées aux comportements des rivières et aux risques qui en découlent. Pour pouvoir établir ces aires protégées dans les corridors de mobilité, il est nécessaire de pouvoir appliquer la méthodologie de cartographie exposée dans cette recherche à l'ensemble du territoire québécois. La complexité de la méthode

employée pour la cartographie ne permettant pas aisément sa généralisation à l'ensemble de la province, un travail de simplification de la méthode, et une évaluation de la perte de qualité de la cartographie résultante, pourraient être envisagés. Ce travail semble d'autant plus pertinent qu'il pourrait permettre la cartographie des espaces de mobilité des rivières du Nord québécois, où peu de données sont disponibles, préalablement à son développement, dans le but d'éviter au nord les erreurs commises dans le sud du Québec avec l'implantation d'activités humaines dans des zones contre-indiquées.

9 Références

- Abad, J.D., et M. H. Garcia. 2006. RVR meander: A toolbox for re-meandering of channelized streams. *Computers and Geosciences*, 32(1) : 92–101.
- Bagnold, R. A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. *USGS Professional Paper*, 422-I : 37.
- Bartley, R., R. J. Keen, A. A. Hawdon, P. B. Hairsine, M. G. Disher et A. Kinsey-Henderson. 2008. Bank erosion and channel width change in a tropical catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33 (14) : 2174-200.
- Bauch, G. D., et E. J. Hickin. 2011. Rate of floodplain reworking in response to increasing storm-induced floods, Squamish River, south-western British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36 (7) : 872-84.
- Bernhardt, E. S., M. A. Palmer, J. D. Allan, G. Alexander, K. Barnas, S. Brooks, J. Carr, , S. Clayton, C. Dahm, J. Follstad-Shah, D. Galat, S. Gloss, P. Goodwin, D. Hart, B. Hassett, R. Jenkinson, S. Katz, G. M. Kondolf, P. S. Lake, R. Lave, J. L. Meyer, T. K. O'Donnell, L. Pagano, B. Powell et E. Sudduth. 2005. Synthesizing U.S. river restoration efforts. *Science*, 308 (5722) : 636-7.
- Bernot, V., V. Calland, J.-P. Bravard et R. Foussadier. 1996. La sectorisation longitudinale du Vidourle (Gard-Hérault) : une méthode appliquée à la gestion environnementale de l'espace fluvial méditerranéen. *Revue de géographie de Lyon*, 71 (4) : 323-339.
- Biron, P.M., T. Buffin-Bélanger, M. Larocque, , S. Demers, T. Olsen, M.-A. Ouellet, G. Choné, C.-A. Cloutier et M. Needelman. 2013-a. Espace de liberté: un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques. Rapport Ouranos, projet #510014-101, 122p.
- Biron, P.M., G. Choné, T. Buffin-Bélanger, S. Demers et T. Olsen. 2013-b. Improvement of streams hydro-geomorphological assessment using LiDAR DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*. À paraître (manuscrit accepté).
- Blann, K. L., J. L. Anderson, G. R. Sands et B. Vondracek. 2009. Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39 (11): 909-1001.
- Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier et A. G. Roy. 2010. Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology*, 384: 65–83
- Brierley, G. J., et K. A. Fryirs. 2005. Geomorphology and river management: Applications of the river styles framework. Malden, MA: Blackwell Pub.

- Brookes, A. 1988. Channelized rivers :Perspectives for environmental management. Chichester; New York: Wiley.
- Cahoon, B., et M. Kline. 2006. *Alternatives for River Corridor Management*. Vermont DEC River Management Program, 13 p. [En ligne]
<http://www.friendsofthemadriver.org/documents/ManagementAlternatives.pdf>
- CEHQ (Centre d'expertise hydrique du Québec). 2012-a. Production de l'atlas 2012 illustrant les impacts des changements climatiques sur le régime hydrique des tributaires du fleuve Saint-Laurent à l'horizon 2050. Centre d'Expertise Hydrique du Québec. Direction de l'expertise hydrique. Division de l'hydrologie et de l'hydraulique.
- CEHQ. 2012-b. *Historique des données des différentes stations hydrométriques*. [En ligne] http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/index.asp
- Church, M. 2006. Bed Material Transport and the Morphology of Alluvial River Channels. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34 (1) : 325-54.
- Curran, J.H., et M.H. McTeague. 2011. Geomorphology and bank erosion of the Matanuska River, southcentral Alaska. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5214, 52 p.
- De Rose, R. C., et L. R. Basher. 2011. Measurement of river bank and cliff erosion from sequential LIDAR and historical aerial photography. *Geomorphology*, 126 :132-147.
- Dosskey, M. G., P. Vidon, N. P. Gurwick, C. J. Allan, T. P. Duval, et R. Lowrance. 2010. The role of riparian vegetation in protecting and improving chemical water quality in Streams1. *Journal of the American Water Resources Association*, 46 (2) : 261-77.
- Easterbrook, D. J. 1999. *Surface processes and landforms*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency). 1999. Riverine Erosion Hazard Areas: Mapping Feasibility Study. Federal Emergency Management Agency, Technical Services Division, Hazards Study Branch.
- Florsheim, J. L., J. F. Mount et A. Chin. 2008. Bank erosion as a desirable attribute of rivers. *Bioscience*, 58 (6) : 519-29.
- Garcia, M. H., L. Bittner et Y. Niño. 1996. Mathematical modeling of meandering streams in Illinois: A tool for stream management and engineering. Hydraulic Engineering Series 43. Department of Civil Engineering. University of Illinois.
- Graf, W.L. 2000. Locational Probability for a Dammed, Urbanizing Stream: Salt River, Arizona, USA. *Environmental Management*, 25 (3) : 321-335

- Gregory, K. J. 2006. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79 (3) : 172-191.
- Gregory, K. J., G. Benito et P. W. Downs. 2008. Applying fluvial geomorphology to river channel management: Background for progress towards a palaeohydrology protocol. *Geomorphology*, 98 (1) : 153-72.
- Gouvernement du Québec. 2012. Loi sur les compétences municipales. L.R.Q., chapitre C-47.1.
- Güneralp, I., et B. L. Rhoads. 2009. Planform change and stream power in the Kishwaukee River watershed, Illinois: Geomorphic assessment for environmental management. In James, L.A., S.L. Rathburn et G.R. Whittecar (eds), *Management and Restoration of Fluvial Systems with Broad Historical Changes and Human Impacts: Geological Society of America Special Paper 451* : 109-18.
- Gurnell, A. M. 1997. Channel change on the river Dee meanders, 1946-1992, from the analysis of air photographs. *Regulated rivers: Research and management*, 13:13-26.
- Hickin, E. J., et G. C. Nanson. 1984. Lateral migration rates of river bends. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (11) : 1557-67.
- Hooke, J. M. 1999. Decades of change: Contributions of geomorphology to fluvial and coastal engineering and management. *Geomorphology*, 31 (1) : 373-389.
- Hooke, J. M. 2003. River meander behaviour and instability: a framework for analysis. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 28(2) : 238-253.
- Hugues, M. L., P. F. McDowell et W. A. Marcus. 2006. Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implication for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74 :1-16.
- Ikeda, S., G. Parker et K. Sawai. 1981. Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development. *Journal of Fluid Mechanics*, 112 : 363–377.
- Kline, M., et B. Cahoon. 2010. Protecting river corridors in Vermont. *Journal of the American Water Resources Association*, 46 (2): 227-36.
- Kline, M., et K. Dolan. 2008. Vermont ANR River Corridor Protection Guide: Fluvial Geomorphic-Based Methodology to Reduce Flood Hazards and Protect Water Quality. Vermont Agency of Natural Resources. Waterbury, Vermont.
- Kondolf, G. M. 2006. River restoration and meanders. *Ecology and Society*, 11 (2) : 42.

- Kondolf, G. M. 2011. Setting goals in river restoration: When and where can the river “Heal itself”? In *Stream restoration in dynamic fluvial systems: Scientific approaches, analyses, and tools*. Vol. 194, 29-43. Washington, DC: AGU.
- Konrad, C., H. Berge, R. Fuerstenberg, K. Steff, T. Olsen et J. Guyenet. 2011. Channel Dynamics in the Middle Green River, Washington, from 1936 to 2002. *Northwest Science*, 85 (1) : 1-14.
- Larsen, E.W., A.K. Fremier et E.H. Girvetz. 2006-a. Modeling the effects of variable annual flow on river channel meander migration patterns, Sacramento River, California, USA. *Journal of the American Water Resources Association*, 42 (4) : 1063-1075
- Larsen, E.W., A.K. Fremier et S.E. Greco. 2006-b. Cumulative effective stream power and bank erosion on the Sacramento River, California, USA. *Journal of the American Water Resources Association*, 42 (4) : 1077-1097
- Larsen, E.W., et S.E. Greco. 2002. Modeling Channel Management Impacts on River Migration: A Case Study of Woodson Bridge State Recreation Area, Sacramento River, California, USA. *Environmental Management*, 30 (2) : 209-224
- Latterell, J. J., et R. J. Naiman. 2007. Sources and Dynamics of Large Logs in a Temperate Floodplain River. *Ecological Applications*, 17 (4) : 1127-41.
- Latterell, J. J., J. S. Bechtold, T. C. O'Keefe, R. Van Pelt et R. J. Naiman. 2006. Dynamic patch mosaics and channel movement in an unconfined river valley of the Olympic Mountains. *Freshwater Biology*, 51 (3) : 523-44.
- Mackin, J. H. 1948. Concept of the graded river. *Geological Society of America Bulletin*, 59 (5) : 463-512.
- Mailhot, A., S. Duchesne, D. Caya et G. Talbot. 2007. Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, 347 : 197– 210.
- Malavoi, J. R., J. P. Bravard, H. Piégay, E. Hérouin et P. Ramez. 1998. Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau. Guide technique no. 2, SDAGE RMC, 39 pp.
- Mayer, P. M., S. K. Reynolds et T. J. Canfield. 2005. Riparian buffer width, vegetative cover, and nitrogen removal effectiveness: a review of current science and regulation. Rapport de l'Environmental Protection Agency.
- Motta, D. 2011. A GIS-based computational platform for physically-based bank evolution and meander migration: RVR Meander. Présentation effectuée à South Lake Tahoe. [En ligne]
<http://www.rvrmeander.org/shortcourses/2011/TAHOE/presentations/RVR%20Meander%20-%20Short%20Course%20Tahoe%202011%20-%20RVR%20Meander.pdf>

Motta, D., J. D. Abad, E. J. Langendoen et M.H. Garcia. 2011. A simplified 2D model for meander migration with physically-based bank evolution. *Geomorphology*. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.06.036.

MDDEP (Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs). 2005. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Loi sur la qualité de l'environnement (L.R.Q., c. Q-2, a. 2.1). [En ligne]
http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R35.htm

MRC de Matane. 2010. Règlements de la Municipalité régionale de comté de Matane (Québec). Règlement numéro 242-2010. [En ligne]
http://www.mrcdematane.qc.ca/images/Upload/Files/gestion_eau/reglement_242_2010.pdf

MRC Brome-Missisquoi. 2009. Règlement numéro 03-0406 Régissant les Matières Relatives à L'Écoulement des Eaux des Cours d'eau de la MRC Brome-Missisquoi, Modifié par les Règlements 06-0607 et 04-0409. [En ligne]
http://mrcbm.qc.ca/common/documentsContenu/eau_politique_reglement.pdf

MRNF (Ministère des ressources naturelles et de la faune). 2003. Fiche sur le nettoyage léger des cours d'eau. [En ligne]
http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/faune/habitat_poisson_nettoyage_leger.pdf

Naiman, R., J. Bechtold, T. Beechie, J. Latterell et R. Van Pelt. 2010. A process-based view of floodplain forest patterns in coastal river valleys of the Pacific Northwest. *Ecosystems*, 13 (1) : 1-31.

Nanson, G. C., et E. J. Hickin. 1986. A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 97 (4) : 497-504.

O'Connor, J.E., M.A. Jones et T.L. Haluska. 2003. Flood plain and channel dynamics of the Quinault and Queets Rivers, Washington, USA. *Geomorphology*. 51 : 31-59

Ollero, A. 2010. Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology*, 117: 247-260.

Olsen, T., S. Demers, J. Dubé, T. Buffin-Bélanger et F. Morneau. 2012. Cartographie des risques fluviaux dans la vallée de la rivière Matane. Volume 2: Guide méthodologique. Rapport remis au Ministère de la sécurité publique: 32 p.

Ouranos. 2010. Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Guide destiné au milieu municipal québécois. Montréal (Québec), 48 p.

Parish Geomorph. 2004. *Belt Width Delineation Procedures*. Rapport 98-023 soumis à Toronto and Region Conservation Authority.

Piégay, H., M. Cuaz, E. Javelle et P. Mandier. 1997. Bank erosion management based on geomorphological, ecological and economic criteria on the Galaure river, France. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13 (5) : 433-48.

Piégay, H., S. E. Darby, E. Mosselman et N. Surian. 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: A sustainable approach to managing bank erosion. *River Research and Applications*, 21 (7) : 773-89.

Pont, D., H. Piégay, A. Farinetti, S. Allain, N. Landon, F. Liebault, B. Dumont et A. Richard-Mazet. 2009. Conceptual framework and interdisciplinary approach for the sustainable management of gravel-bed rivers: The case of the Drôme River basin (SE France). *Aquatic Sciences*, 71: 356-370.

Rapp, C. F., et T. B. Abbe. 2003. A framework for delineating channel migration zones. Washington State Department of Ecology, Washington State Department of Transportation, report; 66 pp.

Rhoads, B. L., et M. A. Urban. 1997. Human-induced geomorphic change in low-energy agricultural streams: an example from east-central Illinois. *Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*, édité par S.S.Y. Wang, E.J. Langendoen et F.D. Shields Jr.

Richards, K., J. Brasington et F. Hugues. 2002. Geomorphic dynamics of floodplains: ecological implications and a potential modelling strategy. *Freshwater Biology*, 47 : 559-579

Richardson, J. S., E. Taylor, D. Schluter, M. Pearson et T. Hatfield. 2010. Do riparian zones qualify as critical habitat for endangered freshwater fishes? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 67 (7) : 1197-204.

Rinaldi, M., C. Simoncini et H. Piégay. 2009. Scientific design strategy for promoting sustainable sediment management: the case of the Magra river (central-northern Italy). *River Research and Applications*, 25 : 607-625.

Rosgen, D. L. 1996. *Applied river morphology*. Pagosa Springs, Colo.: Wildland Hydrology.

Rosgen, D. L. 2001. A Practical Method of Computing Streambank Erosion Rate. 7th Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25-29. Reno, Nevada.

Schmitt, L., G. Maire et J. Humbert. 2000. Typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau : vers un modèle adapté à la gestion du milieu physique des rivières du versant sud-occidental du fossé rhénan. *Geocarrefour* 75 (4) : 347-363.

Schmitt, L. G. Maire, P. Nobelis et J. Humbert. 2007. Quantitative morphodynamic typology of rivers: a methodological study based on the French Upper Rhine basin. *Earth Surface Processes and Landforms* 32 : 1726-1746.

Schumm, S. A., et R. W. Lichty. 1965. Time, space, and causality in geomorphology. *American Journal of Science*, 263 (2) : 110-9.

Sear, D.A. 1996. The Sediment System and Channel Stability. River Channel Restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects. Edité par A. Brookes and F.D. Shields Jr. John Wiley & Sons Ltd.

Stella, J., M. Hayden, J. Battles, H. Piégay, S. Dufour et A. Fremier. 2011. The role of abandoned channels as refugia for sustaining pioneer riparian forest ecosystems. *Ecosystems*. DOI: 10.1007/s10021-011-9446-6

Summerfield, M. A. 1991. Global geomorphology : An introduction to the study of landforms. Harlow, Essex, England); New York: Longman Scientific & Technical ; Wiley.

Thieler, E.R., E.A. Himmelstoss, J.L. Zichich et A. Ergul. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

Trenhaile, A. S. 2010. *Geomorphology :A canadian perspective*. 4th ed. Don Mills, Ont.: Oxford University Press Canada.

VANR (Vermont Agency of Natural Resources). 2006. Vermont Regional Hydraulic Geometry Curves. Vermont Stream Geomorphic Assessment - Appendix J. Vermont Agency of Natural Resources. River Management Program. 10 p. [En ligne] http://www.vtwaterquality.org/rivers/docs/rv_hydraulicgeocurves.pdf

Verhaar, P. M., P. M. Biron, R. I. Ferguson et T. B. Hoey. 2010. Numerical modelling of climate change impacts on Saint-Lawrence River tributaries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35:1184-1198.

Verhaar, P. M., P. M. Biron, R. I. Ferguson et T. B. Hoey. 2011. Implications of climate change in the twenty-first century for simulated magnitude and frequency of bed-material transport in tributaries of the Saint-Lawrence River. RID A-7610-2008. *Hydrological Processes*, 25 (10) : 1558-73.

Walker, M., et I. D. Rutherford. 1999. An approach to predicting rates of bend migration in meandering alluvial streams. In *Proceedings of the Second Australian Stream Management Conference*, édité par Rutherford ID et Bartley R. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology: Melbourne, 659–665.

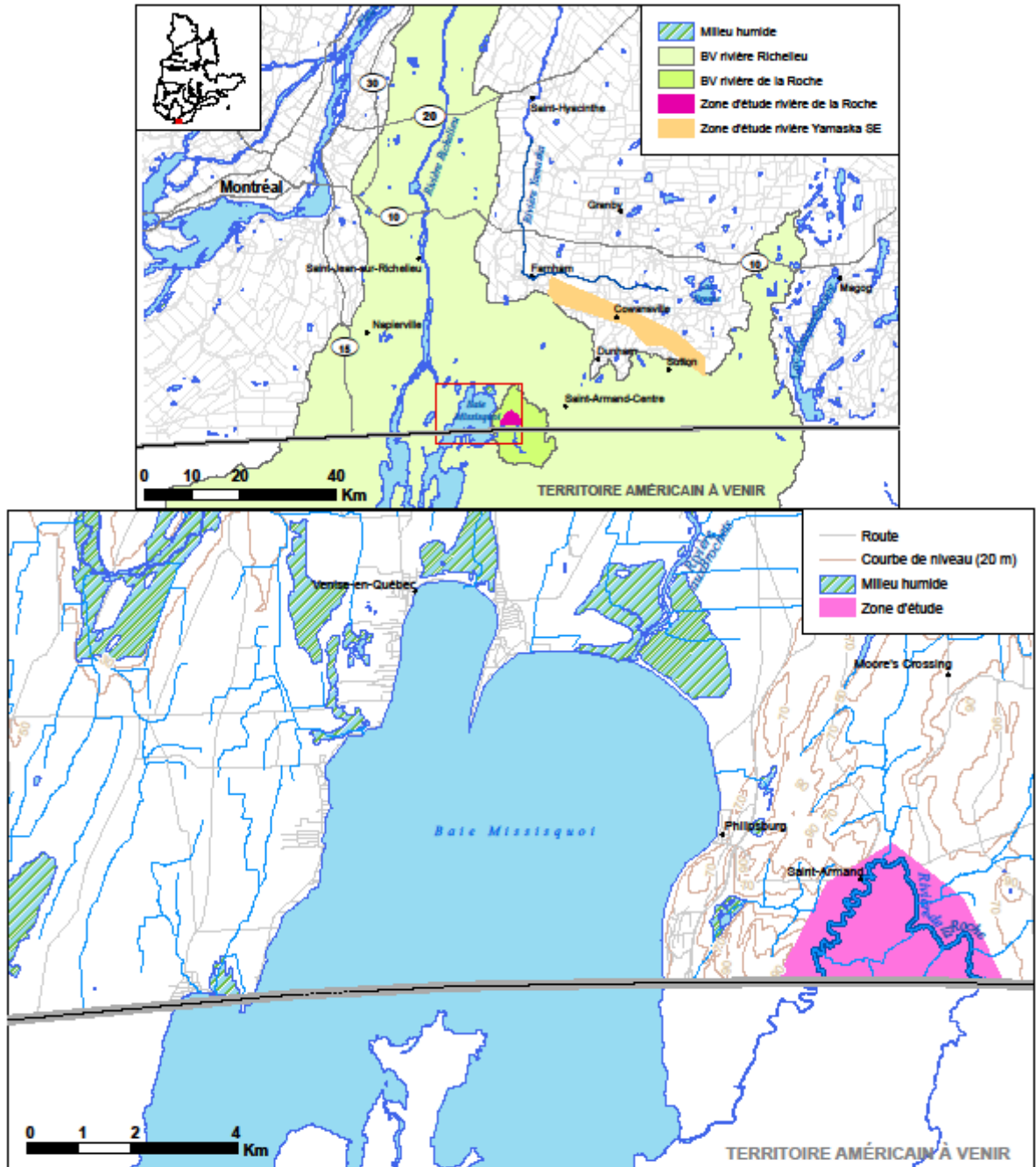
Ward, J. V., K. Tockner et F. Schiemer. 1999. Biodiversity of floodplain river ecosystems: Ecotones and connectivity¹. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15 (1-3): 125-39.

Wenger, S. 1999. A Review of the Scientific Literature on Riparian Buffer Width, Extent and Vegetation. Institute of Ecology, University of Georgia, Athens, Georgia, USA.

Annexe I – Cartes de situations des rivières étudiées

Projet Espace de liberté

Localisation du tronçon de la rivière de la Roche

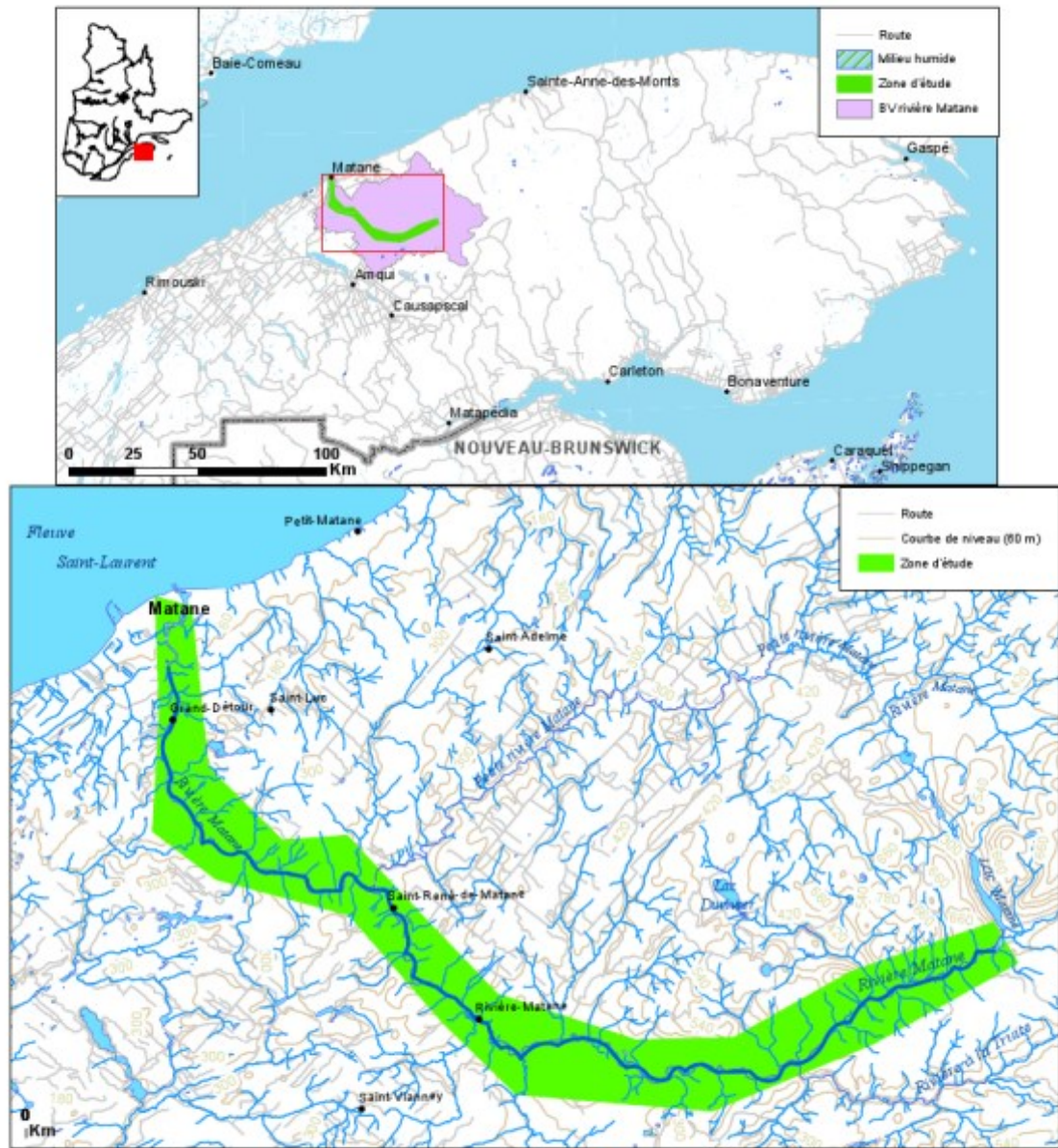


Source: BNDT, 1:50 000, feuillet SNRC 31H03
Projection: NAD 83 UTM Zone 18N
Date de création: Février 2011



Carte réalisée par Marie-Audray Ouellet, UQAM

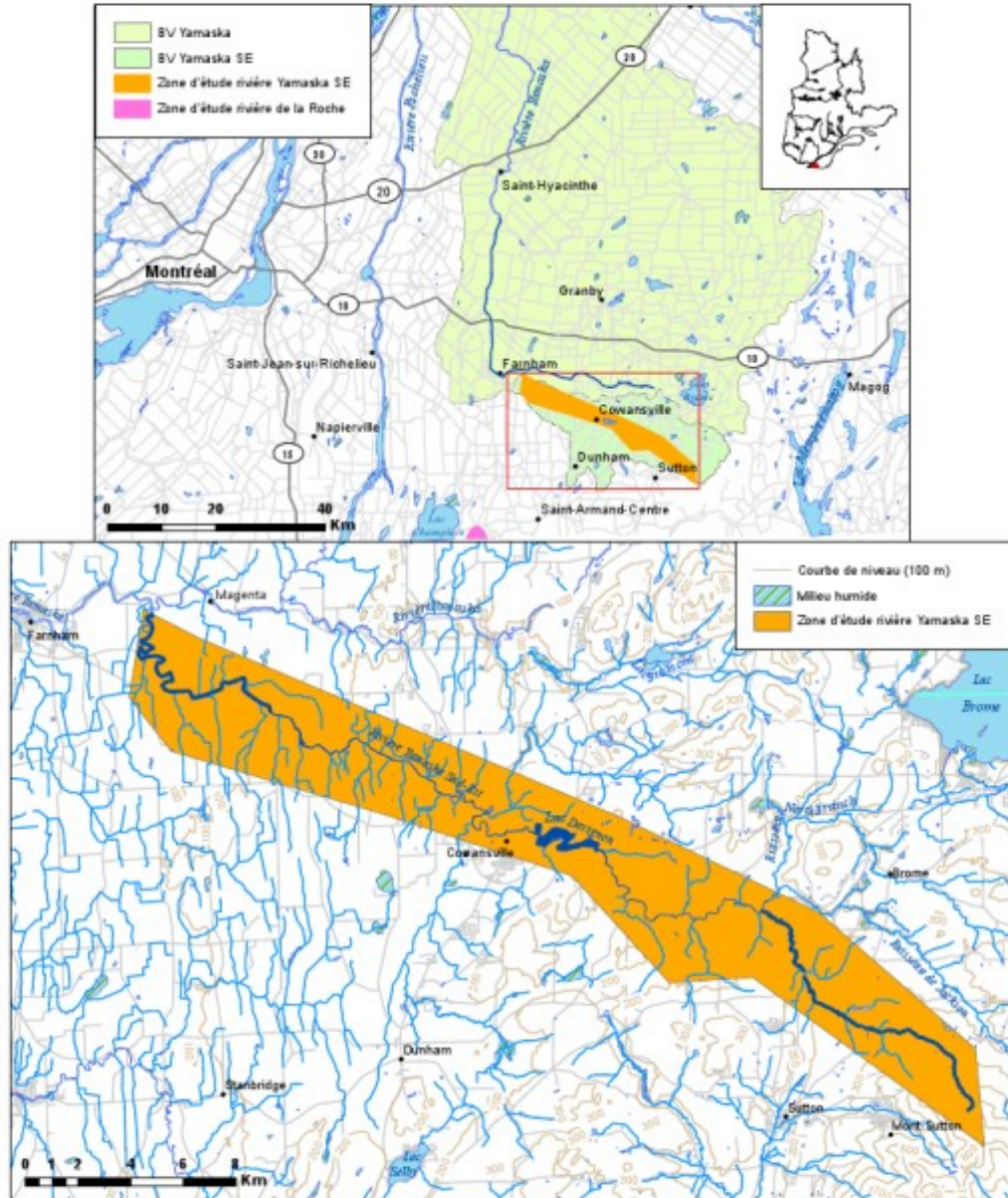
Localisation du tronçon d'étude de la rivière Matane



Source: BNDT, 1:50 000, feuillets SNRC 21N, 21O, 21P, 22A, 22B, 22C, 22G, 22H
Projection: NAD 83 UTM Zone 19N
Date de création: Février 2011

▲ Carte réalisée par Marie-Audrey Ouellet, UQAM

Localisation du tronçon de la rivière Yamaska Sud-Est



Source: BNDT, 1:50 000, feuillets SNRC 31H02, 31H07
Projection: NAD 83 UTM Zone 18N
Date de création: Février 2011



Carte réalisée par Marie-Audray Ouellet, UQÀM

**Annexe II - Détail des zones d'études et situation des affluents étudiés
sur la Yamaska Sud-Est**

