

ESPACE DE LIBERTÉ: UN CADRE DE GESTION INTÉGRÉE POUR LA CONSERVATION DES COURS D'EAU DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Équipe de recherche et rédaction

Pascale Biron
Thomas Buffin-Bélanger
Marie Larocque
Sylvio Demers
Taylor Olsen
Marie-Audray Ouellet
Guéno­lé Choné
Claude-André Cloutier
Michael Needelman

JUILLET 2013

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.

Ce projet a fait l'objet d'un soutien financier du Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier certaines personnes qui ont contribué de façon significative aux travaux dans le cadre de ce projet. Merci à Jeff McKenzie de l'université McGill pour l'utilisation de son DTS. Nous remercions Rob Carver, également de l'université McGill, pour son aide logistique avec les mesures DTS, ainsi que Hughes Lachance et J.F. Sabourin et associés Inc. (JFSA) pour leur contribution importante à la modélisation numérique HEC-RAS. La contribution de François Brissette, de l'ÉTS, doit aussi être soulignée, car son travail nous a permis d'obtenir une gamme de simulations hydroclimatiques en climat futur pour la rivière Yamaska Sud-Est et la rivière Matane. Un grand merci également à Normand Bergeron pour le prêt de son ensemble d'images à haute résolution de la rivière Yamaska Sud-Est, obtenu par survol d'hélicoptère. Merci aussi à François Moquin, du département de géographie de l'UQAM, pour l'utilisation du GPS différentiel lors de nos campagnes de terrain.

Nous tenons également à remercier grandement tous les assistants et assistantes de terrain qui nous ont permis de recueillir des données de qualité dans une atmosphère empreinte de bonne humeur : Maxime Boivin (UQAR), Johan Bérubé (UQAR), Ariane Lelièvre (UQAR), Jean-Philippe Marchand (UQAR), Antonin Montané (UQAR), Larissa Holman (U. Concordia), Lecia Mancini (U. Concordia), William Massey (U. Concordia), Fernanda Paulo de Oliveira (U. Concordia), Cyril Usnik (U. Concordia) et Diogo Barnetche (UQAM).

RÉSUMÉ

Les changements climatiques anticipés produiront des crues plus fréquentes et des étiages plus prononcés qui menaceront la sécurité publique et l'état des écosystèmes fluviaux. L'espace de liberté des cours d'eau est un cadre de gestion intégrée considérant l'hydrogéomorphologie des rivières. Il vise à identifier des espaces d'inondabilité et de mobilité du cours d'eau où on accepte de le laisser évoluer plutôt que de le contraindre dans un tracé façonné par les interventions anthropiques. Cette approche apparaît prometteuse pour une gestion durable dans un climat changeant, car elle maintient les fonctions physiques naturelles des cours d'eau (transport de l'eau et des sédiments), ce qui augmente leur résilience. L'espace de liberté reconnaît aussi le rôle majeur de la connectivité entre la rivière et la nappe phréatique, notamment par l'entremise des milieux humides qui contribuent à l'atténuation des crues et des étiages et à une amélioration de la qualité de l'eau.

Les objectifs de ce projet consistent à 1) développer l'approche de gestion des cours d'eau basée sur les concepts d'espace de liberté pour les cours d'eau du Québec et examiner sa mise en œuvre pour renforcer la capacité de résilience des rivières dans un contexte de changements climatiques; 2) évaluer la connectivité entre la rivière et la nappe afin de mieux comprendre le rôle des milieux humides dans l'espace de liberté des cours d'eau et 3) effectuer une analyse avantages-coûts de l'implantation d'un espace de liberté.

L'espace de liberté a été déterminé par l'approche hydrogéomorphologique et cartographié pour trois cours d'eau contrastés du Québec (rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est en Montérégie et rivière Matane en Gaspésie). La démarche consiste 1) d'une analyse de photographies historiques anciennes, de modèles numériques d'altitude et d'observations sur le terrain; 2) de mesures simultanées des niveaux et des températures de la nappe phréatique et du cours d'eau et 3) de simulations numériques pour estimer l'impact des changements climatiques sur la mobilité et l'inondabilité des cours d'eau.

La méthodologie développée pour définir l'espace de liberté est robuste et s'applique tant pour les cours d'eau agricoles (rivière de la Roche et Yamaska Sud-Est) que pour les rivières à saumon plus dynamiques comme la rivière Matane. L'espace de liberté inclut trois niveaux d'inondabilité (N1 : très fréquente et/ou avec forts courants, N2 : fréquente de faible courant, N3 : peu fréquente), deux niveaux de mobilité (M1 : à court terme (50 ans) et M2 : basée sur l'amplitude des méandres), ainsi que les milieux humides. Les analyses de sensibilité par simulation numérique révèlent que les limites de l'espace de liberté intègrent adéquatement la mobilité et l'inondabilité attendues dans un climat futur.

Une cartographie simplifiée de l'espace de liberté, à deux niveaux, est également produite. L'espace de liberté minimal (L1) inclut les inondations très fréquentes (N1), les milieux humides riverains ainsi que la mobilité à court terme (M1). C'est une zone où il ne devrait pas y avoir d'aménagement. La zone L2 représente quant à elle l'espace fonctionnel de la rivière (N2 et M2) qui devrait être protégé afin que la dynamique naturelle de la rivière puisse opérer en climat actuel et futur. Les aménagements dans cette zone devraient tenir compte des risques d'érosion et d'inondation.

Les résultats de l'analyse avantages-coûts suggèrent que l'aménagement d'espaces de liberté serait économiquement avantageux pour les trois cours d'eau. Malgré la perte du droit

de construire et de cultiver dans l'espace de liberté, accompagnée par une compensation financière pour les agriculteurs, des gains nets variant entre 0,7 et 3,7 millions de dollars sont estimés sur une période de 50 ans. Ceci est dû aux réductions des coûts de protection des berges déjà stabilisées et qui le seraient à l'avenir, mais aussi aux services écologiques rendus par les milieux humides et les bandes riveraines.

Une gestion par espace de liberté des cours d'eau du Québec exige un changement majeur dans nos perceptions et nos représentations des rivières qui, jusqu'à maintenant, ont été considérées comme des entités relativement statiques dans le paysage. Une telle approche apportera notamment comme avantage de faciliter l'adaptation aux risques liés à une plus grande variabilité des débits en climat futur par une gestion proactive qui améliore la santé des cours d'eau tout en étant avantageuse économiquement à moyen et à long terme. Elle contribuera également à diminuer les risques pour les infrastructures et la sécurité publique en utilisant une cartographie basée sur la dynamique des cours d'eau pour déterminer les zones où les aménagements devraient être interdits à l'avenir.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	ii
Résumé	iii
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xiv
Liste des annexes	xv
1. Introduction	1
2. Contexte et objectifs	2
3. Cadre théorique	4
3.1. Cours d'eau et changements climatiques	4
3.2. Espace de liberté.....	5
3.2.1. Espace de mobilité	5
3.2.2. Espace d'inondabilité	6
3.2.3. Contribution de l'eau souterraine et milieux humides	7
3.3. Analyse avantages-coûts	9
4. Méthodologie et données.....	11
4.1. Description des sites et données disponibles	11
4.1.1. Rivière de la Roche.....	12
4.1.2. Rivière Yamaska Sud-Est	14
4.1.3. Rivière Matane.....	15
4.2. Données climatiques et hydrologiques actuelles et futures.....	16
4.2.1. Modélisation climatique.....	17
4.2.2. Modélisation hydrologique	17

4.2.3. Indicateurs hydrologiques	18
4.2.4. Impact des changements climatiques sur les indicateurs hydrologiques	20
4.3. Espace de mobilité	21
4.3.1. Cartographie en climat actuel	21
4.3.1.1. Détermination de l'espace M2.....	23
4.3.1.2. Détermination de l'espace M1	25
4.3.2. Cartographie avec changements climatiques – Analyse de sensibilité avec RVR Meander	26
4.4. Espace d'inondabilité	29
4.4.1. Cartographie en climat actuel	29
4.4.1.1. La cartographie hydrogéomorphologique	29
4.4.1.2. Composition de l'espace d'inondabilité	30
4.4.2. Cartographie avec changements climatiques – Analyse de sensibilité avec HEC-RAS	36
4.5. Détermination de l'espace de liberté.....	36
4.6. Connectivité entre la rivière et la nappe.....	38
4.6.1. Cas de la rivière de la Roche	38
4.6.1.1. Milieux humides	39
4.6.1.2. Niveaux d'eau, débits et données météorologiques mesurés.....	40
4.6.1.3. Températures de l'eau	42
4.6.1.4. Isotopes stables de l'eau et radon.....	42
4.6.1.5. Analyse des séries temporelles.....	43
4.6.2. Cas de la rivière Matane	43
4.6.2.1. Niveaux d'eau, températures et précipitations mesurés	43
4.6.2.2. Analyse des séries temporelles.....	44
4.7. Analyse avantages-coûts	45

4.7.1. Les coûts	46
4.7.2. Les avantages	47
4.7.2.1. Coût de protection des berges	47
4.7.2.2. Réduction des inondations	48
4.7.2.3. Services écosystémiques.....	50
5. Résultats, analyse et discussion	52
5.1. Cartographie en climat actuel.....	52
5.1.1. Discussion sur l'incertitude: espace de mobilité	57
5.1.2. Discussion sur l'incertitude: espace d'inondabilité	59
5.2. Cartographie avec changements climatiques	61
5.2.1. Impacts des changements climatiques sur le climat.....	61
5.2.1.1. Température moyenne.....	61
5.2.1.2. Précipitations totales.....	63
5.2.1.3. Ratio de précipitations liquides et solides entre décembre et mars	63
5.2.1.4. Précipitations maximales annuelles sur 24 h entre mai et octobre	65
5.2.2. Impacts des changements climatiques sur l'hydrologie en général	66
5.2.2.1. Débit moyen.....	66
5.2.2.2. Débits de crue.....	67
5.2.2.3. Débits d'étiage d'été	70
5.2.2.4. Journée à mi-volume de la période de février à juin	71
5.2.2.5. Synthèse.....	71
5.2.3. Impacts des changements climatiques sur la mobilité.....	74
5.2.3.1. Simulation 1 - Ruisseau North Branch	74
5.2.3.2. Simulation 2 - Rivière Matane	76
5.2.4. Impacts des changements climatiques sur l'inondabilité	77

5.2.4.1. Robustesse de la cartographie hydrogéomorphologique.....	77
5.2.4.2. Sensibilité des vitesses d'écoulement et des profondeurs.....	81
5.2.5. Impacts des changements climatiques sur l'espace de liberté	83
5.3. Connectivité entre la rivière et la nappe.....	86
5.3.1. Cas de la rivière de la Roche	86
5.3.1.1. Analyse des milieux humides	86
5.3.1.2. Niveaux d'eau	87
5.3.1.3. Températures	91
5.3.1.4. Isotopes stables de l'eau et radon.....	95
5.3.2. Cas de la rivière Matane	98
5.3.3. Synthèse.....	101
5.4. Analyse avantages-coûts et espace de liberté.....	102
5.5. Rencontre avec les citoyens de Saint-Armand	108
6. Conclusions, recommandations et ouvertures.....	111
7. Références	114

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1	Localisation des trois cours d'eau retenus pour le projet.....	11
Figure 4.2	Carte piézométrique de la rivière de la Roche. Les valeurs en vert indiquent le niveau d'eau dans les puits inscrits dans la base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDEFP.....	13
Figure 4.3	Amplitude des méandres (« meander belt ») (Parish Geomorphic, 2004).....	23
Figure 4.4	Tronçons homogènes, axe des méandres et amplitude des méandres sur la rivière de la Roche.....	24
Figure 4.5	Détermination de l'espace de mobilité selon la nature des terrasses pour la rivière de la Roche. La limite de l'espace d'inondabilité (voir section 4.4.1) permet de situer l'emplacement des terrasses. Ici, 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.	24
Figure 4.6	Transects et zones d'érosion prévue sur 50 ans sur le ruisseau North Branch (tributaire de la rivière Yamaska Sud-Est).....	25
Figure 4.7	Des traces d'érosion visibles dans le champ montrent un début de recoupement de méandre (rivière de la Roche).....	27
Figure 4.8	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, ni l'extrapolation des taux de migration (ruisseau North Branch).	27
Figure 4.9	Positions historiques du ruisseau North Branch de 1950 à 2009 et résultat des simulations à tous les 10 ans à partir de la position de 1950. La simulation a été paramétrée pour reproduire un dynamisme et une amplitude de méandre équivalents aux observations historiques.....	28
Figure 4.10	Exemples de cartographies hydrogéomorphologiques appliquées aux rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane.	33
Figure 4.11	Exemples cartographiques de l'espace d'inondabilité appliqué aux rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane.	35
Figure 4.12	Localisation des stations de mesure sur la rivière de la Roche.....	39
Figure 4.13	La position des piézomètres (triangles orange) dans les milieux humides A) A et B) B.	40
Figure 4.14	Vue en coupe des profils de piézomètres sur les milieux humides A et B (les niveaux indiqués correspondent aux moyennes sur toute la durée de l'étude).	41
Figure 4.15	(A) localisation du site à Dancause; (B) topographie relative du site; (C) piézomètre type et forage pour son installation ; (D) localisation du réseau de piézomètres au site Dancause. Les points noirs représentent les piézomètres munis d'une sonde de température tandis que les cercles avec étoiles dans le milieu représentent les piézomètres munis d'une sonde de pression (Cloutier <i>et al.</i> , en prép.)	45

Figure 5.1	Espace de liberté sur la rivière Yamaska Sud-Est qui inclut un grand milieu humide riverain à l'est.....	52
Figure 5.2	Espace de liberté sur la rivière Yamaska Sud-Est : A) partie aval et B) partie amont. Le rectangle blanc représente le milieu humide de la Figure 5.1. Le tributaire North Branch est aussi cartographié.	53
Figure 5.3	Espace de liberté de la rivière de la Roche. Un fort contraste existe entre le secteur confiné à l'amont (à l'est) et le secteur non confiné. Le milieu humide A se trouve à la jonction entre les secteurs confinés et non confinés.....	54
Figure 5.4	Espace de liberté sur la rivière Matane et sur le tributaire Petite Matane.....	54
Figure 5.5	Espace de liberté dans les secteurs urbanisés : A) St-Armand (rivière de la Roche); B) Matane (rivière Matane); C) Cowansville (rivière Yamaska Sud-Est) et D) Saint-René-de-Matane (rivière Matane).....	55
Figure 5.6	Espace d'inondabilité (N1) et de mobilité (M1 et M2) pour une section de la rivière de la Roche.....	56
Figure 5.7	Impact potentiel de la voie ferrée située dans l'espace de liberté sur la migration de la rivière Yamaska Sud-Est à l'ouest de West Brome.....	58
Figure 5.8	Effet du seuil de puissance spécifique sur la composition de l'espace d'inondabilité sur la rivière Yamaska Sud-Est (municipalité de Brigham).....	60
Figure 5.9	Températures moyennes à la station climatique de Brome. A) Températures moyennes annuelles de 1971 à 2000. La courbe en pointillé indique une légère tendance à la hausse sur cette période. B) Températures moyennes journalières de 1971 à 2000. C) Dérives attendues des températures moyennes par l'ensemble des modèles climatiques pour les horizons 2050 et 2080. L'augmentation annuelle moyenne est de 2,5 °C pour l'horizon 2050 (trait horizontal gris pâle) et de 3,6 °C pour l'horizon 2080 (trait horizontal gris foncé).	62
Figure 5.10	Températures moyennes à la station climatique de Saint-René-de-Matane. A) Températures moyennes annuelles de 1971 à 2000. La courbe en pointillé indique une légère tendance à la hausse sur cette période. B) Températures moyennes journalières de 1971 à 2000. C) Dérives attendues des températures moyennes par l'ensemble des modèles climatiques pour les horizons 2050 et 2080. L'augmentation annuelle moyenne est de 2,5 °C pour l'horizon 2050 (trait horizontal gris pâle) et de 3,8 °C pour l'horizon 2080 (trait horizontal gris foncé).	62
Figure 5.11	Précipitations à la station climatique de Brome. A) Précipitations totales annuelles de 1971 à 2000. La courbe en pointillé indique une légère tendance à la baisse sur cette période. B) Précipitations mensuelles de 1971 à 2000. C) Dérives attendues des précipitations par l'ensemble des modèles climatiques pour les horizons 2050 et 2080. L'augmentation annuelle moyenne est de 7,9 % pour l'horizon 2050 (trait horizontal gris pâle) et de 11,3 % pour l'horizon 2080 (trait horizontal gris foncé).	64

Figure 5.12	Précipitations à la station climatique de Saint-René-de-Matane. A) Précipitations totales annuelles de 1971 à 2000. La courbe en pointillé indique une légère tendance à la hausse sur cette période. B) Précipitations mensuelles de 1971 à 2000. C) Dérives attendues des précipitations par l'ensemble des modèles climatiques pour les horizons 2050 et 2080. L'augmentation annuelle moyenne est de 10,5 % pour l'horizon 2050 (trait horizontal gris pâle) et de 14,8 % pour l'horizon 2080 (trait horizontal gris foncé).	64
Figure 5.13	Ratio de précipitations liquides et solides entre les mois de décembre et mars pour la période de référence (1971-2000) pour les rivières A) Yamaska Sud-Est et B) Matane. C) Dérives du ratio P liq : P sol pour les horizons 2050 et 2080 pour les deux rivières.....	65
Figure 5.14	Précipitations maximales annuelles sur 24 h entre les mois de mai et d'octobre pour la période de référence (1971-2000) pour les rivières A) Yamaska Sud-Est et B) Matane. C) Dérives des précipitations maximales annuelles sur 24 h pour les horizons 2050 et 2080 pour les deux rivières.	66
Figure 5.15	Débit moyen observé pour la période de référence (1971-2000) pour les rivières A) Yamaska Sud-Est et B) Matane. C) La médiane de l'ensemble des modèles climatiques prédit une très légère diminution des débits moyens sur la Yamaska Sud-Est et une légère augmentation sur la Matane. Les diagrammes à moustaches présentent l'étendue min-max ainsi que les 2.5 ^e , 10 ^e , 25 ^e , 50 ^e , 75 ^e , 90 ^e et 97.5 ^e quantiles.	67
Figure 5.16	Dérives des débits de crue pour la rivière Yamaska Sud-Est pour les horizons 2050 et 2080.	68
Figure 5.17	Dérives des débits de crue pour la rivière Matane pour les horizons 2050 et 2080.	69
Figure 5.18	Dérives des débits d'étiage Q_{2-7} et Q_{10-7} pour les rivières Yamaska Sud-Est et Matane pour les horizons 2050 et 2080.....	70
Figure 5.19	Journée à mi-volume de la période février à juin pour les rivières Yamaska Sud-Est et Matane pour les horizons 2050 et 2080.	71
Figure 5.20	Comparaison des positions historiques du chenal et des positions obtenues par la simulation en climat actuel.....	74
Figure 5.21	Comparaison des positions du chenal obtenues par la simulation en climat actuel et la simulation avec un débit augmenté de 10 %.....	75
Figure 5.22	Résultats des simulations et comparaison avec les positions historiques de la rivière Matane.....	76
Figure 5.23	Méthodologie du calcul de la surface inondée additionnelle. A) Plaine cartographiée avec la méthode hydrogéomorphologique; B) modélisation de la surface inondée avec HEC-RAS pour le Q_{20} actuel; C) surface inondée additionnelle; D) position du profil topographique et E) profil topographique.....	78
Figure 5.24	Superficies inondées additionnelles en pourcentage par rapport à la cartographie en climat actuel selon la dérive des débits projetés par les	

	changements climatiques. Les valeurs de débits incrémentés couvrent l'étendue entre le 10 ^e et le 90 ^e percentile des dérives projetées pour les horizons 2050 et 2080 (écart maximal pour les deux périodes) et 'X' est le 50 ^e percentile associé à l'horizon 2080.	79
Figure 5.25	Sensibilité de la tendance centrale (médiane) des vitesses d'écoulement en fonction de la dérive des débits 20 et 100 ans. Les valeurs de débits incrémentés couvrent l'étendue entre le 10 ^e et le 90 ^e percentile des dérives projetées pour les horizons 2050 et 2080 (écart maximal pour les deux périodes) et 'X' est le 50 ^e percentile associé à l'horizon 2080.	81
Figure 5.26	Sensibilité de la tendance centrale (médiane) des profondeurs d'écoulement en fonction de la dérive des débits 20 et 100 ans. Les valeurs de débits incrémentés couvrent l'étendue entre le 10 ^e et le 90 ^e percentile des dérives projetées pour les horizons 2050 et 2080 (écart maximal pour les deux périodes) et 'X' est le 50 ^e percentile associé à l'horizon 2080.	82
Figure 5.27	Matrices d'histogrammes de fréquences des profondeurs d'eau observées, converties en superficies de la plaine (m ²), en fonction de la dérive des débits projetés par les changements climatiques.	84
Figure 5.28	Matrices d'histogrammes de fréquences des vitesses d'écoulement observées, converties en superficies de plaine (m ²), en fonction de la dérive des débits projetés par les changements climatiques.	85
Figure 5.29	Variations des niveaux d'eau (élévation au-dessus du niveau de la mer) dans la rivière (ligne en noir) et dans les piézomètres d'avril à octobre 2012 pour le A) milieu humide A et B) milieu humide B (cf. Figure 4.13 pour la localisation des piézomètres).	87
Figure 5.30	Corrélations croisées entre le niveau dans la rivière et le niveau dans les trois piézomètres pour les milieux humides A et B en 2012.	89
Figure 5.31	Corrélations croisées entre les précipitations de Philipsburg et les niveaux d'eau dans la rivière et dans les piézomètres des deux milieux humides.	89
Figure 5.32	Température de l'eau dans les piézomètres des deux milieux humides.	90
Figure 5.33	Variations des niveaux d'eau (élévations au-dessus du niveau de la mer) dans la rivière et dans les piézomètres pour les deux milieux humides pour A) un événement de pluie survenu le 5 septembre (61 mm de précipitation) et B) un événement de pluie survenu le 6 octobre (27 mm de précipitation).	91
Figure 5.34	Variation de la température de l'eau dans la rivière de mai à octobre 2012 A) de l'amont à T05 et B) de T06 au milieu humide B. La température de l'air est aussi indiquée en gris (ligne grise tiretée) sur l'axe de droite.	92
Figure 5.35	Variation de la température de l'air (en vert) et de l'eau de la rivière au milieu humide A (en bleu) et B (en rouge) pour l'événement du A) 5 septembre et du B) 6 octobre. L'hydrogramme de crue est indiqué en gris (ligne tiretée) à titre indicatif afin de situer le pic de crue (les valeurs de débit ne correspondent pas aux valeurs sur les axes des ordonnées).	92

Figure 5.36	Variation spatiale de la température maximale mesurée par DTS dans le A) milieu humide A et B) milieu humide B. À noter que l'échelle de températures n'est pas la même dans les deux cas.	93
Figure 5.37	Températures moyennes et maximales mesurées à l'aide du DTS aux deux milieux humides.....	94
Figure 5.38	Écart-type des températures mesurées à l'aide du DTS aux deux milieux humides.....	94
Figure 5.39	Isotopes stables analysés dans les échantillons d'eau sur la rivière de la Roche.....	95
Figure 5.40	Variabilité dans les concentrations en radon le long de la rivière de la Roche lors de l'échantillonnage réalisé au mois d'août 2012.	96
Figure 5.41	Débits totaux et activité en ^{222}Rn mesurés et simulés.	97
Figure 5.42	Fluctuations des niveaux d'eau de la rivière et des niveaux piézométriques. Le numéro des piézomètres correspond à leur distance en ligne droite à la rivière (Cloutier <i>et al.</i> , en prép.).	98
Figure 5.43	A) Corrélations croisées entre les niveaux piézométriques et le niveau d'eau dans la rivière Matane pour l'événement du 5 au 12 septembre. B) Corrélations croisées entre les niveaux piézométriques et les précipitations pour l'événement du 5 au 12 septembre (Cloutier <i>et al.</i> , en prép.).....	99
Figure 5.44	Décalage entre le maximum de crue et le maximum piézométrique pour trois événements de crue (Cloutier <i>et al.</i> , en prép.).	99
Figure 5.45	Directions de l'écoulement souterrain suggérées par les lignes équipotentielles durant la plus forte crue survenue du 5 au 12 septembre 2011. A) Directions à $22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 5 ^o septembre à minuit; B) directions au maximum de crue de $213 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 6 septembre à 14h00; C) directions durant la récession à $112 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 7 septembre à 13h00 (Cloutier <i>et al.</i> , en prép.).	100
Figure 5.46	Résultats graphiques de l'analyse avantages-coûts pour les trois rivières avec un taux d'actualisation de a) 4 % et b) 2 %.	104
Figure 5.47	Analyse avantages-coûts pour a) les valeurs les moins favorables à l'espace de liberté (valeur de compensation des terres doublée, milieux humides se reconstituant sur une période de 50 ans) et b) les valeurs les plus favorables à l'espace de liberté (valeur des terres constructibles 75 % moindre), milieux humides se reconstituant sur une période de 25 ans).....	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Caractéristiques des cours d'eau retenus pour le projet	12
Tableau 4.2	Indicateurs hydrologiques.....	20
Tableau 4.3	Méthodologies utilisées et implications au niveau des aléas et de l'intégrité.....	22
Tableau 4.4	Classification HGM des formes de la plaine inondable pour la cartographie de l'aléa inondation	30
Tableau 4.5	Hierarchisation des critères basés sur des notions d'aléa et d'intégrité pour la composition de l'espace d'inondabilité (EI)	34
Tableau 4.6	Caractéristiques spatiales des sites modélisés.....	36
Tableau 4.7	Détermination des espaces de liberté L1, L2 et L3 en fonction des zones de mobilité et d'inondabilité	38
Tableau 4.8	Estimation des coûts d'entretien potentiels	49
Tableau 5.1	Débits de crue observés (m ³ /s) sur la Yamaska Sud-Est pour la période 1971-2000	68
Tableau 5.2	Débits de crue observés (m ³ /s) sur la Matane pour la période 1971-2000.....	69
Tableau 5.3	Débits d'étiage observés (m ³ /s) sur la Yamaska Sud-Est et la Matane pour la période 1971-2000	70
Tableau 5.4	Synthèse des variables climatiques et hydrologiques examinées	73
Tableau 5.5	Synthèse des coûts et avantages de l'espace de liberté pour les	103
Tableau 5.6	Variation de la valeur des lots constructibles pour les trois cours d'eau.....	105
Tableau 5.7	Coûts et avantages des trois espaces de liberté avec un doublement du coût de la servitude	106

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 Recueil cartographique des espaces de liberté sur les rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane
- Annexe 2 Exemples de projets européens avec compensation financière pour les zones riveraines
- Annexe 3 Analyse du contexte de gestion des cours d'eau et des politiques publiques au Québec
- Annexe 4 La méthodologie détaillée de la modélisation hydraulique
- Annexe 5 Analyse de la végétation des milieux humides riverains de la rivière de la Roche
- Annexe 6 Identification des ponts dont la situation peut entraîner des contraintes géomorphologiques importantes

1. INTRODUCTION

Les changements climatiques anticipés impliquent des ajustements significatifs dans la dynamique des cours d'eau. Entre autres ajustements, des débits d'étiage plus faibles et des risques accrus d'inondations, notamment en hiver, émergeront des modifications dans les régimes annuels de précipitation et de température. Les changements anticipés affecteront aussi la qualité de l'eau en raison de l'augmentation de la température. Dans ce contexte, il importe de développer des outils d'adaptation aux changements anticipés afin de s'assurer d'une gestion durable des cours d'eau dans un climat changeant. Ce projet vise à développer une approche de gestion des cours d'eau du Québec basée sur le concept d'espace de liberté. L'espace de liberté vise à identifier les espaces d'inondabilité et de mobilité du cours d'eau et de le laisser évoluer dans ces espaces plutôt que le contraindre à évoluer dans un corridor fluvial façonné par les interventions anthropiques. Cette approche se base sur l'hydrogéomorphologie des rivières et permet de maintenir les fonctions physiques naturelles des cours d'eau (transport de l'eau et des sédiments) et, par conséquent, de maintenir et d'améliorer les fonctions de l'écosystème, en plus de procurer des services écologiques comme l'atténuation des crues et le maintien de la qualité de l'habitat. Ultimement, ce type de gestion vise à accroître la résilience des cours d'eau.

Ce projet de recherche comporte plusieurs volets, associés entre autres à trois projets de maîtrise et se concentrant sur trois cours d'eau du Québec : les rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane. La diversité des contextes hydrogéomorphologiques dans ces trois rivières, ainsi que la grande variabilité d'utilisation du sol dans ces bassins versants, a permis de développer des outils méthodologiques robustes et versatiles pour la cartographie de l'espace de mobilité et d'inondabilité. L'inclusion des milieux humides dans la définition de l'espace de liberté a permis des gains importants de connaissance sur la connectivité entre la rivière et la nappe phréatique. Enfin, dans un souci d'acceptabilité sociale de ce changement proposé dans la gestion de nos cours d'eau, il importait d'être en mesure de bien quantifier les coûts et les bénéfices pour la société. L'analyse avantages-coûts présentée dans ce rapport apporte un éclairage économique pertinent, et permet aussi de bien quantifier les services écosystémiques rendus par les zones riveraines et les milieux humides.

Ce rapport présente, suite aux sections sur le contexte, objectifs et le cadre théorique, une section méthodologique très détaillée (chapitre 4) afin de faire en sorte que la méthodologie novatrice développée par l'équipe de recherche soit bien comprise et puisse être utilisée par d'autres usagers dans différents bassins versants. Le chapitre des résultats (chapitre 5) présente quelques exemples de cartographie de l'espace de liberté, mais l'ensemble des cartes, produites à une échelle de 1 :5000, se trouve à l'annexe 1. Une grande partie du chapitre 5 est consacrée à l'analyse de la connectivité entre la rivière et la nappe, ainsi qu'à l'analyse des signaux climatiques pour les rivières à l'étude. Les résultats de l'analyse avantages-coûts sont également présentés sous forme de tableaux et de graphiques. Enfin, le résumé de la rencontre avec les propriétaires riverains de la rivière de la Roche clôt ce chapitre.

Les recommandations, basées sur l'analyse exhaustive de ces trois rivières, figurent au chapitre 6. Celles-ci sont suivies de pistes pour les suites à donner à ce projet; pistes nombreuses car il s'agit de la toute première étude au Québec qui examine comment les concepts d'espace de liberté pourraient s'appliquer dans un cadre pratique. Ces concepts sont déjà partiellement mis en œuvre ailleurs dans le monde (voir par exemple l'annexe 2 qui présente certaines initiatives européennes), mais il importe de tenir compte du cadre législatif en vigueur au Québec en ce qui a trait à la gestion des cours d'eau. L'annexe 3 présente une recension exhaustive de la législation affectant les rivières du Québec en lien avec l'espace de liberté.

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Une gestion durable et intégrée des cours d'eau comporte plusieurs enjeux liés à la quantité et à la qualité de l'eau, à la prévention des risques fluviaux pour l'environnement bâti et les infrastructures, à la perte possible de terres agricoles et forestières provenant de l'érosion des berges, à la conservation de la biodiversité dans les cours d'eau et dans la zone riveraine et enfin à l'utilisation de la ressource à des fins récréatives et récréotouristiques. Tous ces enjeux doivent concourir à la gestion durable des systèmes fluviaux en tenant compte de la dynamique fluviale et de sa réponse aux changements environnementaux. En effet, qu'ils soient peu perturbés ou fortement déstabilisés par des interventions anthropiques fréquentes (p. ex. changements d'utilisation du sol, modifications de parcours des cours d'eau, dragage), les systèmes fluviaux demeurent à la fois sensibles à l'échelle de la section d'écoulement et résilients à l'échelle d'un tronçon homogène. Cet équilibre dynamique des cours d'eau et les nombreux enjeux qu'ils véhiculent sont intrinsèquement liés à la nécessité d'adapter la gestion actuelle des cours d'eau aux changements climatiques, car les variations de température et surtout de l'intensité, de la durée et des volumes de précipitations, pourraient avoir un impact majeur sur les rivières dans les décennies à venir.

Les changements climatiques affecteront différentes composantes de l'écoulement en rivière: 1) les débits liquides (crues plus fréquentes particulièrement en hiver avec un risque accru d'embâcles, crue printanière moins prononcée, récurrence accrue d'événements extrêmes, débits d'étiage en été plus faibles en raison d'une diminution de l'apport des aquifères (Ouranos, 2010)); 2) les débits solides (érosion des berges exacerbée par l'augmentation des débits liquides mais aussi augmentation de la fréquence et de la magnitude des mouvements subaériens sur les berges contribuant directement au débit solide); 3) la qualité de l'eau (prolifération de cyanobactéries (Bird *et al.*, 2009), capacité de dilution des cours d'eau (réduction en période d'étiage), température de l'eau (augmentation en période d'étiage)) et 4) la biodiversité (p. ex. impact de l'augmentation de la température sur différentes espèces de poisson, assèchement périodique ou prolongé de milieux humides riverains). Ces modifications jouent un rôle indéniable en ce qui concerne la sécurité publique (inondation des secteurs habités à proximité des cours d'eau), les activités économiques liées à l'aménagement du territoire (coût des infrastructures de protection) et à l'utilisation de la ressource, ainsi que la pérennité du système fluvial à assumer les services écologiques.

La tendance des trente dernières années dans la gestion des cours d'eau au Québec a été de miser sur l'implantation de bandes riveraines et sur des approches de stabilisation de berges privilégiant l'usage de techniques les plus naturelles possibles. Cette approche est de plus en plus considérée comme insuffisante, particulièrement en regard des risques accrus liés aux changements climatiques (Lane *et al.*, 2007; Palmer *et al.*, 2009).

L'espace de liberté des cours d'eau est un cadre de gestion intégrée qui se base sur l'hydrogéomorphologie des rivières. L'espace de liberté est un concept récent, pas encore appliqué au Québec, mais qui gagne en popularité dans différentes régions du monde (Parish Geomorphic, 2004; Piégay *et al.*, 2005; Kline et Cahoon, 2010). L'espace de liberté vise à identifier les espaces d'inondabilité et de mobilité du cours d'eau et à le laisser évoluer dans ces espaces plutôt que de le contraindre à évoluer dans un corridor fluvial façonné par les interventions anthropiques. Ce cadre de gestion apparaît nettement plus prometteur pour une gestion durable dans un climat changeant, car il permet de maintenir les fonctions physiques

naturelles des cours d'eau (transport de l'eau et des sédiments) et d'ainsi accroître leur résilience. Un cours d'eau naturel présente un habitat floristique et faunique diversifié et complexe par rapport à un cours d'eau redressé: une alternance de sections rapides et de sections plus lentes et profondes (les fosses), une granulométrie variée et des berges hétérogènes. Par conséquent, l'amélioration de la mitigation des crues résulte aussi en une bonification des fonctions écologiques des cours d'eau et de leur biodiversité, ainsi que de leurs biens et services écologiques (Kline et Cahoon, 2010). De plus, l'espace de liberté reconnaît l'importance de la connectivité entre la rivière et la nappe, notamment par l'entremise des milieux humides qui peuvent contribuer à l'atténuation des crues (Bullock et Acreman, 2003; Piégay *et al.*, 2005; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2009) et à l'atténuation de la sévérité des étiages, filtrant par ailleurs d'éventuels contaminants souterrains et offrant un écosystème continu pour la faune et la flore locale. Les échanges nappe-rivière en présence de milieux humides peuvent toutefois être très variables dans le temps et dans l'espace (Krause *et al.*, 2007; Baskaran *et al.*, 2009) et sont influencés par une panoplie de facteurs (p. ex. topographie, géologie, débits en rivière). Les connaissances au sujet de la connectivité nappe-rivière sont très limitées pour le sud du Québec et il est pour l'instant à peu près impossible de quantifier l'importance des milieux humides riverains dans l'adaptation aux changements climatiques, d'où la nécessité de consacrer un volet à l'étude de ces processus dans le présent projet.

Trois cours d'eau de tailles et de contextes géomorphologiques différents ont été retenus pour ce projet : la rivière de la Roche (petit cours d'eau agricole), la rivière Yamaska Sud-Est (rivière de taille moyenne dans un bassin agricole et forestier) et la rivière Matane (grand cours d'eau graveleux, habitat de saumon). Pour chacun de ces cours d'eau, les objectifs spécifiques du projet sont : 1) d'appliquer la méthode hydrogéomorphologique pour la délimitation des zones inondables et des zones d'érosion en tenant compte des enveloppes de changements de précipitations et de températures basées sur différents modèles climatiques pour le 21^e siècle; 2) de définir l'espace de liberté nécessaire pour limiter les besoins d'intervention dus à l'érosion des berges et aux risques accrus d'inondation pour l'environnement bâti et les infrastructures à proximité des cours d'eau; 3) d'évaluer la connectivité entre la rivière et la nappe dans l'espace de liberté de la rivière de la Roche et de la rivière Matane; 4) d'effectuer une analyse avantages-coûts de l'implantation d'un espace de liberté pour les rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane. Les biens livrables sont des cartes d'espace de liberté pour les trois cours d'eau, une analyse avantages-coûts de l'implantation de l'approche par espace de liberté dans ces trois cours d'eau et une analyse de la connectivité rivière-nappe dans l'espace de liberté.

3. CADRE THÉORIQUE

3.1. Cours d'eau et changements climatiques

Compte tenu du danger pour la sécurité et des dommages pour les infrastructures, les risques de crues importantes ont été examinés dans plusieurs régions du monde, et les conclusions sont unanimes : le risque de crues importantes sera plus élevé à l'avenir et il est impératif de mieux gérer les cours d'eau et leurs zones riveraines pour y faire face (Palmer *et al.*, 2009). Les changements climatiques vont particulièrement affecter le cycle hydrologique des rivières de latitudes moyennes avec un couvert de neige (Nijssen *et al.*, 2001); les rivières du Québec seront donc spécialement touchées. L'incertitude demeure toutefois élevée pour certains indicateurs hydrologiques (p. ex. débits de crue de récurrence 2, 20 et 100 ans; Huard et Chaumont, 2011; CEHQ, 2012).

Les rivières s'ajustent naturellement aux changements liés à l'évolution du climat. Ces ajustements, qui incluent la migration latérale des chenaux ainsi que les interactions dynamiques entre le lit de la rivière, la plaine d'inondation et la zone riveraine, permettent aux cours d'eau d'absorber les perturbations et agissent comme une protection contre les crues pour les zones avoisinantes (Palmer *et al.*, 2008).

Les changements climatiques sont par ailleurs responsables de l'augmentation de la température des cours d'eau, avec des implications néfastes pour la qualité de l'eau et la faune aquatique (Isaak *et al.*, 2012). La connectivité latérale et verticale entre un cours d'eau et la nappe joue un rôle primordial dans le contrôle de la température du cours d'eau en période d'étiage (Arrigoni *et al.*, 2008; Cabezas *et al.*, 2011).

Il est d'ores et déjà possible de quantifier l'impact des changements climatiques sur la fréquence d'inondation et de procurer ainsi des outils aux gestionnaires sous forme de cartographie révisée en climat futur des zones inondables selon des calculs statistiques (0-20 ans ou 20-100 ans) (Simard, 2008; Laforce *et al.*, 2011). Toutefois, cette cartographie se base sur l'hypothèse que le lit de la rivière demeure fixe dans le temps alors que les changements hydrologiques sont nécessairement associés à des changements dans les flux sédimentaires qui peuvent engendrer l'érosion du lit et des berges, ou encore des zones de dépôt de particules qui rehausseraient le niveau du lit (Lane *et al.*, 2007; Verhaar *et al.*, 2011). Cette cartographie est aussi très dépendante de la qualité des modèles numériques d'altitude (MNA) disponibles. Au Québec, seulement une faible proportion du territoire bénéficie d'un MNA à haute résolution. Une approche basée sur des traces d'inondation sur le terrain permet de contourner ce problème.

La gestion durable des cours d'eau doit nécessairement tenir compte des changements anticipés dans la variabilité climatique, mais également des facteurs non climatiques tels que les changements d'utilisation du sol et la pression démographique (Laforce *et al.*, 2011). Les autres sources de perturbations liées à l'agriculture de plus en plus intensive, à l'urbanisation ou à la construction de routes (p. ex. projets de développement dans le Nord québécois) contribueront aussi à une détérioration des écosystèmes aquatiques (Palmer *et al.*, 2009). Toutefois, une approche d'adaptation aux changements climatiques basée sur une meilleure compréhension de la dynamique des cours d'eau permettrait de contrer certains effets néfastes et d'assurer le maintien des services écologiques fournis par les rivières et la zone

riveraine (Palmer *et al.*, 2009). Cette approche de gestion est considérée comme proactive, en opposition avec l'approche traditionnelle plutôt réactive souvent basée sur des interventions réalisées suite à des crues majeures. C'est ce qui est visé par l'établissement d'un espace de liberté autour des rivières qui permet d'envisager plusieurs bénéfices en termes de qualité de l'eau et de l'habitat (Palmer *et al.*, 2009).

3.2. Espace de liberté

Un vaste mouvement de changement dans la gestion des cours d'eau s'est opéré depuis une vingtaine d'années en Amérique du Nord, en Europe et en Australie afin d'intégrer la dynamique naturelle des rivières et de redonner à celles-ci un espace dit fonctionnel. Le nom donné à cette approche varie d'un pays à l'autre, par exemple en anglais « free space for rivers », « erodible corridor », « topographic erodible corridor concept », « fluvial territory », « room for the river », « channel migration zones », ou « living with floods » (p. ex. Baptist *et al.*, 2004; Piégay *et al.*, 2005; Ollero, 2010). Dans ce projet, l'appellation choisie est « espace de liberté », un terme qui a vu le jour en France et qui était surtout lié à la mobilité des chenaux dans des systèmes fluviaux dynamiques tels que dans le bassin versant du Rhône. Ici, le terme « espace de liberté » est défini comme étant la somme de l'espace de mobilité – lié à la dynamique latérale des cours d'eau – et de l'espace d'inondabilité – lié à la récurrence de crues de différentes magnitudes dont le passage laisse des traces dans le paysage. À ces deux espaces s'ajoutent les milieux humides riverains qui jouent un rôle clé, tant du point de vue hydrologique qu'écologique.

3.2.1. Espace de mobilité

L'érosion latérale des berges est un processus fluvial très important qui peut créer des conflits d'usage entre la rivière et les propriétaires riverains ou les infrastructures (Piégay *et al.*, 2005). C'est aussi une source majeure de sédiments pour les cours d'eau qui permet en outre les recoupements de méandres, qui à leur tour génèrent des habitats (Michalkova *et al.*, 2011).

Les caractéristiques de méandres telles que leur amplitude (« meander belt width ») sont communément utilisées afin de définir l'espace de mobilité, notamment au Vermont (Kline et Cahoon, 2010) et en Ontario (Parish Geomorphic, 2004). Une autre approche fréquemment utilisée est d'analyser à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) l'évolution du tracé des rivières à différents intervalles de temps afin d'extraire des taux moyens de migration latérale de celles-ci (Wasklewicz *et al.*, 2004; Piégay *et al.*, 2005; Magdaleno et Fernández-Yuste, 2011).

L'analyse de la mobilité historique des cours d'eau doit nécessairement inclure l'impact de la stabilisation des berges. Dans plusieurs cas, cette stabilisation s'est intensifiée dans la deuxième moitié du 20^e siècle et a profondément transformé l'évolution des cours d'eau en les faisant passer d'un équilibre dynamique (avec mobilité) à un tracé statique et contraint (sans mobilité) (Brierley et Fryiers, 2005; Magdaleno et Fernández-Yuste, 2011). L'impact de l'absence de mobilité dans les rivières fortement stabilisées se répercute aussi sur l'habitat:

l'évolution hydrogéomorphologique (équilibre dynamique avec des épisodes de crue qui engendrent une migration latérale du chenal) soutient l'évolution écologique d'un cours d'eau (Magdaleno et Fernández-Yuste, 2011).

Il est important de souligner que les contextes géomorphologiques et anthropiques de chaque cours d'eau doivent être évalués de façon exhaustive avant de développer une approche de gestion qui intègre la mobilité des cours d'eau (Fryirs et Brierley, 2013). Par exemple, certains cours d'eau subissent des ajustements suite à une modification préalable de leur parcours (p. ex. linéarisation), d'autres ont des chenaux très dynamiques alors qu'ailleurs la dynamique des méandres ne résulte qu'en une faible migration sur une base annuelle, mais avec un potentiel de recouplements de méandres lors de crues exceptionnelles. Il n'est donc pas possible d'envisager qu'une seule stratégie d'intervention puisse s'appliquer partout (Piégay *et al.*, 2005).

3.2.2. Espace d'inondabilité

L'inondation est également un processus fluvial très important car elle contribue, entre autres, à la recharge des aquifères alluviaux, à la fertilisation de la plaine alluviale, à la connectivité entre les milieux humides et le cours d'eau et à la formation d'habitats de reproduction, notamment par la création de zones d'écoulement lent. Elle constitue néanmoins un risque majeur pour les infrastructures et les résidents riverains et elle peut nuire à la productivité agricole en retardant la période de croissance.

La cartographie des zones inondables se fait depuis plusieurs années au Québec. Cette cartographie a pour fonction d'assurer à la fois la sécurité citoyenne et le maintien des fonctions physiques et écologiques du système fluvial. Ce double mandat est exposé par la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (PPRLPI) qui encadre actuellement la législation des environnements fluviaux au Québec (MDDEP, 1987). La PPRLPI propose également une division à deux niveaux basée sur la récurrence des crues dans l'application du zonage : les zones de grands courants, là où les crues sévissent en moyenne une fois sur 20 ans (0-20 ans) et les zones de faibles courants, là où les crues sévissent entre une fois sur 20 ans et une fois sur cent ans (20-100 ans).

Au Québec, l'analyse des zones de récurrence 0-20 ans et 20-100 ans est associée d'emblée à la modélisation hydraulique. Cette approche s'appuie sur une estimation statistique des débits de récurrence 20 et 100 ans à partir d'une série chronologique de débits. Elle représente adéquatement les étendues inondées en eaux libres. Par contre, pour certains types d'environnements, il faut tenir compte du caractère polygénique des inondations (Pagneux *et al.*, 2010). Ces dernières sont le produit d'une combinaison de facteurs qui ne sont pas nécessairement enregistrés par une hausse des débits (p. ex. la coïncidence d'une crue fluviale avec la submersion marine, les embâcles de glace ou de bois entravant les écoulements dans le chenal, le transit de sédiments et les ajustements morphologiques modifiant le chenal d'écoulement ou la contribution des précipitations survenant sur des surfaces saturées). Dans ces circonstances, la modélisation hydraulique entraîne souvent une sous-estimation de la récurrence réelle des phénomènes d'inondations. De plus, peu de cartographies des zones inondables intègrent les prévisions climatiques actuelles menant à des changements dans les récurrences des inondations et les superficies inondées par celles-

ci (Simard, 2008; Laforce *et al.*, 2011). Par conséquent, l'approche hydrogéomorphologique pourrait servir à préciser la cartographie des zones inondables en eau libre ou servir de méthode alternative dans les zones non-cartographié, dans les environnements où d'autres facteurs aggravent le phénomène d'inondation.

Le besoin d'offrir une alternative à la méthode hydraulique pour la détermination des zones inondables est reconnu depuis longtemps dans la littérature scientifique (Wolman, 1971). Plusieurs travaux académiques ont développé des stratégies alternatives ayant recours à une meilleure compréhension du phénomène d'inondation sur la base de ses caractéristiques hydrologiques ou sur son empreinte dans le paysage (Baker, 1976; Ballais *et al.*, 2005; Ballais *et al.*, 2011). Ces stratégies convergent dans une perspective commune, c'est-à-dire d'exploiter la connaissance des inondations passées pour servir à l'évaluation des aléas présents et futurs. Les événements d'inondations sont des agents de formation qui marquent le paysage. Ils laissent leurs empreintes dans le modelé alluvial, les dépôts sédimentaires, la formation des sols, le développement de la végétation et la mémoire collective des habitants. Des efforts considérables ont été déployés depuis les dernières décennies pour relever ces informations et définir leurs significations d'un point de vue de l'inondabilité afin de les articuler adéquatement pour fournir des outils de cartographie du risque d'inondation (Benito *et al.*, 2008).

Une approche alternative pour la cartographie des zones inondables provient de l'hydrogéomorphologie. En soit, c'est une science interdisciplinaire qui s'attarde aux interactions entre l'hydrologie et la géomorphologie (Scheidegger, 1973) et qui fournit une connaissance des formes et des processus fluviaux à partir de laquelle sont tirés différents outils opérationnels pour la cartographie du phénomène d'inondation. Cette approche émergente au Québec a fait l'objet de mandats spécifiques du ministère de la Sécurité Publique (MSP) pour des rivières du Bas Saint-Laurent et de la Gaspésie (Demers *et al.*, 2009; 2011; Olsen *et al.*, 2012), des travaux qui ont guidé le présent projet. L'hydrogéomorphologie permet notamment la préservation sélective de certaines zones de la plaine inondable qui sont connues pour supporter des fonctions essentielles du système fluvial. Elle permet ainsi d'assurer une plus grande résilience du système fluvial face aux changements climatiques que la cartographie hydraulique.

3.2.3. Contribution de l'eau souterraine et milieux humides

En climat humide, les rivières peuvent recevoir un apport significatif d'eau souterraine pendant une partie importante de l'année (Hayashi et Rosenberry, 2002; Hayashi et Van Der Kamp, 2009). Les travaux de modélisation de Lavigne *et al.* (2010) ont par exemple montré que la contribution en eau souterraine aux débits de la rivière Châteauguay peut atteindre 66 % du débit total. Les zones d'alimentation peuvent toutefois varier dans l'espace de manière importante, en fonction notamment de la nature et de la stratigraphie des matériaux géologiques rencontrés. Elles peuvent également alterner avec des zones où c'est la rivière qui alimente la nappe (Datry *et al.*, 2008b). Ces échanges ont lieu dans la zone hyporhéique, une zone intermédiaire entre la rivière, les sédiments et les matériaux géologiques sous-jacents, où les différents types d'eau se mélangent. Cette zone joue un rôle important dans le transfert de polluants et de flux de chaleur et constitue une composante importante de l'écosystème riverain (Brunke et Gonser, 1997; Alexander *et al.*, 2002). L'ampleur des flux

échangés entre une rivière et la nappe, leur localisation ainsi que les processus locaux qui interviennent dans ces échanges sont peu connus au Québec.

Les milieux humides situés dans les plaines inondables sont réputés comme ayant la capacité de stocker les eaux de crues et d'ainsi réduire ou retarder efficacement le risque d'inondation associé aux pics de crues (Bullock et Acreman, 2003; Piégay et al., 2005; Barnaud et Fustec, 2007). Cet effet tampon permet de conserver les eaux de crues au sein du milieu pendant un certain temps et de les relâcher en période d'étiage, contribuant au maintien des débits de la rivière en temps plus secs (Dennison et Berry, 1993; Barnaud et Fustec, 2007; Mitsch et Gosselink, 2007; Morley et al., 2011). Cette contribution s'avère encore plus importante dans le cas de milieux humides connectés aux eaux souterraines. En effet, plusieurs études révèlent qu'entre 30 et 70 % des apports en eau des cours d'eau peuvent provenir de la décharge de l'eau souterraine via les milieux humides (Warwick et Hill, 1988; Cole *et al.*, 1997; Uchida *et al.*, 2003; Krause *et al.*, 2007; Morley *et al.*, 2011; Bourgault *et al.*, soumis). Les milieux humides riverains contribuent aussi de manière importante à maintenir et même à améliorer la qualité de l'eau des cours d'eau. Agissant comme des filtres, ils assurent la rétention, la transformation et dans certains cas l'élimination de nombreux composés minéraux et organiques apportés par les précipitations, le ruissellement de surface et les eaux souterraines (Barnaud et Fustec, 2007).

Les milieux humides riverains sont aussi reconnus pour leur diversité biologique exceptionnelle (Mitsch et Gosselink, 2007). À l'interface entre les écosystèmes aquatiques et terrestres, ils procurent des habitats précieux, parfois même uniques, à une grande variété d'espèces végétales et animales telles que plusieurs amphibiens, reptiles, oiseaux et mammifères (Barnaud et Fustec, 2007). En plus d'offrir un refuge lors de périodes d'étiage sévère, ils sont aussi considérés comme des lieux d'une importance cruciale pour certaines espèces qui dépendent de l'eau pour leur reproduction ou les premières étapes de leur cycle de vie (Dennison et Berry, 1993).

Or, les fonctions hydrologiques et écologiques des milieux humides riverains varient largement selon différents facteurs tels que les caractéristiques hydrogéomorphologiques des sites, leur localisation, le couvert végétal et l'importance des échanges avec les systèmes adjacents (Barnaud et Fustec, 2007). Nombre de ces fonctions sont également liées aux interactions entre les eaux souterraines et le cours d'eau à travers la zone hyporhéique (Butturini *et al.*, 2002; Hayashi et Rosenberry, 2002; Hancock *et al.*, 2005; Woessner, 2005; Krause *et al.*, 2007). La nature et l'intensité des échanges qui en résultent dépendent de plusieurs facteurs tels que les gradients hydrauliques, les perméabilités du lit du cours d'eau et de l'aquifère ainsi que la géométrie et la dimension de la surface de contact (Harvey et Bencala, 1993; Wroblecky *et al.*, 1998; Winter, 1999; Krause *et al.*, 2007; Datry *et al.*, 2008a).

Compte tenu de son importance dans la dynamique hydrologique des cours d'eau, une meilleure compréhension de la connectivité rivière-nappe et de la contribution des milieux humides à cette connectivité s'avère fondamentale dans une optique d'amélioration de la gestion des plaines inondables et des cours d'eau.

3.3. Analyse avantages-coûts

L'évaluation économique des avantages et des coûts d'une nouvelle approche de gestion des cours d'eau par rapport au *statu quo* est une tâche particulièrement complexe en raison des nombreux facteurs à considérer, certains étant difficilement quantifiables. Pourtant, en regard des problèmes liés aux inondations, les avantages de la prévention devraient *a priori* dépasser les sacrifices encourus, notamment en ce qui concerne les coûts de remplacement et de réparation une fois les dommages causés.

Par exemple, le coût des inondations majeures aux États-Unis se chiffrait en 2004 à 14 milliards de dollars américains (Palmer *et al.*, 2008). En comparaison, les dépenses annuelles en restauration de cours d'eau aux États-Unis en 2004 ne se chiffraient qu'à environ 1 milliard de dollars, soit seulement une fraction de ce que cela coûte au pays annuellement en dédommagement et en réparation d'infrastructures (Palmer *et al.*, 2008). Au Canada, le nombre de crues dévastatrices a aussi augmenté depuis le début du 20^e siècle, avec 70 % des événements survenus depuis 1959 (Laforce *et al.*, 2011).

Au Vermont, dans les années 1990, cinq crues majeures ont engendré des dommages considérables (estimés à 60 millions de dollars) ainsi que des pertes de vies humaines (Kline et Cahoon, 2010). Après analyse, il est apparu que la plupart des dommages étaient dus à l'érosion de berges plutôt qu'aux inondations. Le coût très élevé et les échecs fréquents des infrastructures de protection des berges, particulièrement dans les cas où le tracé des cours d'eau avait été linéarisé, ont engendré une réflexion sur les approches de gestion de cours d'eau dans cet État. Une analyse économique de la situation a permis de conclure que le paiement de servitudes aux propriétaires riverains était plus rentable que le coût de stabilisation de berges (Kline et Cahoon, 2010). De l'autre côté de l'Atlantique, le gouvernement écossais est parvenu à des conclusions semblables en ce qui a trait à la gestion des crues (Beedel *et al.*, 2011).

Aux Pays-Bas, les changements climatiques ont été pris en considération dans l'analyse économique associée au projet « Room for the River » (www.ruimtevoorderivier.nl), initié en 1996, et qui vise d'ici 2015 à laisser plus d'espace aux rivières, notamment en éloignant les digues. Ce changement de gestion des cours d'eau a été motivé à la base par des questions de sécurité, mais il est vite apparu évident que, dans le contexte de la directive-cadre sur l'eau de l'Union européenne, des bénéfices écologiques importants seraient aussi apportés. Une analyse avantages-coûts détaillée a été effectuée avant de procéder à des investissements de l'ordre de 3 milliards d'euros (CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis, 2005).

Il existe au Québec quelques cas où des décisions basées sur une analyse avantages-coûts ont favorisé la délocalisation des habitations des zones inondables. La crue du Saguenay en 1996, les inondations de 2007 à Rivière-au-Renard et les tempêtes côtières de 2010 dans le Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie sont les exemples les plus récents. À Rivière-au-Renard, une crue torrentielle a causé le décès de deux personnes et des dommages majeurs aux infrastructures. Les coûts en aide aux sinistrés ont été estimés à plus de 50 millions de dollars (Le Pharillon, 2008), incluant une campagne de délocalisation de plusieurs dizaines d'habitations. Dans ce cas précis, il a été recommandé de réduire la vulnérabilité en déplaçant les infrastructures se trouvant dans les zones à risque identifiées par une approche

cartographique innovante basée sur l'hydrogéomorphologie (Gariépy, 2008). De telles décisions sont cependant peu nombreuses.

Au-delà de la question des inondations, la mise en place de la nouvelle approche de l'espace de liberté avec des espaces naturels plus vastes et au couvert végétal plus abondant offre plusieurs autres avantages, notamment la création de paysages plus attrayants et susceptibles de favoriser plusieurs activités de loisir ainsi que l'accroissement de la superficie des milieux humides qui procurent plusieurs services écologiques tels la filtration de l'eau, la régulation des crues et des étiages ainsi que la protection de la biodiversité. À cet égard, l'analyse avantages-coûts passe par la quantification des services écologiques rendus par les zones riveraines (Tognetti *et al.*, 2005; Ghermandi *et al.*, 2010; Katosky et Marical, 2011).

4. MÉTHODOLOGIE ET DONNÉES

4.1. Description des sites et données disponibles

Les trois cours d'eau retenus pour le projet espace de liberté sont très contrastés autant du point de vue de leur dynamique que du point de vue du territoire dans lequel ils évoluent. L'intérêt de ce contraste est d'évaluer l'applicabilité des méthodes de cartographies de l'espace de liberté mais aussi d'évaluer les coûts et les avantages de l'application de cette méthode dans des territoires où les enjeux économiques sont distincts. La localisation des trois cours d'eau est présentée à la (Figure 4.1). Leurs caractéristiques, ainsi que celles de leur bassin versant, sont résumées dans le tableau 4.1 et décrites dans les sections qui suivent.

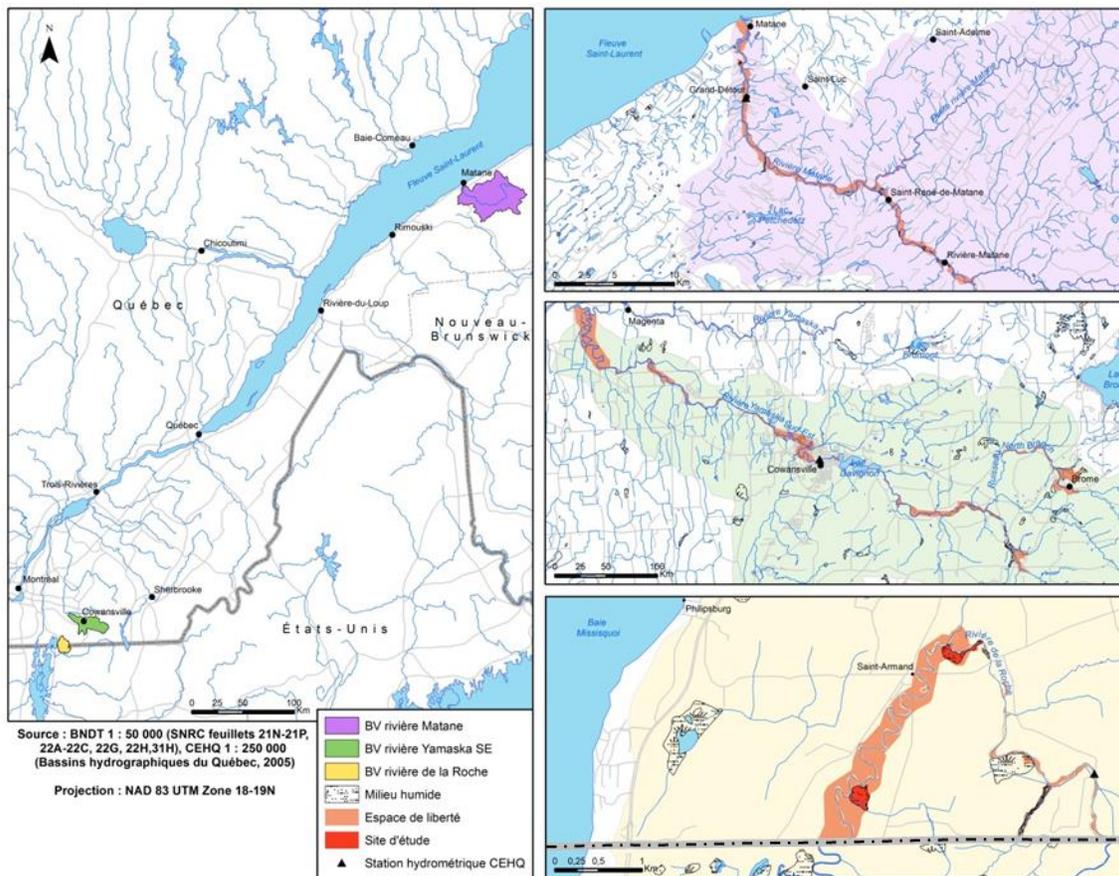


Figure 4.1 Localisation des trois cours d'eau retenus pour le projet.

Tableau 4.1 Caractéristiques des cours d'eau retenus pour le projet

	de la Roche	Yamaska Sud-Est	Matane
Bassin-versant			
Superficie (km ²)	145	411	1 678
Agriculture (%)	41	59	10
Foresterie (%)	40	32	87
Débit moyen (m ³ /s)	1,1	4,6	39
Débit maximum (m ³ /s)	35	256	807
Secteur étudié			
Longueur (km)	10	47	43
Dénivelé (m)	30	108	78
Style fluvial	méandres	méandres	méandres/semi-alluvial
Lits et berges	sablo-limoneux	sablo-limoneux	graveleux

4.1.1. Rivière de la Roche

La rivière de la Roche se situe dans la région de la Montérégie, à quelque 80 km au sud-est de Montréal (Figure 4.1). Le bassin versant de la rivière de la Roche draine une superficie de 145 km², dont 55 km² au Québec, presque exclusivement dans la municipalité de Saint-Armand. La rivière prend sa source dans les environs de la ville de Highgate, au Vermont, coule vers le nord-ouest jusqu'au Québec, avant de retourner du côté américain pour se décharger dans la baie Missisquoi, dont elle est le principal affluent, après un parcours d'environ 27 km. La délimitation de l'espace de liberté est limitée à la portion québécoise de la rivière, qui parcourt un peu plus de 9 km en décrivant un arc sinueux au nord de la frontière. Au cours de ce trajet, la rivière recueille les eaux des ruisseaux Brandy, Swennen et aux Ménéés.

La rivière de la Roche se trouve à la limite de deux unités physiographiques : les Basses-Terres du Saint-Laurent et le Plateau appalachien. Les premiers affleurements appartenant au Plateau apparaissent sous forme de crêtes allongées qui dominent les terres les plus basses de quelques mètres, tel qu'observé dans le secteur de Philipsburg et à Saint-Armand (Dubois *et al.*, 2011). En général, la géologie du bassin versant de la rivière de la Roche est composée de shales et de schistes ardoisiers fracturés, et dans une moindre mesure de dolomies, de grès et de calcaires (Dennis, 1964; Stewart, 1974; Mehrtens et Dorsey, 1987). La géologie du roc détermine en grande partie la topographie du bassin versant. Le relief le long de la faille de Champlain a fait diverger le drainage du bassin vers le nord, au Québec. Plusieurs affleurements rocheux influencent également la position et le profil du chenal. En amont du village de Saint-Armand, le style fluvial est caractérisé par une alternance de tronçons linéaires confinés par les affleurements rocheux et de tronçons à méandres semi-alluviaux. En aval, le chenal est incisé dans un substrat limoneux et adopte un style à méandre confiné en partie par les versants de la vallée.

En raison de son histoire glaciaire, du till recouvre une grande partie du bassin versant. Par endroits, les dépôts glaciolacustres fins, argileux et silteux masquent la couverture de till,

témoins de la présence de lacs glaciaires et proglaciaires lors de la déglaciation qui a débuté vers 13 000 ans A.A. (Dubois *et al.*, 2011). On retrouve également des sédiments marins témoignant de l'intrusion de la mer de Champlain entre environ 12 800 à 10 200 ans A.A. (Stewart et MacClintock, 1969; Cronin, 1977). Selon le portrait du bassin versant de la baie Missisquoi (Dubois *et al.*, 2011), un croissant de gleysols humiques orthiques longe les limites nord-est du bassin versant avec quelques intrusions de podzols. La partie centrale du bassin est dominée par des sols de l'ordre brunisolique (loam argileux à sableux). On retrouve également dans la pointe nord des sols de l'ordre dystrique, soit des podzols humo-ferriques orthiques et gleyifiés.

Les altitudes les plus élevées dans le bassin versant, de l'ordre de 260 m, se trouvent dans le cours supérieur du bassin versant, au Vermont, alors que les altitudes avoisinent 30 m près de l'embouchure à la baie Missisquoi. La portion québécoise du profil en long de la rivière se situe à des altitudes entre 32 et 62 m, représentant un dénivelé de 30 m et une pente moyenne de 0,32 %. La carte piézométrique (Figure 4.2) montre que les directions d'écoulement, globalement orientées du sud vers le nord, sont fortement influencées par la topographie locale. La rivière de la Roche draine l'aquifère sur toute la longueur de la zone étudiée (au Québec). Les gradients hydrauliques sont supérieurs dans la portion amont de la rivière qu'en aval du cours d'eau.

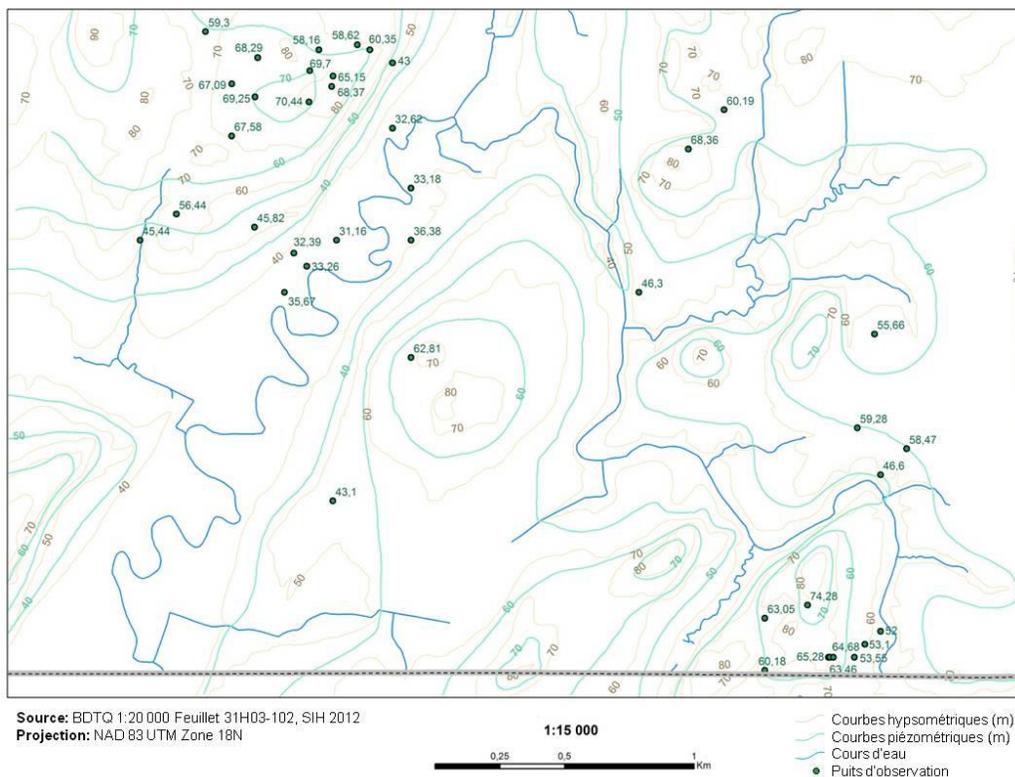


Figure 4.2 Carte piézométrique de la rivière de la Roche. Les valeurs en vert indiquent le niveau d'eau dans les puits inscrits dans la base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDEFP.

Le climat de la région possède une température modérée, des précipitations de type subhumide et une saison de croissance longue. Les normales climatiques à la station de Philipsburg pour la période 1971-2000 présentent une température moyenne quotidienne de 6,8 °C et un total annuel de précipitations de 1095,6 mm (Environnement Canada, 2013a; station 7026040).

Une station de jaugeage du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) enregistre le débit à l'entrée de la rivière de la Roche au Québec depuis 2001. Le débit moyen journalier mesuré de 2001 à 2012 est de 1,1 m³/s (CEHQ, 2013a; station 030425). Par contre, des pointes de débit instantané de plus de 35 m³/s ont été enregistrées pendant la période d'étude de juin 2011 à octobre 2012.

L'occupation des sols dans le bassin versant se partage principalement entre l'agriculture (41 %) et la forêt (40 %) (Hegman *et al.*, 1999; MAPAQ, 2002). Le secteur résidentiel est faible (5,4 %) et le secteur commercial/industriel quasi-inexistant. Depuis 2002, une augmentation du déboisement pour des fins d'agriculture ainsi qu'une tendance à la conversion de terres agricoles et forestières à des fins résidentielles ont été observées dans le bassin versant de la baie Missisquoi (UQCN, 2005). La densité de la population est estimée à 13,7 habitants par km² (Dubois *et al.*, 2011) pour la portion québécoise du bassin versant de la rivière de la Roche.

4.1.2. Rivière Yamaska Sud-Est

Le bassin versant de la rivière Yamaska Sud-Est est un sous-bassin de la rivière Yamaska. Il se situe principalement dans le piémont appalachien mais son cours supérieur se trouve dans les Appalaches (Figure 4.1). Le territoire drainé a une superficie de 411 km² (COGEBY, 2010). Les principaux affluents de la rivière Yamaska Sud-Est sont le ruisseau North Branch et le ruisseau Jackson dont la confluence avec la Yamaska Sud-Est se situe quelques kilomètres en amont de la municipalité de West Brome. Le lac Davignon, réservoir approvisionnant la ville de Cowansville en eau potable, est le plus grand plan d'eau rencontré sur le territoire.

L'assise géologique de cette région est caractérisée par la présence de roches sédimentaires (grès, calcaire, schiste) et volcaniques (basalte infusif) très déformées. Dans ce secteur, l'altitude diminue graduellement, passant de 250 à 60 m. Le relief de cette région est qualifié d'ondulé à fortement ondulé (Groison, 2000).

Dans la partie aval du bassin versant, la géologie de surface est composée en grande partie d'argiles et de silts déposés lors de l'intrusion de la Mer de Champlain qui ont comblé les aspérités du roc, laissant un relief relativement plat (Dubé-Loubert *et al.*, 2011). La zone du piedmont appalachien présente une plus faible couverture sédimentaire et est principalement recouverte par des faciès de till et de till remanié. Cette zone est à la limite sud-est de l'extension maximale de la Mer de Champlain qui est approximativement de 175 m dans la région (Prichonnet, 1984). La couverture sédimentaire quaternaire des Hautes Terres des Appalaches est quant à elle essentiellement composée de till ou de till mince dans les hauts topographiques et de sédiments fluvioglaciers ou glaciolacustres dans le fond des vallées (Dubé-Loubert *et al.*, 2011).

De l'amont à l'aval, le style fluvial est variable, alternant entre des tronçons linéaires partiellement contraints par le relief structural dans les sections à forte pente (secteur forestier) et des tronçons à méandres pleinement alluviaux dans les sections à plus faible pente (secteur agricole ou urbanisé).

La plus grande partie des sols du bassin versant sont associés aux dépôts d'origine glaciaire (tills) abondants dans le secteur (COGEBY, 2010). On retrouve également le long de la rivière des sols généralement sableux, passant au loam près de la confluence avec la rivière Yamaska.

Le climat de la région est caractérisé comme continental tempéré. Les normales climatiques à l'amont du bassin versant à la station de Brome pour la période 1971-2000 présentent une température moyenne quotidienne de 5,3 °C et un total annuel de précipitations de 1267 mm (Environnement Canada, 2013b; station 7020840). À la station de Farnham, à l'aval du bassin versant, la température moyenne quotidienne est de 6,0 °C alors que le total annuel de précipitations est de 1156 mm pour la même période (Environnement Canada, 2013c; station 7022320).

Le débit moyen enregistré à la station de débit du CEHQ depuis son installation en 1968 est de 4,6 m³/s (CEHQ, 2013b; station 030314). Cependant, des pointes de débit instantané de plus de 256 m³/s ont été enregistrées au cours de la période d'étude et des débits d'étiage aussi faibles que 0,01 m³/s. Ces variations importantes entraînent des problématiques de gestion du débit qui ont provoqué plusieurs modifications anthropiques (p. ex. construction de barrages, redressement de méandres, destruction de milieux humides riverains) (COGEBY, 2010).

Une grande partie du bassin versant est occupé par la forêt (approximativement 70 %), bien que les terres agricoles deviennent de plus en plus fréquentes à l'aval du bassin. Toutes proportions gardées, la rivière Yamaska Sud-Est est la rivière dont les berges sont les plus boisées du bassin versant de la Yamaska (COGEBY, 2010). La densité de la population était de 33,8 habitants par km² en 2012 (ISQ, 2012), bien qu'elle soit plutôt concentrée dans les villes de Cowansville et de Sutton.

4.1.3. Rivière Matane

La vallée de la rivière Matane se situe dans la région administrative du Bas-Saint-Laurent. La vallée est située sur la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent à environ 400 km en aval de la ville de Québec (Figure 4.1). La rivière Matane et son principal tributaire, la rivière Petite Matane, prennent leur source dans les monts Chic-Chocs dans la réserve faunique de Matane. La superficie du bassin versant est de 1678 km² et la rivière coule sur plus de 70 km. La portion de la rivière sur laquelle a été testé le cadre de gestion par espace de liberté correspond aux 43 km à partir de l'embouchure de la rivière, vers l'amont.

Le bassin versant est situé dans la province géologique des Appalaches, associée à une vaste formation de roches sédimentaires, fortement plissées, faillées et plus ou moins métamorphisées. Le substrat rocheux est composé principalement de schistes ardoisiers, de microgrès et de calcaires (Ollerenshaw, 1967). Les dépôts meubles dans la vallée sont des

dépôts quaternaires mis en place lors du retrait des langues glaciaires à partir de 13 500 A.A., suivi par un cycle de transgression-régression du niveau marin au cours de l'Holocène (Lebuis et David, 1977; David et Lebuis, 1985). La région n'est couverte que d'une mince couche de till oxydée avec des dépôts de contact glaciaires (moraines frontales, deltas et terrasses de kame) juchés sur les parois des versants de vallée (Dionne et Coll, 1995). En aval, la vallée est comblée par des sédiments fins d'origine marine et glacio-estuarienne déposés lors de la phase transgressive. Ces dépôts ont été remaniés par des écoulements fluvio-glaciaires et fluviaux très dynamiques lors de la phase régressive (Marchand *et al.*, en prép.).

Les normales climatiques à la station de Saint-René-de-Matane pour la période de 1971 à 2000 présentent une température moyenne de 2,7 °C, témoignant d'un climat tempéré froid. La moyenne mensuelle des précipitations neigeuses sur la même période est de 71 cm et la moyenne mensuelle des précipitations liquides pour les mois d'avril à novembre est de 87 mm (Environnement Canada, 2013d; station 7057692).

Le débit moyen enregistré à la station de débit du CEHQ depuis son installation en 1927 est de 39 m³/s (CEHQ, 2013c; station 021601) et son débit plein bord est évalué à 350 m³/s. Il est possible d'observer dans la vallée de nombreuses traces de migration latérale de méandres, de migration par translation dans les sections semi-alluviales, des recoupements de méandres, des chenaux de débordements et plusieurs autres types de morphologie. La plaine alluviale est donc composée de sédiments fluviaux récents, correspondant à des sables et graviers stratifiés et bien triés, et souvent impossibles à distinguer des sédiments fluvio-glaciaires accumulés lors de la dernière déglaciation (Lebuis, 1973a). La largeur moyenne de la rivière à lit de graviers est de 55 m alors que la largeur moyenne de la vallée est de 475 m. L'épaisseur des dépôts est inconnue. Les données du Système d'information hydrogéologique (SIH) indiquent que les puits environnants sont à une profondeur allant de 12 à 15 m, mais rien ne confirme que ces puits soient forés jusqu'au roc.

L'affectation forestière domine dans le bassin versant, représentant approximativement 87 % de sa superficie (MRC de Matane, 2009). Les affectations agro-forestières, agricoles, récréatives et urbaines se retrouvent également dans le bassin versant, dans une moindre mesure. La densité de la population dans la MRC de Matane, qui peut servir d'estimé maximal à la densité de la population dans le bassin versant, est évaluée à 6,5 habitants par km² (ISQ, 2013).

4.2. Données climatiques et hydrologiques actuelles et futures

Afin d'examiner l'impact potentiel des changements climatiques sur l'espace de liberté, une approche combinant la modélisation hydroclimatique à des analyses de sensibilité a été employée. Les éléments de la modélisation climatique menant à l'analyse des conditions pluviométriques et des débits qui prévaudront dans des horizons futurs centrés sur 2050 et 2080 sont présentés dans cette section. Les analyses de sensibilité sont réalisées pour évaluer la robustesse des cartographies des espaces de mobilité et d'inondabilité aux conditions de débits futurs. Ces analyses seront présentées dans les sections décrivant les méthodes de cartographies.

4.2.1. Modélisation climatique

Un total de 79 simulations climatiques issues de 16 modèles globaux du climat (MGC) ont été utilisées comme intrants au modèle hydrologique. Ces simulations intègrent trois scénarios de concentration de gaz à effet de serre (GES), c'est-à-dire B1 (optimiste), A1B (moyen) et A2 (pessimiste) (Fortin *et al.*, 2007). Les simulations couvrent une période allant jusqu'à 2099, divisée en trois horizons temporels discrets : 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099. Les horizons 2040-2069 (centré sur 2050) et 2070-2099 (centré sur 2080) ont été retenus pour cette analyse.

Pour l'horizon 2050, aux 79 simulations de MGC s'ajoutent également 15 simulations issues de modèles régionaux du climat (MRC), dont neuf proviennent du Modèle régional canadien du climat (MRCC; Music et Caya, 2007) exploité par Ouranos. Les autres simulations régionales sont tirées du programme NARCCAP (Mearns *et al.*, 2012). Ces modèles permettent de construire des scénarios climatiques à plus haute résolution.

Il a été mis en évidence qu'en raison d'un trop grand biais et de l'échelle spatiale relativement grossière des modèles climatiques, l'utilisation des sorties brutes de ces modèles n'est pas appropriée pour l'évaluation des impacts des changements climatiques à l'échelle du bassin versant. Ainsi, une étape de mise-à-l'échelle est nécessaire afin de lier les projections issues des modèles aux impacts régionaux des changements climatiques.

La méthode de correction de biais employée dans le cadre de cette analyse est celle de la perturbation par quantiles (Mpelasoka et Chiew, 2009), qui détermine des facteurs de correction mensuels en fonction de la distribution journalière des variables de températures et de précipitations.

4.2.2. Modélisation hydrologique

Le modèle HSAMI (Bisson et Roberge, 1983; Fortin, 2000) a été développé et est couramment utilisé par Hydro-Québec depuis une vingtaine d'années pour la prévision à court et moyen termes des débits dans plusieurs bassins versants du Québec. C'est un modèle de type météo-apport à base de réservoirs permettant la simulation d'apports naturels à un réservoir ou du débit à l'exutoire d'un bassin versant (Fortin, 2000). C'est un modèle conceptuel global à temps discret, à base de trois réservoirs linéaires en cascade qui génèrent le ruissellement par deux hydrogrammes unitaires. L'évapotranspiration, l'interception des précipitations, la fonte de la neige et d'autres processus verticaux sont simulés en fonction d'équations et de paramètres empiriques définis lors du calage du modèle. L'ensemble de simulations hydroclimatiques a été généré par François Brissette (ÉTS) en résidence temporaire chez Ouranos.

Le calage du modèle a été effectué sur la période 1971-1986 et la validation sur la période 1987-2000. La capacité du modèle à bien représenter les débits observés est évaluée par le coefficient de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970). Une valeur de 0,88 a été obtenue pour la rivière Matane alors qu'une valeur de 0,73 a été obtenue pour la rivière Yamaska Sud-Est. Une fois le calage du modèle sur les données d'observation jugé satisfaisant, les débits ont été reconstitués pour la période de référence (1971-2000) à partir des variables météorologiques

observées pour cette période. Les débits futurs ont ensuite été simulés à partir des variables météorologiques issues des simulations climatiques futures. Afin d'éliminer le biais du modèle hydrologique, les débits simulés pour les horizons futurs sont comparés aux débits reconstitués, et non aux débits observés.

Les simulations hydroclimatiques sont ainsi produites en alimentant le modèle HSAMI avec les différents membres des simulations climatiques. Elles prennent la forme de séries de débits journaliers pour la période de référence (1971-2000) et pour les périodes futures (2040-2069, 2070-2099).

4.2.3. Indicateurs hydrologiques

Les indicateurs hydrologiques ont été choisis pour dégager certaines caractéristiques statistiques des séries de débits (simulations hydroclimatiques) (Tableau 4.2). Ils permettent une synthèse quantitative du comportement global d'un cours d'eau qui facilite ensuite la comparaison des conditions de référence et futures. Les indicateurs se divisent en quatre catégories (volume total, crue, étiage et déplacement de crue) et ils proviennent de l'ensemble des indicateurs utilisés par l'équipe de la Division de l'hydrologie et de l'hydraulique du CEHQ (Bourdillon *et al.*, 2011).

L'indicateur du débit moyen pour toute la période de simulation permet d'apprécier de façon globale la quantité d'eau qui atteint l'exutoire du bassin versant. Cet indicateur est dérivé en calculant la moyenne de tous les débits journaliers sur la période.

Les indicateurs de débits de crue de récurrences 2, 20 et 100 ans sont évocateurs puisqu'ils cadrent les zones inondables dans la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (MDDEP, 2005). Le calcul des débits de récurrence s'effectue en ajustant une loi statistique sur les données de débits, en l'occurrence la loi Pearson III dans cette analyse. Comme les rivières étudiées présentent un régime saisonnier de crues (premier pic de crue dû à la fonte de la neige au printemps et deuxième pic de crue dû à des événements de pluie intense à l'été et à l'automne), il est à propos de partitionner le signal de crue annuel en deux saisons.

En raison de différences climatiques, la division de l'année en ces deux saisons n'est pas la même pour les deux rivières à l'étude. Pour la Matane, la partie de l'année incluant la fonte printanière couvre les mois de janvier à juin (JJ) alors que la partie de l'année incluant les événements de précipitations intense couvre les mois de juillet à décembre (JD). Dans le cas de la Yamaska Sud-Est, la fonte printanière est incluse entre les mois de février à mai (FM) et les crues dues à des précipitations intenses ont été recensées entre les mois de juin à janvier (JJ).

Puisque les débits d'étiage de récurrence de 2 et de 10 ans calculés sur sept jours consécutifs sont couramment utilisés pour calculer les débits réservés et régir les prélèvements en eau, ils représentent des indicateurs pertinents pour l'évaluation des bas niveaux d'eau en période estivale. Le modèle statistique Pearson III a également été utilisé ici.

Tableau 4.2 Indicateurs hydrologiques

Appellation	Notation
Volume total	
Débit moyen pour toute la période	Q_{moy}
Crue	
Débit de crue de récurrence deux ans annuel	Q_2
Débit de crue de récurrence vingt ans annuel	Q_{20}
Débit de crue de récurrence cent ans annuel	Q_{100}
Débit de crue de récurrence deux ans printanier	$Q_2\text{JJ}(\text{FM})$
Débit de crue de récurrence vingt ans printanier	$Q_{20}\text{JJ}(\text{FM})$
Débit de crue de récurrence cent ans annuel printanier	$Q_{100}\text{JJ}(\text{FM})$
Débit de crue de récurrence deux ans estival/automnal	$Q_2\text{JD}(\text{JJ})$
Débit de crue de récurrence vingt ans estival/automnal	$Q_{20}\text{JD}(\text{JJ})$
Débit de crue de récurrence cent ans annuel estival/automnal	$Q_{100}\text{JD}(\text{JJ})$
Étiage	
Débit d'étiage de sept jours de récurrence deux ans de juin à nov.	$Q_{2-7}\text{JN}$
Débit d'étiage de sept jours de récurrence dix ans de juin à nov.	$Q_{10-7}\text{JN}$
Déplacement de crue	
Journée à mi-volume de la période de février à juin	Mi-volume_{2-6}

L'analyse de la date de mi-volume_{2-6} permet de quantifier le caractère hâtif de la crue printanière. Selon les débits mensuels moyens évalués sur une base interannuelle, cet indicateur identifie la date (jours juliens) à laquelle la moitié du volume total d'eau (du 1^{er} février au 30 juin) s'est écoulée à l'exutoire. Cet indicateur n'apporte pas d'information sur la date de début de crue, mais il renseigne sur la distribution de l'hydrogramme dans cette période de l'année.

4.2.4. Impact des changements climatiques sur les indicateurs hydrologiques

L'impact des changements climatiques sur le régime hydrologique des rivières Matane et Yamaska Sud-Est est révélé par la dérive, qui correspond à l'écart entre les deux valeurs d'un indicateur hydrologique pour la période de référence et pour la période future (Bourdillon *et al.*, 2011). La dérive est exprimée de façon relative (%), c'est-à-dire qu'elle est pondérée par rapport à la valeur de l'indicateur évalué sur la période de référence. L'indicateur de déplacement de crue est quant à lui révélé sur une base absolue, son unité associée étant le jour.

Les valeurs de dérive des simulations hydroclimatiques regroupées sont présentées à l'aide de diagrammes à moustaches qui incorporent l'écart entre le maximum et le minimum, l'écart entre le 10^e et le 90^e percentile ainsi que la médiane. L'écart entre le 10^e et le 90^e percentile est utilisé comme mesure de l'incertitude associée à la dérive d'un indicateur. Comme le

modèle global (ou pilote dans le cas des simulations régionales) est le facteur prédominant influençant les résultats des modèles, la moyenne des membres issus des mêmes modèles globaux a été effectuée, afin que l'ensemble ainsi pondéré représente de façon adéquate le poids réel de chaque modèle global. Les sources d'incertitude abordées dans le cadre de cette analyse se rapportent à la variabilité intrinsèque du modèle climatique (plusieurs membres du même modèle sont utilisés), au choix de MGC (16 modèles utilisés) et au choix du pilote dans le cas des simulations régionales (six pilotes utilisés). Les sources d'incertitude non traitées sont celles ayant trait au modèle hydrologique (HSAMI), ainsi qu'au choix de modèle statistique pour l'analyse statistique des séries temporelles de débits (Pearson III).

4.3. Espace de mobilité

Le mémoire de maîtrise de Guénoé Choné (M. Sc. Géographie, urbanisme et environnement, Université Concordia, sous la direction de Pascale Biron) présente la méthodologie détaillée de la détermination de l'espace de mobilité (Choné, 2013). Ce mémoire sera complété en avril 2013. Une synthèse de la méthodologie est présentée ici.

4.3.1. Cartographie en climat actuel

La cartographie de la mobilité des rivières est réalisée en déterminant deux espaces de mobilité distincts. Le premier espace de mobilité, codé M1, correspond aux zones où un risque élevé d'érosion ou d'avulsion (recoupement de méandre) est présent dans un horizon de 50 ans. Le deuxième espace, codé M2, plus large et englobant l'espace M1, 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 développé en particulier par Piégay *et al.* (1997; 2005). 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), au Vermont par la Vermont Agency of Natural Resources (Kline et Dolan, 2008; Kline et Cahoon, 2010), et en Ontario par la firme Parish Geomorphic (Parish Geomorphic, 2004).

La détermination des zones M1 et M2 est basée à la fois sur des questions de gestion de risque et de maintien de l'intégrité géomorphologique et écologique des systèmes. Le tableau 4.3 résume les méthodologies utilisées, leur importance en termes de risque et d'intégrité, et le classement final résultant en zone M1 ou M2.

L'espace de mobilité est principalement cartographié selon la mobilité historiquement observée sur les rivières, à partir 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 a ensuite été numérisée. À partir de ces données, l'espace de mobilité M2 est déterminé dans un premier temps, puis l'espace de mobilité à court terme, M1, est déterminé dans un deuxième temps.

Tableau 4.3 Méthodologies utilisées et implications au niveau des aléas et de l'intégrité

Type d'aléa	Méthodologie	Intensité de l'aléa	Apports à l'intégrité du système fluvial	Classement
Corridor basé sur l'amplitude des méandres				
Érosion des berges	taux de renouvellement de plaine alluviale inférieur à 25 % sur 50 ans	faible	maintien des processus hydro-géomorphologiques et écologiques	M2
	taux de renouvellement de plaine alluviale supérieur à 25 % sur 50 ans	forte	maintien de l'hétérogénéité des habitats	M1
	Taux d'érosion historiques			
	berges naturelles (extrapolation sur 50 ans)	forte	maintien des apports en sédiment création de niches écologiques	M1
	berges stabilisées (90 ^e percentile des taux historiques par tronçon homogène, sur 50 ans)	forte	perturbation de la dynamique sédimentaire perte d'habitats écologiques	M1
Cartographie de formes hydrogéomorphologiques				
Avulsion	zones de recoupement de méandres	forte	création de bras morts (milieux humides)	M1
	cônes alluviaux	forte	négligeable	M1

4.3.1.1. Détermination de l'espace M2

L'espace de mobilité M2 est déterminé par l'amplitude des méandres (Figure 4.3), de façon individuelle pour chaque tronçon géomorphologiquement homogène. Un tronçon homogène est une portion de rivière présentant des caractéristiques géomorphologiques uniformes. Les changements de type fluvial (méandres, tressages), de pente, de sinuosité, de taille de sédiments, de confinement, ainsi que les variations de débit (confluence) permettent la détermination des tronçons. L'axe principal des méandres, qui correspond à l'axe de la vallée, a ensuite été déterminé sur la base de la position de la rivière en 2009, puis des corrections ont été ponctuellement apportées afin d'incorporer les tracés plus anciens de la rivière et les bras morts. L'axe des méandres peut suivre plus ou moins fidèlement le tracé de la rivière, selon le degré de confinement de celle-ci (Figure 4.4).

Une fois l'amplitude des méandres déterminée, le corridor de mobilité (M2) peut être limité par le confinement de la rivière, dépendant si les terrasses (ou les murs de vallée) peuvent être érodées par la rivière (Figure 4.5). Ce critère a été déterminé par tronçon pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, selon le degré de confinement de la rivière (confiné, semi-alluvial ou alluvial) et les traces d'érosion visibles sur le terrain. Pour la rivière Matane, les terrasses ont été considérées comme non érodables sur la base des mêmes critères et de l'érosion historique observée.

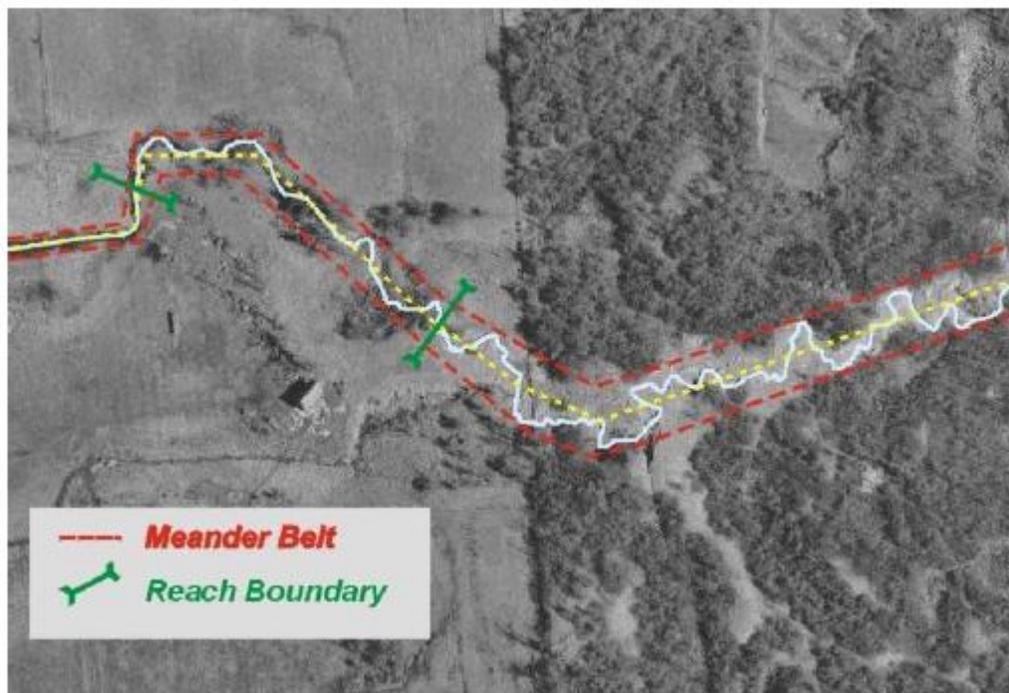


Figure 4.3 Amplitude des méandres (« meander belt ») (Parish Geomorph, 2004).

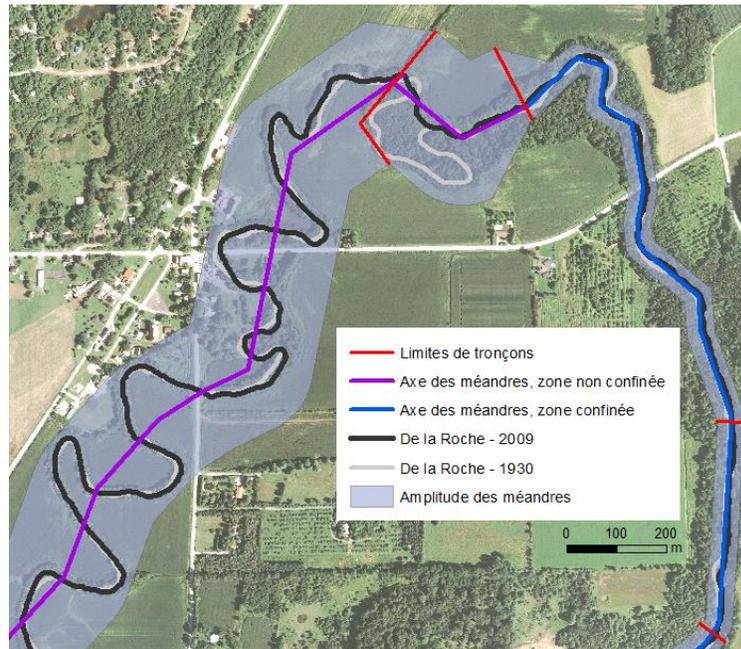


Figure 4.4 Tronçons homogènes, axe des méandres et amplitude des méandres sur la rivière de la Roche.

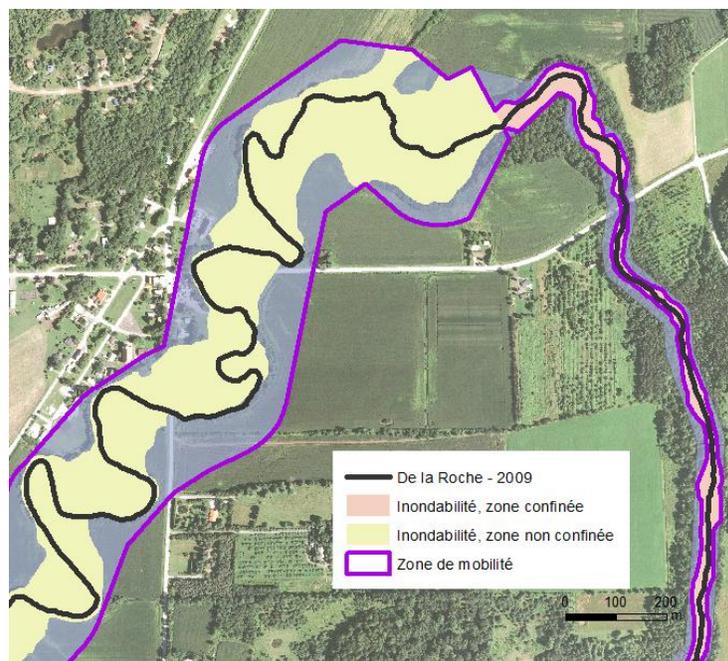


Figure 4.5 Détermination de l'espace de mobilité selon la nature des terrasses pour la rivière de la Roche. La limite de l'espace d'inondabilité (voir section 4.4.1) permet de situer l'emplacement des terrasses. Ici, les tronçons situés plus à l'ouest ont des terrasses qui peuvent être érodées par la rivière, alors que les tronçons situés plus à l'est ont un comportement inverse.

4.3.1.2. Détermination de l'espace M1

L'espace de mobilité M1 est composé de plusieurs éléments cartographiés séparément, permettant d'identifier les zones probables de migration et de recouvrements possibles des méandres.

- Détermination des zones probables de migration :

Les zones probables de migration sont obtenues 1) en mesurant des taux d'érosion historiques sur l'ensemble de la période couverte par les photographies aériennes sur des transects espacés régulièrement le long des rivières et 2) en projetant ces taux historiques sur une période de 50 ans (Figure 4.6). Cette projection détermine alors des zones d'érosion probables et très localisées compte tenu des taux d'érosion observés le long de transects spécifiques.

Pour considérer le dynamisme latent de zones stabilisées pour lesquelles la mobilité historique peut ne pas être représentative de la mobilité naturelle, une zone tampon est ajoutée derrière les secteurs stabilisés. La largeur d'une zone tampon est fonction de données statistiques sur les taux de mobilités du tronçon.

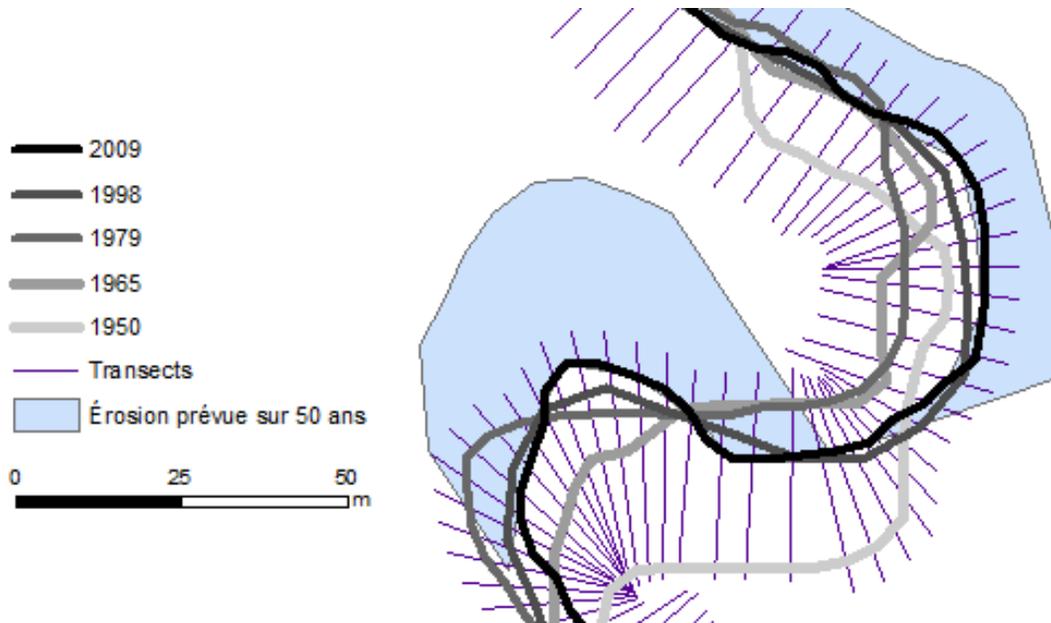


Figure 4.6 Transects et zones d'érosion prévue sur 50 ans sur le ruisseau North Branch (tributaire de la rivière Yamaska Sud-Est).

- Détermination des zones probables d'avulsion :

Le principal risque d'avulsion pour la Yamaska Sud-Est et la de la Roche est le recouplement des méandres. Les zones où un recouplement de méandre semble probable sur un horizon temporel de 50 ans sont donc ajoutées à la zone M1. Ces zones sont cartographiées par les signes actuels de début de recouplement de méandres (Figure 4.7). Les zones où la forme des méandres et/ou l'évolution prévue des méandres amène un pincement des méandres d'une largeur inférieure à environ quatre fois la largeur de la rivière sont également ajoutées. Sur la Matane, les cônes alluviaux ont été également ajoutés à la zone M1 en raison des risques d'avulsion présents dans ces zones.

- Prise en compte des tronçons à fort dynamisme :

La mesure de taux d'érosion historique telle qu'utilisée pour déterminer les zones probables de migration (Figure 4.6) s'applique mal aux tronçons où le tracé fluvial divague fortement de part et d'autre d'un axe central (Figure 4.8). Ces tronçons doivent donc être identifiés, et l'ensemble du corridor de mobilité (zone M2) est alors considéré comme probablement mobilisé par la rivière à court terme, et devient alors M1. Pour déterminer ces tronçons, le taux d'érosion de la zone M2 est calculé sur la base de la superficie de terrain mobilisé par la rivière entre deux années consécutivement observées. Les tronçons dont plus de 25 % de l'espace du corridor de mobilité a été occupé par la rivière sur une période de 50 ans sont considérés comme fortement dynamiques et reclassés M1.

4.3.2. Cartographie avec changements climatiques – Analyse de sensibilité avec RVR Meander

L'analyse de sensibilité aux changements climatiques permet d'examiner les modifications du comportement des rivières suite aux modifications probables du régime hydrique, en conséquence des changements climatiques.

Pour la mobilité du chenal, l'analyse de sensibilité 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.



Figure 4.7 Des traces d'érosion visibles dans le champ montrent un début de recouplement de méandre (rivière de la Roche).

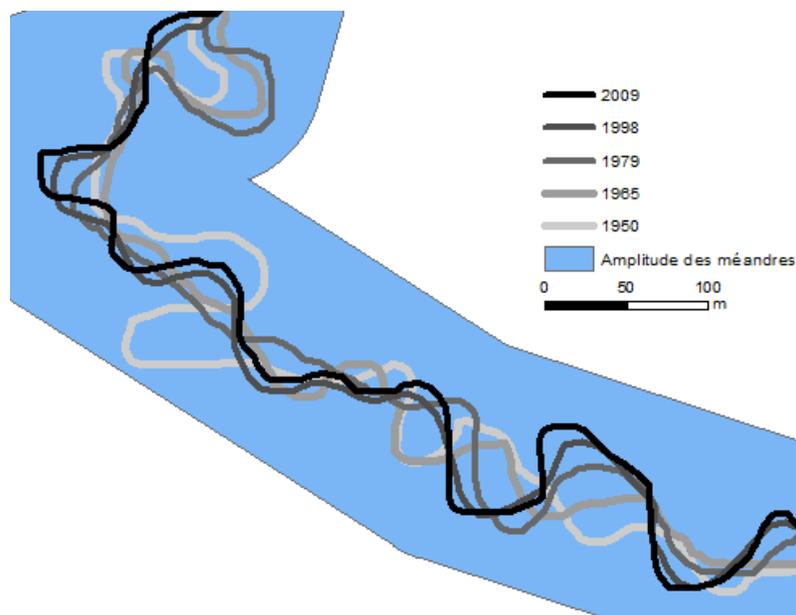


Figure 4.8 Exemple de tronçon à fort dynamisme. Les taux de migration, non linéaires, et les nombreux recouplements intervenus durant la période historique observée ne permettent pas l'utilisation de transects, ni l'extrapolation des taux de migration (ruisseau North Branch).

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 simulations sont effectuées dans le cadre de ce projet. Une première simulation permet de tester l'impact d'un changement de débit sur les modifications probables à l'amplitude du corridor de mobilité et au dynamisme global d'un tronçon dans un contexte alluvial (avec des méandres pouvant migrer librement sur la plaine). Une deuxième simulation permet de 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 ces simulations, le modèle est paramétré afin de reproduire le comportement de la rivière sur un tronçon du ruisseau North Branch dans le premier cas (Figure 4.9), et sur un méandre de la rivière Matane dans le deuxième cas. Le débit de modélisation se situe entre le débit moyen annuel maximal et le débit plein-bord. Il correspond au débit qui permet de simuler le comportement de la rivière sur la base de l'évolution notée à partir des photographies aériennes historiques. Les simulations sont ensuite reproduites avec les mêmes paramètres et un débit augmenté de 10 % pour tester la sensibilité aux changements climatiques.

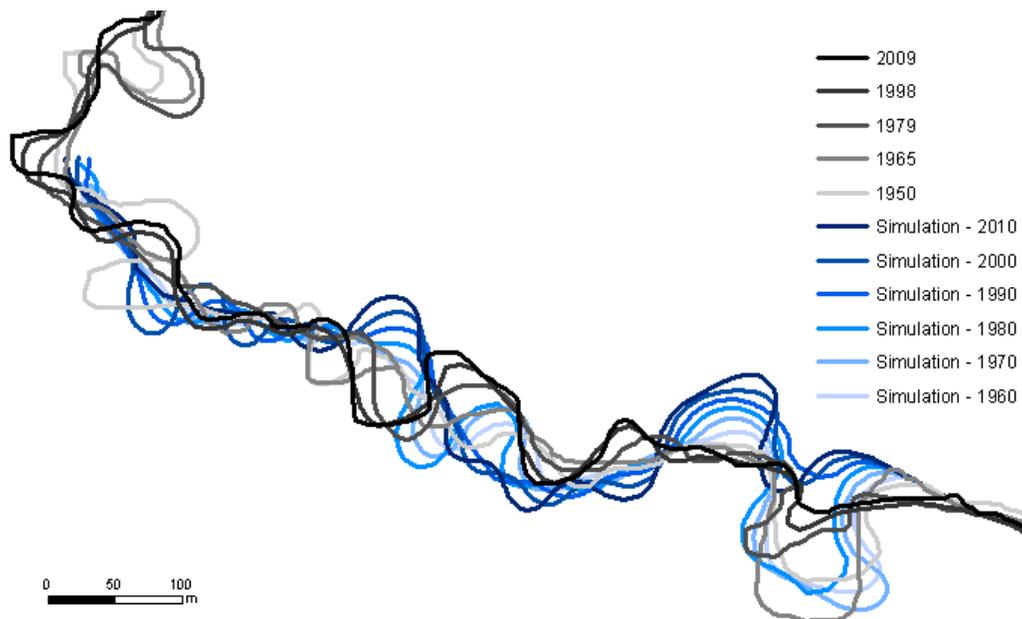


Figure 4.9 Positions historiques du ruisseau North Branch de 1950 à 2009 et résultat des simulations à tous les 10 ans à partir de la position de 1950. La simulation a été paramétrée pour reproduire un dynamisme et une amplitude de méandre équivalents aux observations historiques.

4.4. Espace d'inondabilité

4.4.1. Cartographie en climat actuel

4.4.1.1. *La cartographie hydrogéomorphologique*

La cartographie de l'espace d'inondabilité emploie conjointement les outils de la modélisation hydraulique et de l'hydrogéomorphologie.

La modélisation hydraulique est une procédure standard pour identifier des cotes de crues pour des débits de récurrences données. La modélisation hydraulique des cotes 20 et 100 ans est déjà disponible pour la rivière Matane (MENV, 1989, 2004). Les cotes de crues 20 et 100 ans de deux nouveaux tronçons fluviaux à proximité des municipalités de West-Brome (rivière Yamaska Sud-Est) et de Saint-Armand (rivière de La Roche) ont été modélisés dans le cadre de ce projet avec le logiciel HEC-RAS. Les outils et méthodes spécifiques à la démarche de modélisation hydraulique sont présentés à l'annexe 4.

L'hydrogéomorphologie (HGM) est une science interdisciplinaire située à la jonction entre l'hydrologie et la géomorphologie. En hydrogéomorphologie, la plaine inondable est le produit géomorphologique de l'action à long terme des processus fluviaux (10^2 - 10^4 années). Par définition, elle représente les limites fonctionnelles du système fluvial à l'intérieur desquelles les inondations peuvent survenir. La plaine inondable HGM se distingue du concept de plaine inondable hydraulique, plutôt rattaché aux surfaces inondées pour une crue de référence donnée. La cartographie HGM s'attarde à l'état *naturel* de la plaine inondable, c'est-à-dire qu'elle ne prend pas en compte l'effet des remblais ni des infrastructures de protection (levées artificielles). La cartographie HGM a été appliquée sur l'ensemble des trois cours d'eau.

À l'échelle de la plaine inondable HGM, l'approche HGM identifie les formes d'érosion, de sédimentation, stabilisées, glacielles ainsi que les milieux humides riverains (Tableau 4.4). La distinction entre les formes associées aux processus d'érosion, de sédimentation, ou stabilisées est basée sur des transitions naturelles dans les mécanismes de construction de la plaine inondable, notamment au niveau de la capacité de transport pendant les crues. C'est une approche adaptée des travaux français en HGM pour l'application aux environnements fluviaux du Québec (Masson *et al.*, 1996; Ballais *et al.*, 2005, 2007, 2011).

Les formes d'érosion incluent autant les marques isolées que les surfaces étendues entièrement remaniées et décapées. Elles réfèrent également aux formes de dépôts associées à des modes de transport par charge de fond ou mixte. Dans les systèmes à faible pente, les formes d'érosion sont souvent inexistantes ou très localisées.

Les formes de sédimentation réfèrent aux surfaces dont le mécanisme de formation dominant est la construction verticale par les apports en sédiments fins. Selon la disponibilité des sources de sédiments dans le bassin, les conditions hydrodynamiques pendant les crues et la vitesse de renouvellement par les processus de migration, les formes de sédimentation se présentent avec des niveaux de maturité variables. Elles peuvent présenter des irrégularités sévères qui révèlent la structure sous-jacente des sédiments grossiers déposés pendant la phase de migration du chenal ou une surface plane complètement colmatée par les apports en sédiments fins.

Tableau 4.4 Classification HGM des formes de la plaine inondable pour la cartographie de l'aléa inondation

Classes	Description
Formes d'érosion	Formes liées à des processus d'érosion et de sédimentation dont la morphogenèse est associée à une charge sédimentaire mixte (charge de fond et en suspension)
Formes de sédimentation	Formes de dépôts associées à une charge de sédiments en suspension
Formes stables	Formes déconnectées de la morphogenèse à court terme, mais topographiquement conformes avec la plaine inondable
Formes glacielles	Formes générées par l'action des glaces
Milieus humides riverains	Surfaces marquées par un ennoisement persistant ou fréquent, en lien direct avec le réseau hydrographique de surface

Les formes stabilisées sont les surfaces de la plaine inondable qui sont exemptes de morphogenèse. En pratique, la morphogenèse cesse sur une surface lorsque celle-ci n'est plus tronquée par l'érosion ou ensevelie par des dépôts de débordement. Les formes stabilisées sont identifiées par des patrons de sédimentation distincts par rapport à la configuration actuelle du cours d'eau ou par des indices d'une pédogenèse débutante (Levish, 2002).

Les formes glacielles sont directement générées par l'action des glaces. Ces formes sont fréquemment contenues à l'intérieur des limites plein bord du chenal et sont donc d'un intérêt limité pour la cartographie. En revanche, elles permettent de repérer les secteurs fréquemment inondés par embâcles de glace. Dans ces secteurs, une cote de crue peut être déterminée par le relèvement des cicatrices glacielles sur les arbres de la bande riveraine (Jarret et England, 2002). À l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA), cette cote permet d'identifier les surfaces exposées aux débordements par embâcles de glace.

La cartographie des milieux humides est basée sur des critères botaniques, biophysiques et HGM (MDDEP, 2006; Beaulieu *et al.*, 2010). Du point de vue de l'HGM, les milieux humides riverains sont des dépressions dans la plaine inondable dont la genèse est souvent rattachée à la dynamique du chenal (méandres abandonnés) ou à la configuration de la plaine inondable (bassins de débordements situés en marge de la plaine inondable). Dans certains tributaires d'ordres inférieurs, la plaine inondable est parfois entièrement assimilée à un milieu humide riverain. Les cartographies de milieux humides préexistantes sur les trois cours d'eau ont également été utilisées (MDDEP, 2011, 2012). La figure 4.10 présente des exemples de cartographie HGM pour les trois cours d'eau à l'étude.

4.4.1.2. Composition de l'espace d'inondabilité

La cartographie de l'espace d'inondabilité est présentée en trois niveaux hiérarchiques, N1, N2 et N3 (en ordre décroissant d'inondabilité) (Tableau 4.5). Au niveau de l'aléa inondation, les niveaux sont calés sur les exigences actuelles au Québec en matière de gestion du risque, soit sur la base de la fréquence d'inondation

(0-20 ans; 20-100 ans; > 100 ans). La transposition de l'information HGM à la notion de fréquence d'inondation est, au mieux, une approximation. Ceci s'explique en partie parce que la morphogenèse alluviale n'est pas fonction de la fréquence – ou du débit –, mais plutôt de la puissance de crue, du mode de transport sédimentaire et des mécanismes de dépôt. Entre autres, la fréquence d'inondation de la plaine inondable HGM est dépendante de la pente du cours d'eau en raison de son effet sur la composante des vitesses d'écoulement lors des crues (Kilpatrick et Barnes, 1964). Cette variabilité est en partie intégrée par la valeur de puissance spécifique, qui est un terme associé à l'énergie d'un écoulement, à sa capacité à exercer du transport sédimentaire et un travail géomorphologique (Parker *et al.*, 2011). Elle intervient notamment dans les mécanismes de formation et dans l'architecture des corps sédimentaires de la plaine inondable (Nanson et Croke, 1992). Ainsi, la puissance spécifique du cours d'eau implique des interactions différentes au niveau des formes et des processus qui sont en partie révélées par des changements visibles dans le style fluvial, ou plus spécifiquement, dans le type de plaine inondable. La puissance spécifique (ω) peut être estimée selon l'équation 1:

$$\omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S / w \quad (1)$$

où ρ est la densité de l'eau ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$), g est l'accélération due à la gravité ($9,8 \text{ m/s}^2$), Q est le débit (m^3/s), S est la pente (m/m) et w est la largeur du cours d'eau (m). Dans le cadre de l'espace d'inondabilité, les rivières Matane, Yamaska Sud-Est et de la Roche sont subdivisées en deux classes sur la base de la puissance spécifique du cours d'eau. Un seuil de 75 W/m^2 a été fixé pour départager les plaines inondées, dans une proportion significative, par une crue de récurrence 20 ans ($\omega < 75 \text{ W/m}^2$) et les plaines marginalement inondées par une crue de récurrence 20 ans ($\omega > 75 \text{ W/m}^2$). Il n'est pas possible à strictement parler d'associer une puissance spécifique à une récurrence, mais ce seuil permet de distinguer de l'amont vers l'aval des zones avec de forts courants qui ont un potentiel d'érosion de zones avec des courants plus faibles où des processus de sédimentation dominant. Pour ce qui est du choix du seuil (75 W/m^2), il provient de l'analyse des trois cours d'eau de la présente étude et il permet de départager la plaine de la rivière Matane des plaines des rivières YSE et DLR. La rivière Matane possède en effet une plaine où la délimitation des espaces d'inondabilité est plus délicate considérant la complexité des formes et des dépôts observés alors que les plaines des rivières Yamaska Sud Est et de la Roche possèdent un assemblage de formes et de dépôts permettant une délimitation de l'espace d'inondabilité de manière moins ambiguë. La valeur de 75 W/m^2 permet de départager les deux types de plaines. Le seuil identifié pourra être validé par l'analyse des espaces d'inondabilité d'autres plaines alluviales du Québec. Les valeurs moyennes de puissance spécifique ont été calculées par tronçon, suivant les délimitations présentées à la section 4.3.1.

Hormis la fréquence d'inondation, la cartographie de l'espace d'inondabilité statue sur la présence de zones de forts courants (formes d'érosion; cônes alluviaux) ainsi que sur la présence d'embâcles de glaces (formes et cicatrices glacielles). Au niveau de l'intégrité, le classement priorise les fonctions d'évacuation des débits liquides et solides (formes d'érosion et glacielles), les fonctions de stockage des débits de crues et de soutien des débits à l'étiage (milieux humides) ainsi que les zones qui stockent les apports en sédiments et en nutriments en provenance du chenal (formes de sédimentation pour les styles où $\omega < 75 \text{ W/m}^2$). L'application de ces choix pour la composition de l'espace d'inondabilité est illustrée à la figure 4.11. Par rapport à la cartographie HGM présentée précédemment (Figure 4.10), les

espaces d'inondabilité reflètent les choix posés en matière de gestion du risque et de priorisation pour le maintien de l'intégrité fluviale. Il est à noter que seule la catégorie N1 est requise pour les rivières Yamaska Sud-Est et de la Roche (Figure 4.11).

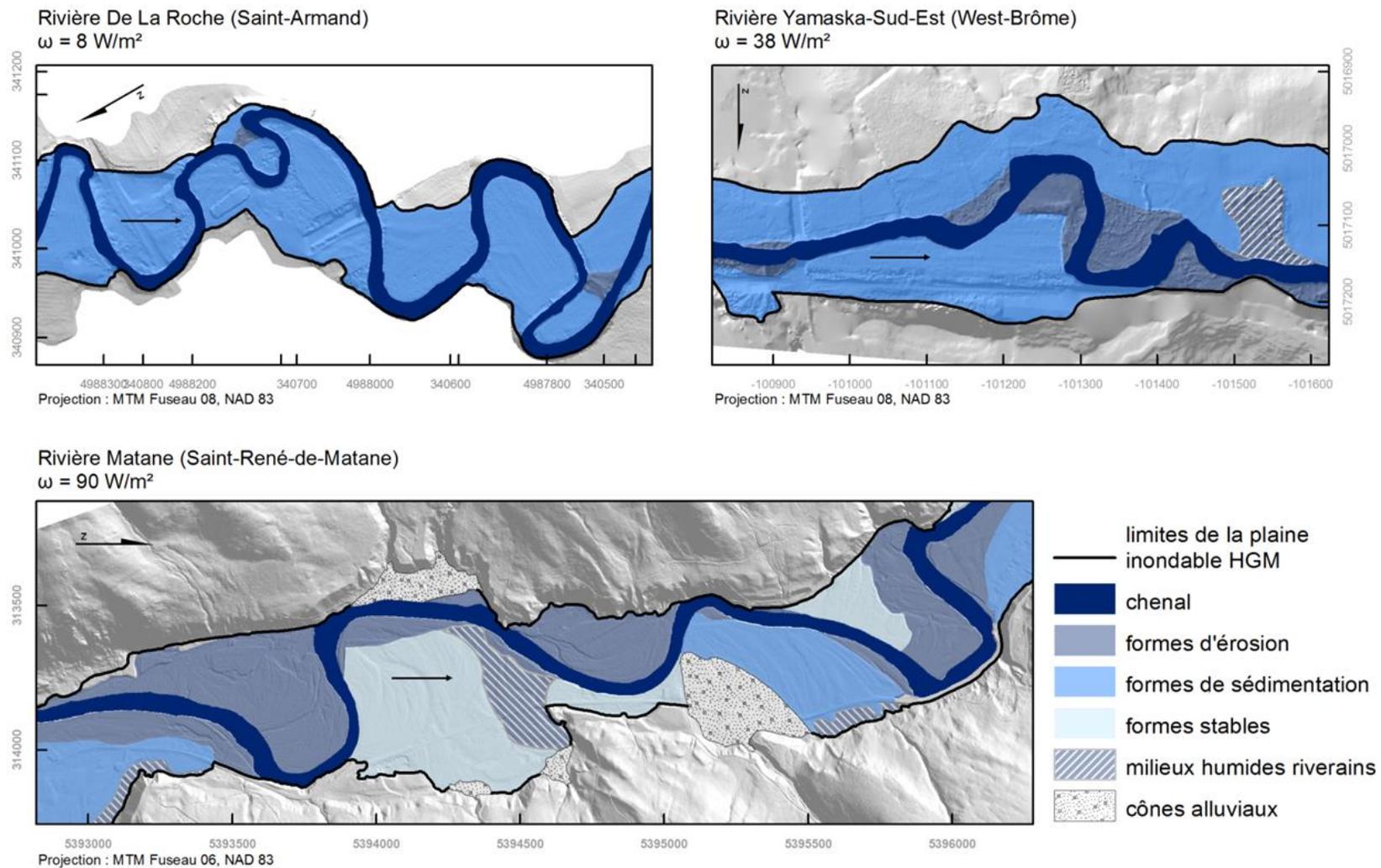


Figure 4.10 Exemples de cartographies hydrogéomorphologiques appliquées aux rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane.

Tableau 4.5 Hiérarchisation des critères basés sur des notions d'aléa et d'intégrité pour la composition de l'espace d'inondabilité (EI)

Approches méthodologiques		Aléa		Apports à l'intégrité du système fluvial	EI
		fréquence	puissance		
Cartographie HGM	style fluvial/plaine inondable ($\omega < 75 \text{ W/m}^2$)				
	formes d'érosion	< 2 ans	↑	transit eau et sédiments grossiers	N1
	formes de sédimentation	< 20 ans	*	stockage en sédiments fins et en nutriments	N2
	style fluvial/plaine inondable ($\omega > 75 \text{ W/m}^2$)				
	formes d'érosion	*	↑	transit eau et sédiments grossiers	N1
	formes de sédimentation	> 20 ans	*		N2
	formes stabilisées	> 100 ans	↓		N3
	formes glacielles	n/d	↑	transit glace	N1
	cônes alluviaux	n/d	↑		N1
	milieux humides riverains	< 2 ans	*	stockage des débits de crues et soutien du débit d'étiage	N1
Modélisation hydraulique	0-20 ans	0-20 ans	n/d	apports en sédiments fins et en nutriments	N1
	20-100 ans	20-100 ans	n/d		N2

(↑ : élevé; ↓ : faible; * : variable; n/d : non-disponible)

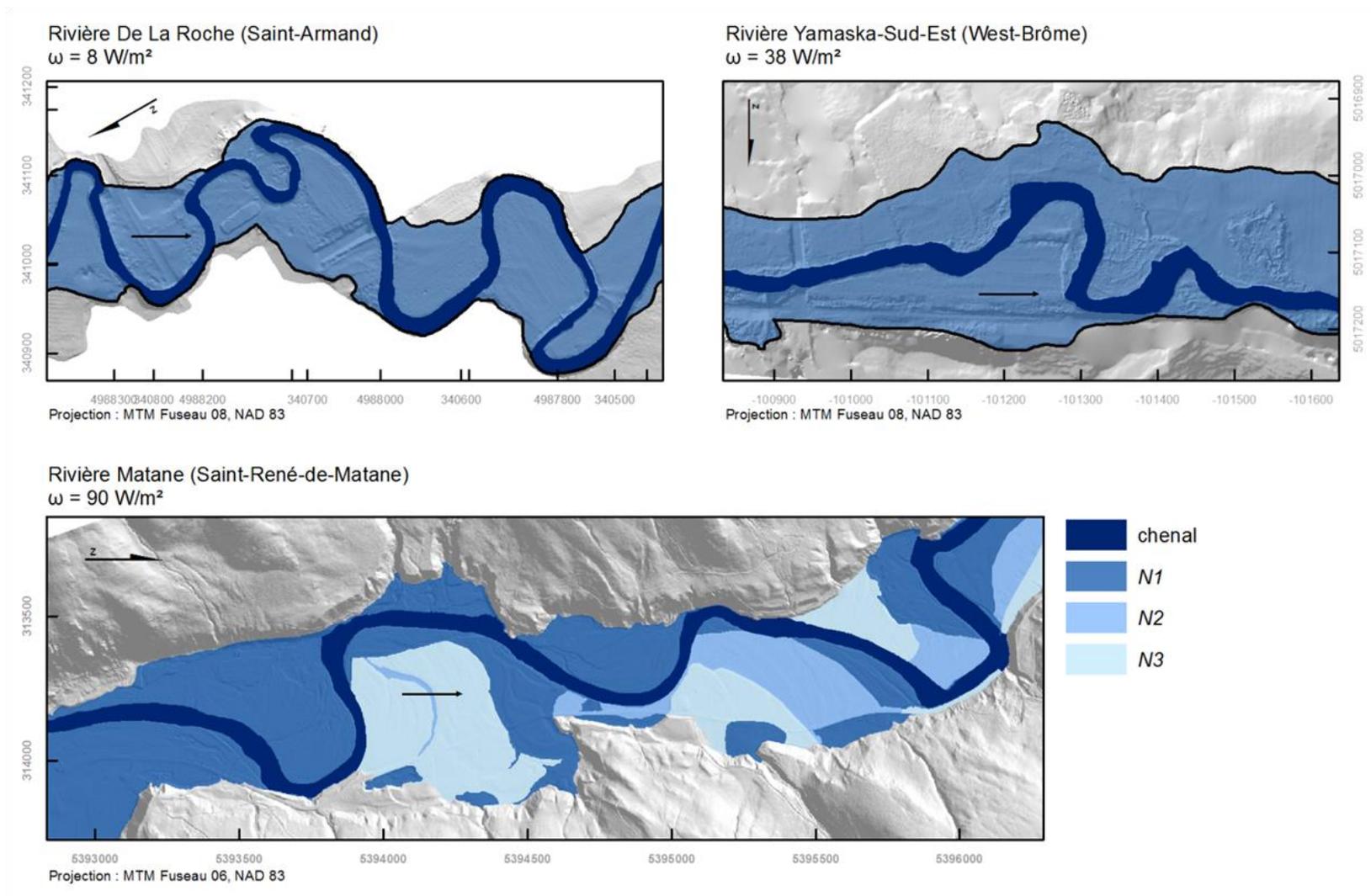


Figure 4.11 Exemples cartographiques de l'espace d'inondabilité appliqué aux rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane.

4.4.2. Cartographie avec changements climatiques – Analyse de sensibilité avec HEC-RAS

L'analyse de sensibilité aux changements climatiques vise à examiner l'impact des changements du régime hydrique sur les phénomènes d'inondation. Comme la méthode hydrogéomorphologique utilise des indicateurs morphologiques associés à des crues passées, l'analyse de sensibilité aux changements climatiques procède par l'utilisation d'une modélisation hydraulique qui peut intégrer les changements anticipés. Cette analyse est réalisée à l'aide des trois modèles hydrauliques HEC-RAS appliqués sur les rivières de la Roche (DLR), Yamaska Sud-Est (YSE) et Matane (MAT), dont les caractéristiques spatiales sont résumées au tableau 4.6 (cf. annexe 4 pour plus de détails).

Les modèles hydrauliques ont été utilisés avec deux objectifs spécifiques. D'abord, une analyse de la variabilité des surfaces inondées permet d'évaluer la robustesse de la cartographie proposée vis-à-vis des changements anticipés dans les conditions hydrologiques. Ensuite, une analyse de la variabilité de deux caractéristiques associées aux inondations (profondeur et vitesse des écoulements) permet d'examiner leur sensibilité en réponse à la variabilité des débits.

Pour les deux objectifs, les indicateurs hydrologiques utilisés sont le débit de récurrence de 20 ans pour la rivière de la Roche et les débits de récurrence 20 et 100 ans pour les rivières Yamaska Sud-Est et Matane. Des simulations ont été réalisées pour chacun des cours d'eau en utilisant des dérives de débit par incrément de 2 % entre -20 et 40 % des valeurs actuelles (31 simulations par cours d'eau et par récurrence). L'étendue sélectionnée permet de couvrir l'ensemble des résultats de projections hydrologiques contenus entre le 10^e et le 90^e percentile des valeurs projetées par les simulations hydroclimatiques (section 5.2.2).

Tableau 4.6 Caractéristiques spatiales des sites modélisés

	DLR	YSE	MAT
Linéaire de cours d'eau modélisé (km)	2,5	1,4	41
Superficie de la plaine inondable (km ²)	0,13	0,16	14,22
Résolution du modèle numérique de terrain (m)	2	2	3

4.5. Détermination de l'espace de liberté

La cartographie de l'espace de liberté des cours d'eau est obtenue par la fusion des espaces de mobilité et d'inondabilité cartographiés précédemment. Cette fusion est une synthèse d'éléments de différentes natures (érosion, inondation, milieux humides), de différentes temporalités, et également d'intérêts différents (risque pour l'occupation humaine, rôle

écologique, etc.). Une telle fusion ne peut se faire sans une série de choix qui relèvent des gestionnaires du territoire (municipalités, MRC) et des organismes façonnant les législations (ministères), car aux espaces de liberté définis s'ajoutent des codes normatifs orientant les activités permises.

Dans ce sens, il importe de souligner que les cartographies des espaces d'inondabilité et de mobilité proviennent d'une méthodologie basée sur la quantification et la qualification des processus naturels opérant dans le corridor fluvial. La méthodologie comporte donc une série de décisions basées sur les connaissances actuelles en hydrogéomorphologie. La cartographie de l'espace de liberté, de son côté, provient d'une volonté d'identifier l'espace nécessaire au cours d'eau pour assurer une série de services écologiques et de sécurité publique tout minimisant les pertes économiques. Il est suggéré ici que la fusion des espaces d'inondabilité et de mobilité permette la cartographie d'un espace de liberté rencontrant ces critères. Pour illustrer les formes que peut prendre la fusion des espaces de mobilité et d'inondabilité, deux cartographies différentes d'espace de liberté sont présentées. La première cartographie se compose de l'ensemble des zonages provenant de la détermination des espaces de mobilité et d'inondabilité, sans perte d'information. Elle comporte donc cinq types de zones : les deux espaces de mobilité M1 et M2, et les trois espaces d'inondabilité N1, N2 et N3, N1 incluant les milieux humides riverains. Cette première cartographie comporte une quantité d'informations importante, ce qui peut rendre difficile une lecture rapide et synthétique des résultats, mais elle possède l'avantage de traduire explicitement les processus associés à chacune des zones cartographiées.

La deuxième cartographie constitue une simplification issue de la fusion des espaces de mobilité et d'inondabilité. Puisque les différentes zones d'inondabilité et de mobilité peuvent se superposer, la cartographie doit prendre en compte les possibilités de superposition de ces espaces et regrouper ensemble certaines combinaisons. Une simplification en trois catégories principales, nommées espace de liberté L1, L2 et L3 et tenant compte des échelles de temps et du rôle des processus naturels, est proposée ici. Le tableau 4.7 illustre les différentes possibilités et les regroupements choisis pour les catégories L1, L2 et L3.

Ainsi, du point de vue de la théorie des ensembles :

- l'espace de liberté L1 est l'union de l'espace de mobilité M1 et de l'espace d'inondabilité N1 ;
- l'espace de liberté L2 est l'union de l'espace de mobilité M2 et de l'espace d'inondabilité, auquel il faut soustraire l'espace L1
- l'espace de liberté L3 est finalement l'union de l'ensemble des espaces de mobilité et d'inondabilité, auquel il faut soustraire les espaces L1 et L2.

Dans cette proposition de cartographie, l'espace de liberté L1 est l'espace à plus grande proximité des rivières, et représente soit des zones où les risques pour l'occupation humaine sont importants, soit des zones ayant une importance écologique majeure. Il s'agit de l'espace *minimal* pour qu'une rivière soit fonctionnelle, c'est-à-dire pour que les processus hydrogéomorphologiques et écologiques puissent opérer. L'espace L2, plus large, représente l'ensemble de l'espace de liberté dans sa définition généralement acceptée, c'est-à-dire le corridor nécessaire au maintien des processus fluviaux à long terme, ou autrement dit, un espace d'intégrité.

Tableau 4.7 Détermination des espaces de liberté L1, L2 et L3 en fonction des zones de mobilité et d'inondabilité

		Mobilité		
		M1	M2	En dehors de l'espace de mobilité
Inondabilité	N1	L1	L1	L1
	N2	L1	L2	L2
	N3	L1	L2	L3
	En dehors de l'espace d'inondabilité	L1	L2	S.O.

Enfin, l'espace L3 est constitué des zones possiblement inondables lors d'évènements extrêmes, en dehors des espaces L1 et L2. Ces zones constituent une catégorie distincte car elles peuvent être prises en considération lors de la planification de l'utilisation du territoire mais ne constituent pas un territoire fluvial aussi géomorphologiquement ou écologiquement primordial pour le fonctionnement des rivières que l'espace de liberté L2.

4.6. Connectivité entre la rivière et la nappe

4.6.1. Cas de la rivière de la Roche

La carte piézométrique de la zone d'étude sur la rivière de la Roche a montré que la rivière draine l'aquifère sur toute sa longueur. Le projet de maîtrise de Michael Needelman (M. Sc. Sciences de la Terre-UQAM, co-direction Marie Larocque et Pascale Biron) visait à mieux comprendre les variabilités spatio-temporelles des interactions nappe-rivière sur la rivière de la Roche. Le mémoire de maîtrise sera déposé à l'été 2013. Ce projet de maîtrise a été complété par un ensemble de travaux et d'analyses dont les objectifs étaient 1) de caractériser les échanges entre la rivière et l'aquifère et de comprendre comment ces échanges varient dans l'espace et 2) d'étudier quel rôle les milieux humides jouent dans la connectivité nappe-rivière. La figure 4.12 permet de localiser les travaux qui ont été réalisés sur la rivière de la Roche.

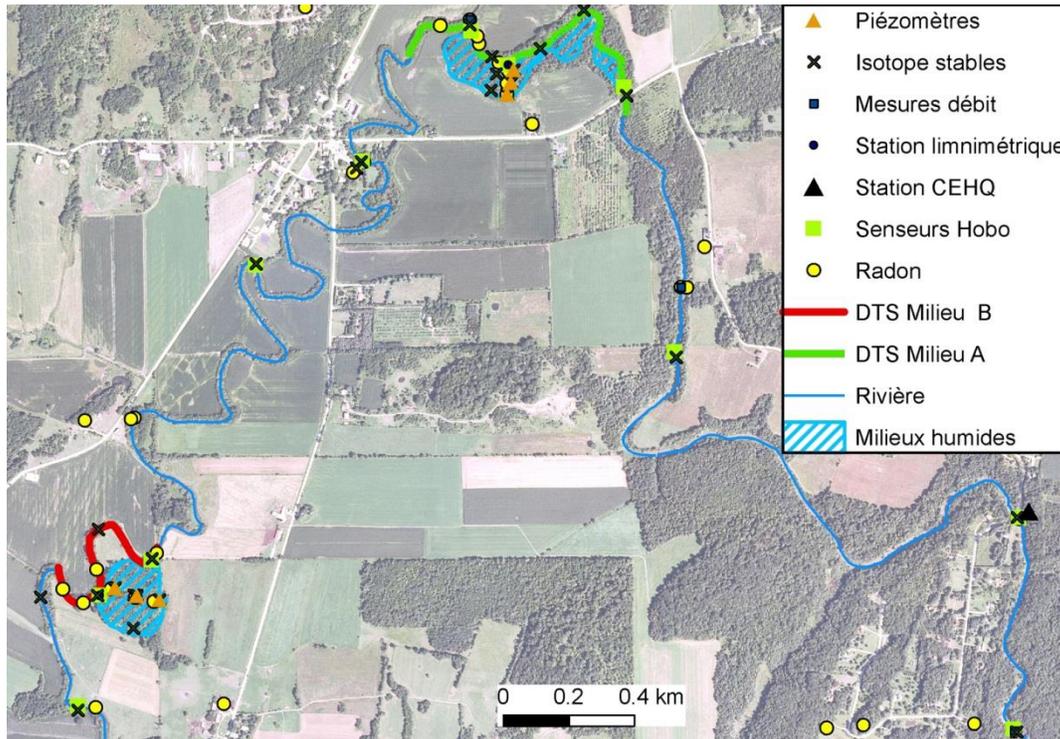


Figure 4.12 Localisation des stations de mesure sur la rivière de la Roche.

4.6.1.1. Milieux humides

Deux milieux humides sont analysés en détail sur la rivière de la Roche (Figure 4.13). Une analyse botanique pour confirmer la nature des sites d'étude en tant que milieux humides a été réalisée par Chantal Moisan, de l'Institut de Recherche en Biologie Végétale (IRBV) (cf. Moisan, 2011; annexe 5). Les différentes communautés végétales de chaque milieu humide ont été délimitées et caractérisées. Les espèces dominantes ont été répertoriées pour chaque communauté et une liste non-exhaustive des autres espèces observées a également été fournie. La nomenclature des espèces est tirée de la base de données des plantes vasculaires du Canada (VASCAN; Brouillet *et al.*, 2010).

Un profil de trois grappes de piézomètres a été installé dans chaque milieu humide (les profils ont une longueur de 110 et 190 m pour les milieux humides A et B respectivement) (Figure 4.13). Chaque grappe est équipée de deux piézomètres, atteignant 1,5 et 3 m de profondeur (Figure 4.14). Les positions des deux profils ont été mesurées au GPS différentiel, qui permet une précision de l'ordre du cm. Des mesures de conductivité hydraulique (K) ont été réalisées dans les piézomètres de surface au moyen d'essais de perméabilité *in situ*. Le milieu humide B est caractérisé par des sédiments plus fins (K variant de non mesurable à $5,7 \times 10^{-7}$ m/s) que le milieu A (K variant de $5,3 \times 10^{-7}$ à 4×10^{-6} m/s). Celui-ci correspond à un ancien bras de méandre visible sur les photographies aériennes de 1930. Le tracé de la rivière autour du milieu humide B n'a pas changé de façon notable depuis 80 ans.

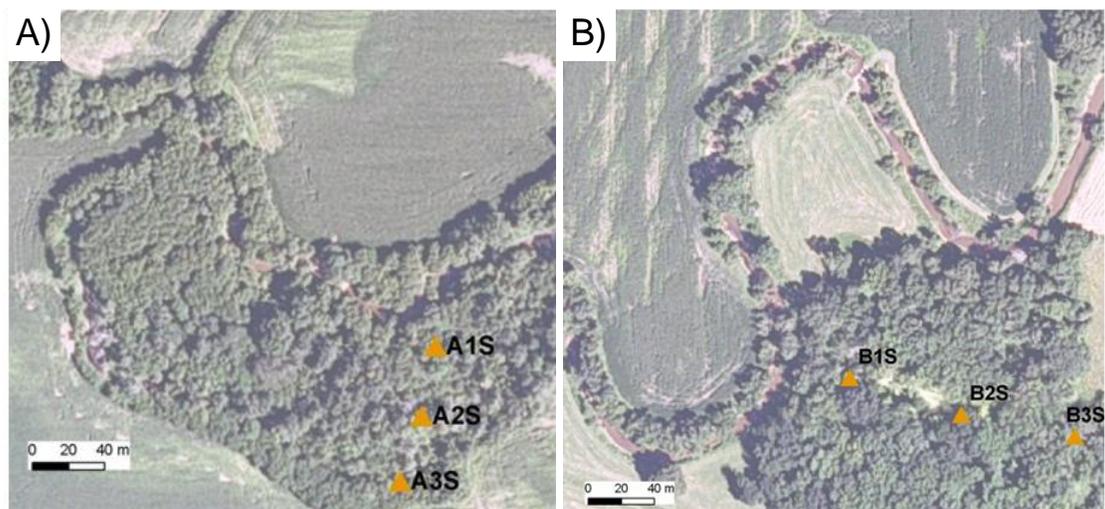


Figure 4.13 La position des piézomètres (triangles orange) dans les milieux humides A) A et B) B.

4.6.1.2. Niveaux d'eau, débits et données météorologiques mesurés

Des mesures de niveau d'eau ont été recueillies à l'aide de sondes à pression Solinst (LTC Levellogger Junior) à chaque 15 minutes dans les piézomètres de surface entre novembre 2011 et octobre 2012. Des sondes Solinst ont aussi permis de mesurer le niveau de la rivière au milieu humide B de juin 2011 à octobre 2012, et de juin 2012 à octobre 2012 à la hauteur du milieu humide A. Toutes les sondes ont été nivelées au GPS différentiel (Trimble R8GNN). La station de jaugeage du CEHQ mesure les données de débit aux 15 minutes à l'amont de la portion québécoise de la rivière de la Roche depuis 2001 (Figure 4.12).

Les débits ont également été mesurés à trois endroits dans la rivière le 1^{er} août 2012 (Figure 4.12), c'est-à-dire au moment de l'échantillonnage pour l'analyse de l'activité en radon de l'eau (cf. section 4.6.1.4). Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un vélocimètre acoustique Doppler (ADV) qui mesure très précisément les vitesses de l'écoulement en 3D. Les fluctuations de niveau d'eau du cours d'eau et de la nappe phréatique ont été analysées graphiquement à une échelle annuelle ainsi qu'à l'échelle d'événements de pluie individuels.

Les données de précipitation horaires ont été obtenues de la station de Philipsburg, située à 4 km à l'ouest de Saint-Armand. Une sonde Solinst (Barologger Gold) a été installée au milieu humide B pour mesurer la température de l'air et la pression atmosphérique nécessaire pour compenser les niveaux d'eau mesurés.

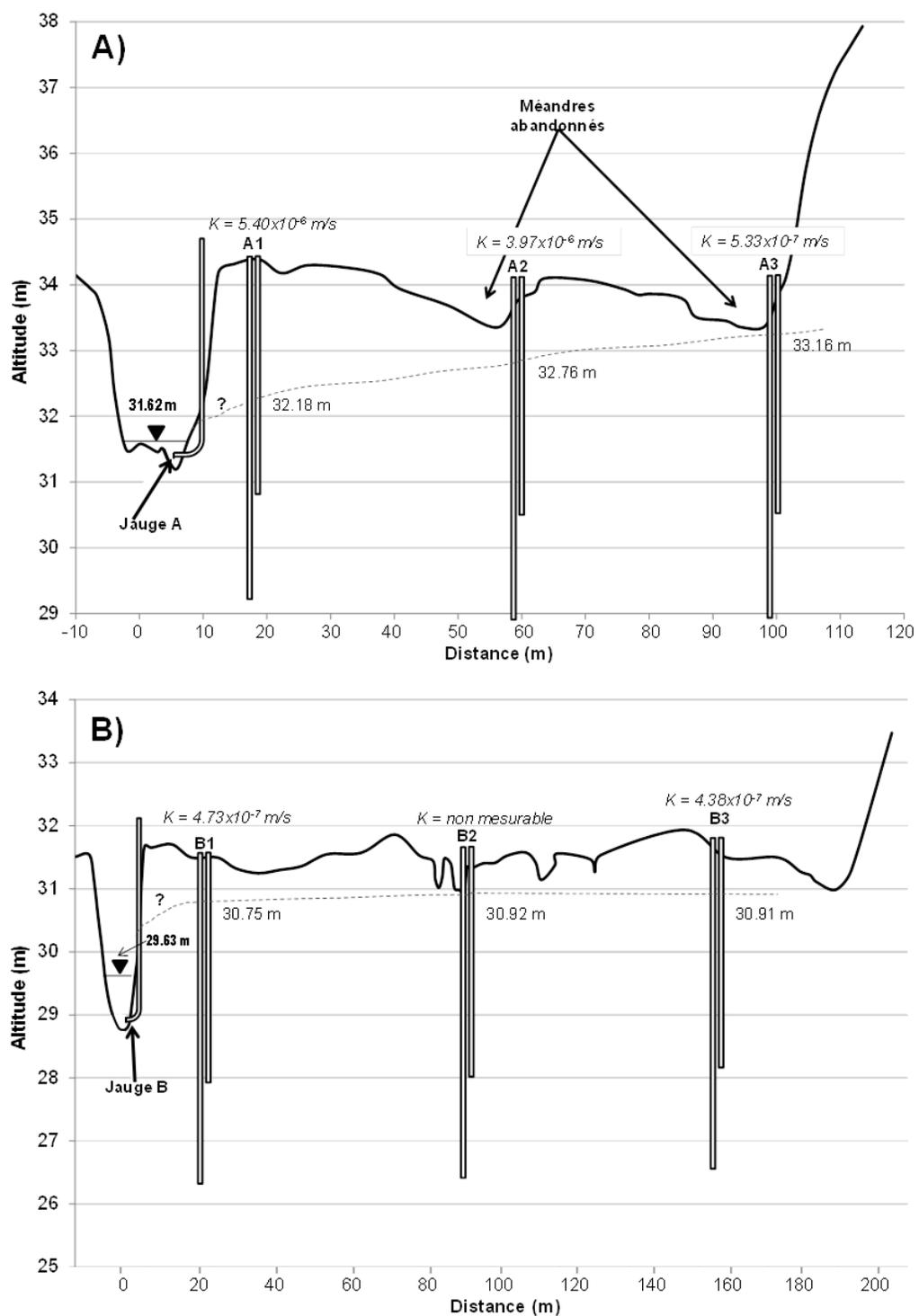


Figure 4.14 Vue en coupe des profils de piézomètres sur les milieux humides A et B (les niveaux indiqués correspondent aux moyennes sur toute la durée de l'étude).

4.6.1.3. Températures de l'eau

La température de l'eau a été mesurée dans la rivière initialement à l'aide de dix sondes HOBO installées sur le fond de la rivière (numérotées de T01 à T10, de l'amont vers l'aval du tronçon étudié; les sondes T03 et T10 ont cependant été perdues au cours de l'étude). Ces sondes ont mesuré la température de l'eau toutes les 15 minutes de juin à septembre 2011, puis de mai à novembre 2012. Les sondes de niveau d'eau Solinst installées dans le cours d'eau et les piézomètres ont enregistré la température de l'eau aux 15 minutes.

De plus, une analyse à fine résolution spatiale et temporelle de la variabilité de la température dans les deux milieux humides a été effectuée à l'été 2012 à l'aide d'une sonde DTS (Agilent Distributed Temperature Sensor, N4386A). Cette sonde est composée d'un câble de fibre optique d'une longueur de 1,5 km, installé dans le cours d'eau pendant quelques jours et mesurant la température à chaque mètre à toutes les 15 minutes. Les mesures au milieu humide A ont été prises du 9 au 16 juillet, et celles au milieu B du 29 juillet au 1^{er} août 2012. La température maximale de l'air durant ces deux périodes était semblable, soit environ 30 °C. Des points de référence ont été pris à intervalles réguliers à l'aide d'un GPS afin de permettre le géoréférencement du câble DTS et d'ainsi analyser la variabilité spatiale de la température à l'aide d'un SIG (ArcGIS version 10.1). Le couvert végétal et la profondeur du cours d'eau ont également été géoréférencés afin de bien distinguer les causes de zones plus fraîches (ombrage, profondeur plus grande, apport d'eau souterraine).

4.6.1.4. Isotopes stables de l'eau et radon

Trente-deux échantillons ont été prélevés en juillet 2011 pour analyser la composition en isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$): 15 provenant de la rivière, 12 des grappes de piézomètres, quatre d'eau de surface dans les deux milieux humides et un du puits municipal de Saint-Armand (Figure 4.12). Les piézomètres ont été purgés avant l'échantillonnage. Les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles de 30 ml en HDPE et conservés au réfrigérateur jusqu'à leur analyse par spectrométrie de masse au laboratoire du GEOTOP à l'UQAM. La précision de ces mesures est de $\pm 0,05$ ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et de $\pm 1,5$ ‰ pour $\delta^2\text{H}$.

Le radon (^{222}Rn) est un traceur radioactif de demi-vie très courte particulièrement utile pour quantifier les échanges nappe-rivière. Dans le but d'analyser la composition en ^{222}Rn de l'eau souterraine et de l'eau de la rivière, 17 échantillons d'eau ont été recueillis le 1^{er} août 2012 durant une période de très faible débit (0,02 m³/s) à plusieurs positions de l'amont vers l'aval de la rivière, avec une plus forte densité de points d'échantillonnage autour des deux milieux humides (Figure 4.12). Des échantillons d'eau ont également été prélevés dans les six piézomètres de surface, de même que dans neuf puits de particuliers. Les échantillons ont été analysés à l'aide d'un compteur à scintillation liquide (Hydrex, LS 300) au Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM suivant le protocole de Lefebvre *et al.* (2013). L'erreur sur les mesures est fonction de l'activité en ^{222}Rn des échantillons, et varie de 3 à 10 % pour une activité en radon de l'ordre de 2 à 20 Bq/L. Les résultats de radon ont été interprétés à l'aide du modèle Radin14 développé par Cook *et al.* (2008). Ce modèle numérique en régime permanent simule les activités en radon le long d'un profil de rivière en fonction des flux d'eau souterraine, de l'évaporation, du dégazage, de la désintégration radioactive, des flux provenant des affluents et de la zone hyporhéique.

4.6.1.5. Analyse des séries temporelles

Les fluctuations de niveau d'eau du cours d'eau et de la nappe phréatique ont été analysées graphiquement à l'échelle saisonnière ainsi qu'à l'échelle d'événements de pluie. Aux deux échelles temporelles, une analyse par corrélation croisée a été réalisée à l'aide du logiciel PAST (Hammer *et al.*, 2001). Ce type d'analyse fournit de l'information sur la relation de cause à effet entre la série d'entrée et la série de sortie, et permet ainsi de déterminer l'influence d'une série sur une autre. Cette analyse informe autant sur le temps de décalage entre les séries temporelles que sur l'intensité de la corrélation entre les deux séries temporelles. Sur la rivière de la Roche, l'analyse des séries temporelles a été utilisée pour déterminer le degré de corrélation ainsi que le délai entre 1) les précipitations et les niveaux d'eau en rivière et dans les piézomètres de surface ainsi que les débits en rivière, 2) les variations de niveaux dans le cours d'eau aux deux milieux humides et les variations de niveaux dans les piézomètres de surface et 3) les températures de l'air et les températures de l'eau en rivière et dans les piézomètres.

4.6.2. Cas de la rivière Matane

La rivière Matane est reconnue pour ses inondations et son dynamisme morphologique. Chaque année et même plusieurs fois au cours de la même année, la rivière déborde lors de fortes précipitations à la fonte des neiges ou lorsqu'il y a formation d'embâcles de glace. Toutefois, certains secteurs de la plaine sont fréquemment inondés sans qu'il y ait de débordement de la rivière Matane. Ce type d'inondation se produit à des endroits éloignés du chenal et à des débits bien en-dessous du niveau plein bord. Ce type d'inondation suggère qu'il se produit une saturation de la plaine par la nappe phréatique jusqu'à l'exfiltration de cette dernière.

La plaine alluviale de la rivière Matane constitue par conséquent un système idéal pour mieux comprendre les écoulements souterrains locaux aux endroits où se produit l'exfiltration de la nappe, mais aussi pour comprendre l'influence de la rivière sur le comportement de la nappe phréatique et sur son exfiltration. Le projet de maîtrise de Claude-André Cloutier (M. Sc. Géographie-UQAR, co-direction Thomas Buffin-Bélanger et Marie Larocque) visait à analyser les interactions entre les eaux souterraines de la vallée graveleuse de Matane et l'eau de la rivière pendant plusieurs événements de crue (Cloutier *et al.*, en prép.). Les principaux éléments de l'article sont résumés ici et à la section 5.3.2.

4.6.2.1. Niveaux d'eau, températures et précipitations mesurés

L'analyse des interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines a été effectuée par le biais de l'installation d'un réseau de piézomètres dans un site à proximité de Village-à-Dancause, un petit hameau résidentiel à 28 km à l'intérieur de la vallée et à 3 km au sud-est de la municipalité de Saint-René-de-Matane (Figure 4.1). Le site d'étude se caractérise par la présence d'un ancien méandre abandonné dans la plaine ainsi que par quelques chenaux de débordement, également abandonnés (Figure 4.15). La plaine est composée principalement de galets dans une matrice de sables grossiers et de graviers stratifiés. On retrouve une unité

sommitale de sables fins d'une épaisseur variant de 30 à 75 cm reposant sur le dépôt fluviatile identifié par Lebuis (1973a). Sur le site, la plaine est très basse par rapport au lit de la rivière. L'altitude du méandre abandonné se retrouve en dessous de l'altitude du niveau plein bord, ce qui en fait un site particulièrement sujet à des phénomènes d'exfiltration.

Le site a été instrumenté avec 19 piézomètres. Douze piézomètres étaient munis d'un capteur de pression (HOBO U20-001) pour mesurer les fluctuations des niveaux piézométriques et de températures de l'eau alors que les sept autres n'étaient munis que d'un capteur de température (HOBO Pro v2). Des essais de perméabilité *in situ* ont été réalisés pour obtenir la valeur de conductivité hydraulique (K) de la zone autour de la crêpe pour chacun des piézomètres. Celle-ci varie de $2,4 \times 10^{-3}$ à $8,9 \times 10^{-5}$ m/s. Deux sondes HOBO (U20-001) ont également été installées immédiatement en amont et en aval du site. Les précipitations ont été mesurées à l'aide d'un pluviomètre HOBO (Data Logging Rain Gauge RG3-M) installé sur le site. Les piézomètres et les deux limnimètres ont été utilisés pour effectuer le suivi des fluctuations des niveaux d'eau et des températures aux 15 minutes de juin à décembre 2011.

4.6.2.2. *Analyse des séries temporelles*

Des analyses par corrélation croisée ont été effectuées afin d'établir un lien entre les séries temporelles piézométriques et les séries temporelles de niveaux d'eau en rivière pour les sept événements de crue. Le logiciel PAST a été utilisé pour faire les analyses. Des analyses ont été effectuées pour chaque événement de crue entre chacun des piézomètres et la station limnimétrique située à l'amont du site. Les valeurs de décalage au maximum de corrélation ont été employées pour l'analyse des résultats. D'autres analyses ont également été réalisées entre les séries de niveaux piézométriques et les séries de précipitations pour chacun des événements de crue.

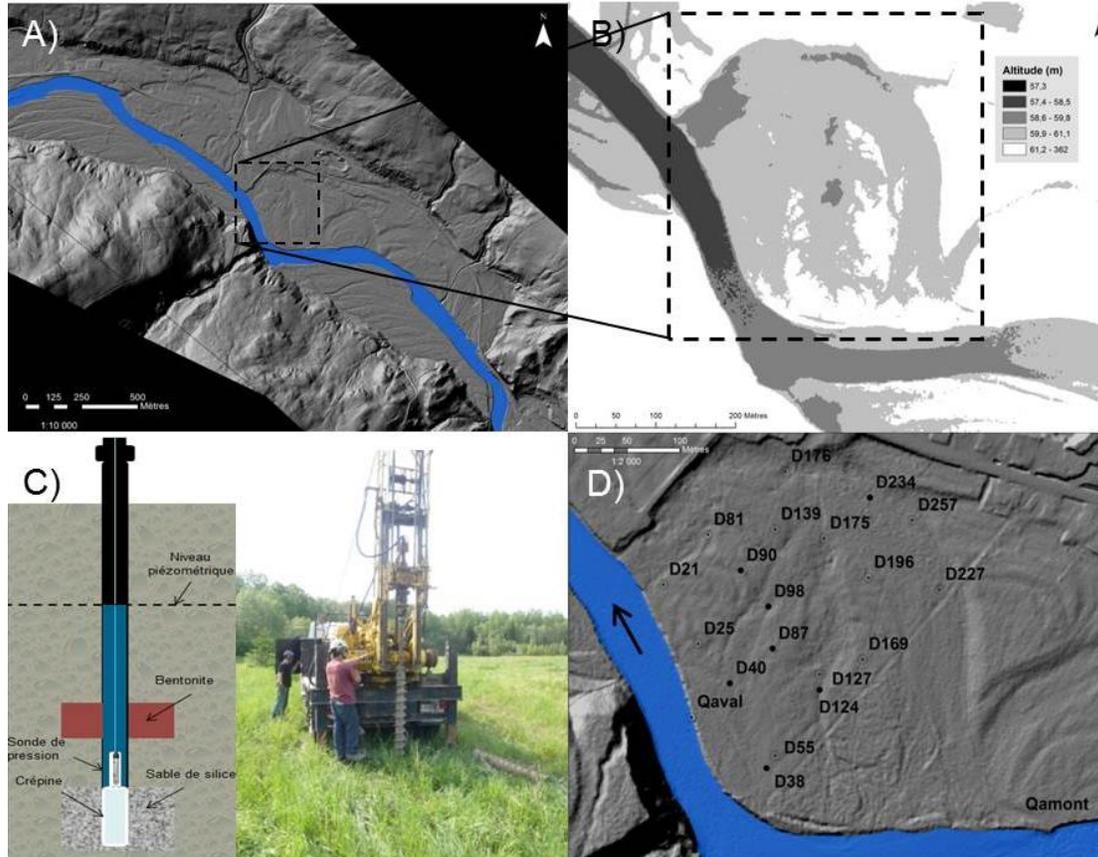


Figure 4.15 (A) localisation du site à Dancause; (B) topographie relative du site; (C) piézomètre type et forage pour son installation ; (D) localisation du réseau de piézomètres au site Dancause. Les points noirs représentent les piézomètres munis d'une sonde de température tandis que les cercles avec étoiles dans le milieu représentent les piézomètres munis d'une sonde de pression (Cloutier *et al.*, en prép.)

4.7. Analyse avantages-coûts

L'analyse avantages-coûts dans cette étude cherche à établir le bilan net des avantages par rapport aux coûts d'une gestion proactive pour les trois cours d'eau avec la mise en place de l'espace de liberté par rapport au maintien du *statu quo* par une gestion dite réactive des corridors fluviaux incluant l'entretien des structures existantes (p. ex. stabilisation de rives).

Les coûts et les avantages pris en compte dans le cadre de l'analyse sont considérés sur une période de 50 années et sont actualisés à l'aide d'un taux d'actualisation de 4 % (des analyses de sensibilité à 2 % et 6 % sont également réalisées). Les données clés de l'analyse font également l'objet d'analyses de sensibilité afin d'établir la robustesse des résultats obtenus. Les détails de l'analyse avantages-coûts et de la source des données sont fournis par Eyquem *et al.* (2013).

4.7.1. Les coûts

Les coûts peuvent être divisés en quatre catégories: 1) expropriations; 2) perte de droit de construction; 3) perte de droit de culture; et 4) restauration et aménagement du cours d'eau.

Le principe d'aménagement d'un espace de liberté est de préserver une zone où la rivière et ses méandres peuvent se déplacer sans contrainte artificielle. Idéalement, si un espace de liberté est établi autour d'un cours d'eau, il serait préférable d'exproprier les bâtiments et infrastructures existants à l'intérieur de cet espace. Cependant, comme ces expropriations représentent non seulement un coût significatif mais aussi une perturbation importante pour les communautés concernées, il a été jugé préférable de ne pas considérer dans l'espace de liberté les bâtiments et infrastructures existants. En conséquence, aucune valeur d'expropriation n'a été incluse dans cette étude avantages-coûts.

Si les développements existants peuvent être considérés comme une contrainte fixe qui doit être prise en compte lors de la mise en place d'un espace de liberté, il n'en est pas de même des zones constructibles. En effet, des mesures peuvent être prises afin de limiter ou interdire tout développement futur dans l'espace de liberté avec un minimum d'inconvénients pour la communauté. La perte du droit de construction doit cependant être considérée comme une réduction de la valeur d'un terrain, donc un coût lié à l'établissement de l'espace de liberté qui, en fonction des mécanismes de compensation mis en place, sera assumé par les propriétaires des lots ou par l'ensemble de la communauté. Les matrices graphiques des municipalités suivantes ont été obtenues en format SIG et ont été utilisées pour identifier la superficie de l'ensemble des zones constructibles : Cowansville, Lac Brome, Brome et Sutton pour la rivière Yamaska Sud-Est; Saint-Armand pour la rivière de la Roche; Saint-René-de-Matane pour la rivière Matane. La valeur de la terre constructible a été obtenue à partir des valeurs des lots vacants des municipalités les plus directement touchées par la création de l'espace de liberté que l'on retrouve au registre foncier. Il s'agit probablement d'une valeur qui sous-estime légèrement la valeur marchande des lots, bien que les registres fonciers fassent l'objet d'une mise à jour périodique et cherchent à s'approcher le plus possible des valeurs de marché. Dans cette étude, une valeur médiane par hectare a été utilisée pour les zones constructibles à l'intérieur du premier niveau d'espace de liberté (L1). Il est à noter que les valeurs des lots varient considérablement en fonction de leur localisation et de leur étendue.

L'établissement d'un corridor fluvial réellement fonctionnel exige la réduction des interventions anthropiques dans l'espace de liberté, incluant les pratiques agricoles. Des lois régissent actuellement les limites à respecter entre les cours d'eaux et les cultures, spécifiquement la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (c. Q-2, R. 35) (MDDEP, 2005). Cependant, ces délimitations concernent souvent des espaces plus étroits que l'espace de liberté calculé selon l'espace de mobilité et l'espace d'inondabilité. Deux approches sont possibles afin d'éviter les interventions agricoles dans l'espace de liberté. La première approche consiste à acheter les terrains situés à l'intérieur de l'espace de liberté. La deuxième approche est d'offrir une compensation à l'agriculteur pour laisser le terrain sans culture – c'est-à-dire que le terrain demeure la propriété de l'agriculteur, mais que ce dernier n'a plus le droit de cultiver la terre ni de stabiliser, remblayer ou modifier le cours d'eau. C'est cette deuxième approche qui est considérée dans cette analyse avantages-coûts, basée sur des programmes existants (VANR, 2010), afin de calculer la valeur de compensation pour l'agriculteur dans le premier niveau d'espace de liberté (L1).

Le rapport *Valeur des terres agricoles dans les régions du Québec – Édition 2012* (Groupe AGÉCO, 2012) indique que la valeur régionale moyenne des terres en culture transigées au Québec en 2011 était de 12 540 \$/ha dans la région de la Montérégie-Est (rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est), et de 2 957 \$/ha dans la région du Bas-Saint-Laurent (rivière Matane). Selon les projets implantés jusqu'en 2010, le coût de servitude moyen cité par la Vermont Agency of Natural Resources est de 1 800 \$ par acre, soit 4 447 \$ par hectare (VANR, 2010). Une valeur de compensation de 3 200 \$ par hectare a été utilisée comme valeur moyenne dans l'analyse avantages-coûts pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est. Sur la rivière Matane, où la valeur des terres agricoles est moindre, une valeur de compensation de 755 \$ par hectare a été utilisée. Ces valeurs se basent sur l'hypothèse que la servitude est de priorité moyenne, avec des sols dans les zones à risque d'inondation ou d'érosion. Une analyse de sensibilité avec des montants par hectare de 6 400 \$ pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est et de 1 510 \$ pour la rivière Matane a aussi été effectuée. La base de données des cultures assurées a été obtenue du MDDEFP et a été utilisée afin de calculer la superficie des terres cultivées dans l'espace de liberté pour les trois études de cas.

La restauration d'un corridor fluvial fonctionnel par l'aménagement d'un espace de liberté peut être atteinte d'une façon « active » ou « passive ». Selon une approche active, les modifications et les aménagements dans l'espace de liberté peuvent être renaturalisés, par exemple par l'enlèvement des protections des berges et la création de nouveaux méandres si le chenal a été canalisé. Selon une approche passive, l'espace de liberté est établi de la même façon mais la rivière se renaturalise par elle-même. Dans le contexte de cette étude, il a été assumé qu'aucune mesure ne serait prise afin de restaurer les cours d'eau suite à la mise en place de l'espace de liberté. Il n'y a donc aucun coût lié à la restauration à considérer dans l'analyse avantages-coûts.

4.7.2. Les avantages

Certains avantages de l'espace de liberté représentent des réductions de coût et peuvent être exprimés par des valeurs monétaires. D'autres avantages sont plutôt liés aux services écosystémiques fournis par les cours d'eau et sont donc plus difficiles à quantifier. Les catégories d'avantages identifiées et évaluées dans cette étude incluent: 1) la réduction des coûts de protection des berges; 2) la réduction des dommages liés aux inondations des terres agricoles; et 3) l'augmentation de la superficie des milieux humides qui se traduisent eux-mêmes par des avantages de régulation des eaux, de filtration des eaux et de protection de la biodiversité. D'autres services écosystémiques auraient pu être considérés, par exemple l'amélioration de la qualité de l'eau dans un espace de liberté en milieu agricole en lien avec des bandes riveraines plus larges, mais le budget limité pour ce volet dans le cadre de ce projet n'a pas permis de les intégrer.

4.7.2.1. Coût de protection des berges

À l'heure actuelle, la gestion des cours d'eau mise beaucoup sur les stratégies de stabilisation des berges. Pour éviter la perte de terrains agricoles ou pour protéger les infrastructures

existantes, les berges des cours d'eau sont souvent enrochées, surtout le long des berges externes des méandres. Cette mesure de protection entraîne non seulement des coûts « en capital » de construction, mais aussi des coûts d'entretien au fil des ans. Ces mesures de protection des terrains agricoles ne seraient plus nécessaires dans le cadre de l'aménagement d'un espace de liberté. En effet, les infrastructures existantes n'ont plus besoin d'être entretenues et de nouvelles zones de protection n'ont pas besoin d'être construites là où l'érosion des berges est en cours. La réduction des coûts de protection est donc représentée dans l'analyse avantages-coûts par la réduction des coûts d'entretien pour des protections existantes et par la réduction des coûts en capital estimé dans le futur afin de protéger les berges qui montrent déjà des signes d'érosion.

Des couches de données SIG présentant les berges érodées ont été utilisées dans l'analyse avantages-coûts afin d'identifier les localisations où des mesures additionnelles de protection des berges seraient potentiellement implantées dans le futur. De plus, des couches de données SIG présentant les localisations des berges artificielles ont permis d'identifier les besoins potentiels d'entretien dans le futur.

Le coût potentiel d'une stabilisation de berge est estimé à une moyenne approximative de 500 \$ par mètre de berge. Il est entendu que le coût varie en fonction de nombreux paramètres (p. ex. la hauteur de talus, la longueur de berge à traiter, le type d'infrastructures à protéger, le type de stabilisation), mais cette valeur correspond bien aux estimés de la MRC Brome-Missisquoi (S. Lajeunesse, comm. pers.). Les coûts de conception sont estimés à 20 % du coût en capital. Les coûts de construction des mesures de protection des berges ont été estimés à partir des expériences pratiques de Parish Geomorphic Ltd en Ontario et par la MRC Brome-Missisquoi. Les valeurs utilisées proviennent de données de différents projets compilées dans le cadre d'une analyse avantages-coûts effectuée auparavant sur le ruisseau Richer (Rousseau, 2010). Pour cette analyse avantages-coûts, il a été présumé qu'un traitement typique de bio-ingénierie serait utilisé dans le futur, incluant une zone d'enrochement en bas de la berge combiné à un traitement de géotextile avec des plantations de végétation.

Les coûts d'entretien ont été estimés pour les mesures de protection évitées dans le futur et pour les mesures de protection existantes, selon le type de protection. Il a été présumé que toutes les zones de protection existantes étaient en place depuis plus de 10 ans. Les coûts d'entretien des mesures de protection des berges ont aussi été estimés à partir des expériences pratiques de Parish Geomorphic Ltd en Ontario et de la MRC Brome-Missisquoi. Les coûts potentiels ont été calculés selon un pourcentage du coût capital approximatif se situant autour de 10 % à tous les 10 ans (Tableau 4.8).

4.7.2.2. *Réduction des inondations*

Les inondations peuvent causer des dommages importants dans les zones résidentielles et agricoles. L'implantation d'un espace de liberté peut aider à la réduction de ces dommages de deux façons. Premièrement, l'espace de liberté désigne une zone à risque d'inondation (et d'érosion), dans lequel les interventions anthropiques telles que la construction de bâtiments et d'infrastructures doivent être évitées. Théoriquement, il y a donc moins de risque de dommages puisqu'il y a moins de bâtiments et d'infrastructures ou de cultures dans l'espace

de liberté. Deuxièmement, la présence d'un corridor fluvial fonctionnel, incluant des milieux humides et une rivière à méandres, a un effet d'atténuation sur l'écoulement de l'eau puisqu'il y a moins de contraintes qui empêchent les échanges naturels (d'eau et de sédiments) entre le cours d'eau et sa plaine inondable. Cet effet d'atténuation peut réduire les inondations en aval du cours d'eau.

Le changement le plus important à considérer comme une réduction des dommages liés aux inondations sera la réduction des dommages aux cultures agricoles qui seront retirées de l'espace de liberté. Ainsi, les agriculteurs n'auront plus besoin de contracter des assurances contre les dommages liés aux inondations dans ces zones. Cette réduction des dommages liés aux inondations pour les cultures agricoles est prise en compte dans l'analyse avantages-coûts. Les statistiques d'Assurance Récolte de 2012 (FADQ, 2012) ont été utilisées afin de calculer les cotisations moyennes par hectare pour les cultures présentes dans l'espace de liberté pour chacune des rivières. Les cultures présentes dans les trois études de cas sont le blé, le foin, l'orge, le maïs, le soya, les cultures mixtes et les autres céréales. Dans les cas où il n'y avait pas d'information sur la culture assurée ou quand les champs étaient classifiés comme « cultures mixtes » ou « autres céréales », une valeur représentative des céréales en général était utilisée – soit la valeur moyenne pour le système collectif.

En ce qui concerne la réduction des dommages aux bâtiments et aux infrastructures, comme les expropriations ne sont pas envisagées dans le scénario d'implantation de l'espace de liberté et que ceux-ci ne seront pas retirés de la zone à risque à cause des contraintes sociales, l'analyse avantages-coûts ne comprend ni de frais d'expropriation ni de réduction des dommages dus aux inondations en zone urbaine. De même, la restauration des rivières n'est pas comprise dans le scénario considéré, qui envisage une manière plus « passive » d'établir l'espace de liberté. Il n'y aura donc vraisemblablement pas de grandes modifications dans le régime hydraulique lié au nouvel espace de liberté, bien qu'il soit plausible d'envisager une superficie accrue de milieux humides liée notamment aux recouvrements de méandres et à la création de bras morts (« oxbows »).

Tableau 4.8 Estimation des coûts d'entretien potentiels

Année	Valeur en %
Année 1	12
Année 2	6
Année 3	3
Année 4	1,5
Année 5	1
Année 10 et chaque 10 ans	10

4.7.2.3. Services écosystémiques

L'amélioration du milieu naturel passe notamment par la présence accrue de milieux humides protégés par l'espace de liberté. Les recouvrements de méandres et les espaces contigus au cours d'eau devraient progressivement se transformer en milieux humides. Ceux-ci procurent plusieurs biens et services écosystémiques tels que la régulation des eaux avec réduction des étiages et des crues, la filtration des sédiments et la création de milieux favorables à la biodiversité. Plusieurs méthodes sont disponibles pour évaluer les services écologiques, entre autres : les méthodes fondées sur les valeurs d'usage directes et indirectes, l'analyse de contingence, la méthode des valeurs hédonistes et celle du transfert de valeur. Dans le cadre de cette analyse avantages-coûts, la quantification des biens et services écosystémiques est basée sur l'approche du transfert de valeur en raison des limites de temps et de ressources financières et humaines qu'il a été possible d'y consacrer. À cet égard, la disponibilité de l'excellente méta-analyse de He *et al.* (2013), dont les résultats ont été transférés sur les bassins de la Yamaska et de la Bécancour, offrait l'avantage d'une utilisation directe des résultats obtenus pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est et d'une transposition relativement simple pour la rivière Matane. Selon l'étude, la valeur à l'hectare accordée aux milieux humides pour leur contribution au soutien d'habitats fauniques pour la biodiversité, à la filtration des sédiments ainsi qu'à la régulation des débits de crues et d'étiages se chiffre en moyenne à 5 591 \$/ha. Cette valeur a été utilisée pour calculer la valeur de ces milieux dont la croissance de superficie a été étalée sur 50 ans.

Enfin, la gestion des cours d'eau par espace de liberté implique nécessairement des bandes riveraines plus larges qui auront un impact positif sur la qualité de l'eau. Par exemple, les contrats de servitudes au Vermont qui interdisent toute intervention dans le cours d'eau (stabilisation, remblaiement, etc.) permettent aux agriculteurs de continuer à cultiver leur terre à l'intérieur de l'espace de liberté, à l'exclusion d'une bande de 50 pieds (15 mètres) de part et d'autre de la rivière. Cette bande riveraine est nettement plus large que celle prescrite en milieu agricole à l'heure actuelle au Québec (3 m). D'après Schmidt et Batker (2012) qui ont travaillé sur le bassin de la rivière McKenzie (Oregon), la valeur écosystémique d'une bande riveraine élargie se situe entre 2 577 et 16 792 \$/hectare/année. Compte tenu que ces estimés incluent le rôle d'une bande riveraine sur la régulation du climat, ce dont nous ne tenons pas compte dans cette étude, une valeur plus faible que leur valeur minimum a été utilisée sur les superficies en milieu agricole situées dans l'espace de liberté L1 et correspondant à une augmentation de 12 m de la bande riveraine (la faisant ainsi passer de 3 m à 15 m) sur chaque berge. La valeur monétaire des biens et services écosystémiques des bandes riveraines a donc été attribuée en recourant à l'approche du transfert de valeur, en tenant compte du rapport entre les PIB par habitant de la Montérégie et de l'Oregon, ce qui donne 958 \$/hectare/année pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, et entre celui du Bas-St-Laurent et de l'Oregon, résultant en une valeur de 908 \$/hectare/année pour la rivière Matane.

Il faut noter que cette analyse avantages-coûts constitue une première estimation et que certains éléments tels que les expropriations, le déplacement potentiel de tronçons de route ou de ponts problématiques ou une analyse plus approfondie du cadre bâti ont été volontairement laissés de côté en raison de contraintes financières et du temps limité qui était

à notre disposition. Une analyse économique plus poussée donnerait un portrait plus complet à l'échelle des tronçons de rivière plutôt qu'à l'échelle globale, ce qui permettrait de bien distinguer les coûts et les bénéfices en milieu agricole et en milieu urbain.

5. RÉSULTATS, ANALYSE ET DISCUSSION

5.1. Cartographie en climat actuel

Les cartes d'espace de liberté en version simplifiée (zones L1, L2 et L3 seulement) et intégrales (distinctions entre les zones d'inondabilité N1, N2 et N3 et de mobilité M1 et M2) sont fournies à une échelle de 1:5 000 pour les trois cours d'eau à l'annexe 1. Dans cette section, seuls quelques exemples sont présentés afin d'illustrer la variabilité dans les corridors établis et de présenter des cas contrastés, notamment en ce qui a trait à l'utilisation du sol. Une discussion sur les sources d'incertitude dans la cartographie de la mobilité et de l'inondabilité est aussi présentée.

La cartographie des espaces de mobilité, d'inondabilité et de liberté révèle que la superficie de ces zones varie considérablement selon le cours d'eau examiné et est fortement affectée par la présence de terrasses érodables ou non érodables. Dans certains cas, la largeur du corridor riverain peut ainsi être limitée aux environs immédiats du cours d'eau, comme c'est le cas sur la rivière de la Roche pour le tronçon à l'est de la pointe nord du cours d'eau, fortement confiné par les terrasses rocheuses non érodables (p. ex. figure 4.5 qui traite du confinement). Dans d'autres cas, la largeur du corridor riverain peut être considérable, par exemple lorsqu'il inclut de grands milieux humides, comme à la figure 5.1 où la largeur peut atteindre jusqu'à 900 m.

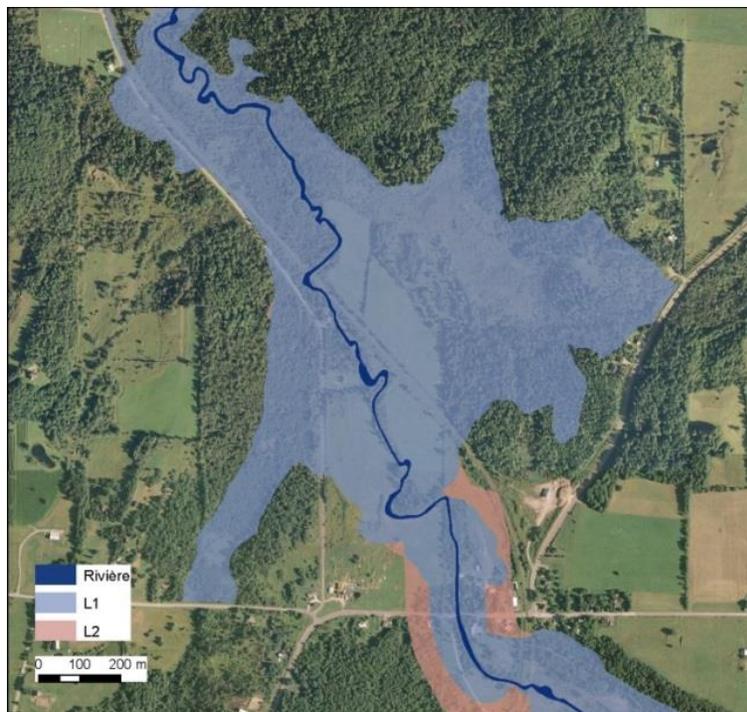


Figure 5.1 Espace de liberté sur la rivière Yamaska Sud-Est qui inclut un grand milieu humide riverain à l'est.

Le milieu humide sur la rivière Yamaska Sud-Est se trouve à l'amont du secteur étudié (Figure 5.2B) et peut donc jouer un rôle hydrologique important en atténuant les crues à l'aval. C'est aussi le cas pour le milieu humide A sur la rivière de la Roche qui se trouve en amont de Saint-Armand, immédiatement en aval du secteur confiné par les terrasses (Figure 5.3).

Le contraste de largeur de l'espace de liberté n'est pas aussi marqué sur la rivière Matane (Figure 5.4). La rivière Matane est nettement plus dynamique que les deux autres cours d'eau, et, conséquemment, son espace de liberté est assez large sur toute sa longueur.

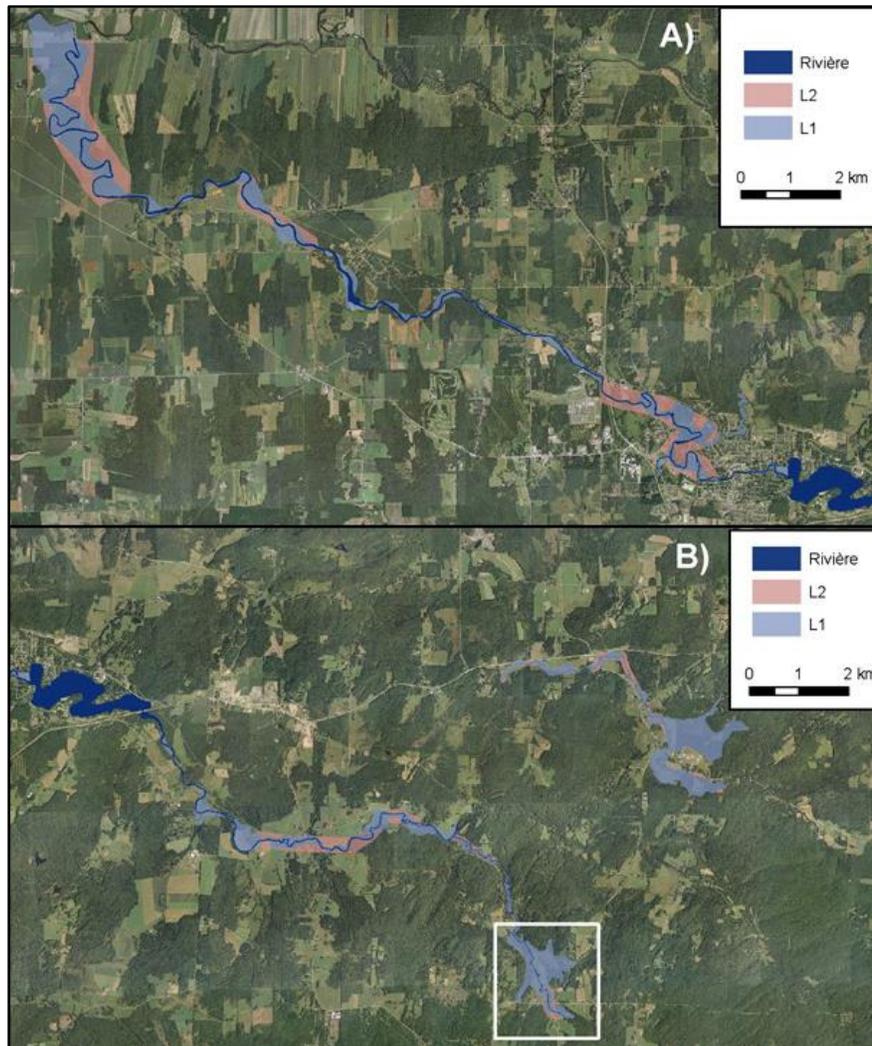


Figure 5.2 Espace de liberté sur la rivière Yamaska Sud-Est : A) partie aval et B) partie amont. Le rectangle blanc représente le milieu humide de la Figure 5.1. Le tributaire North Branch est aussi cartographié.

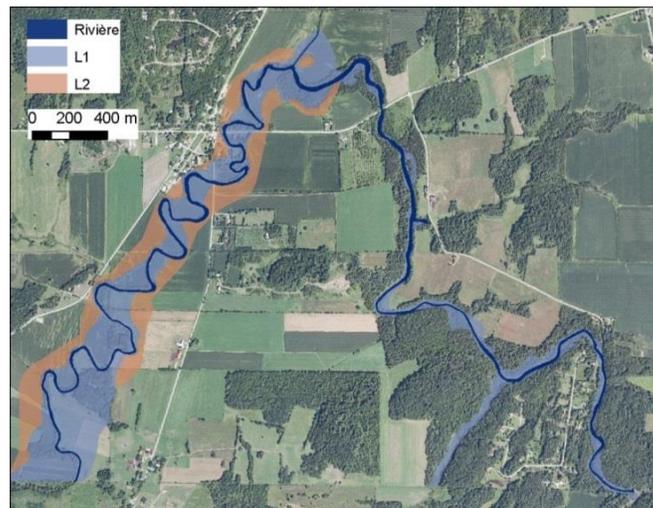


Figure 5.3 Espace de liberté de la rivière de la Roche. Un fort contraste existe entre le secteur confiné à l'amont (à l'est) et le secteur non confiné. Le milieu humide A se trouve à la jonction entre les secteurs confinés et non confinés.

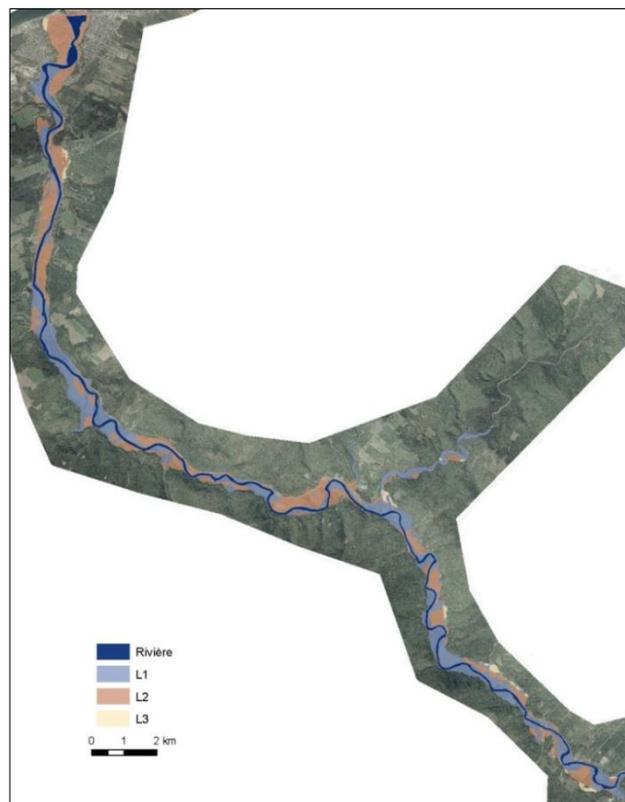


Figure 5.4 Espace de liberté sur la rivière Matane et sur le tributaire Petite Matane.

Les secteurs urbanisés dans les trois bassins versants sont à proximité de la rivière (Figure 5.5). Dans la plupart des cas, les secteurs urbanisés qui se trouvent dans l'espace de liberté sont dans la zone L2, mais dans certains cas (p. ex. un quartier résidentiel de Cowansville, figure 5.5C), ils se retrouvent dans la zone L1, ce qui est plus problématique car ces zones sont très fréquemment inondées et ont un potentiel d'érosion de berges élevé.

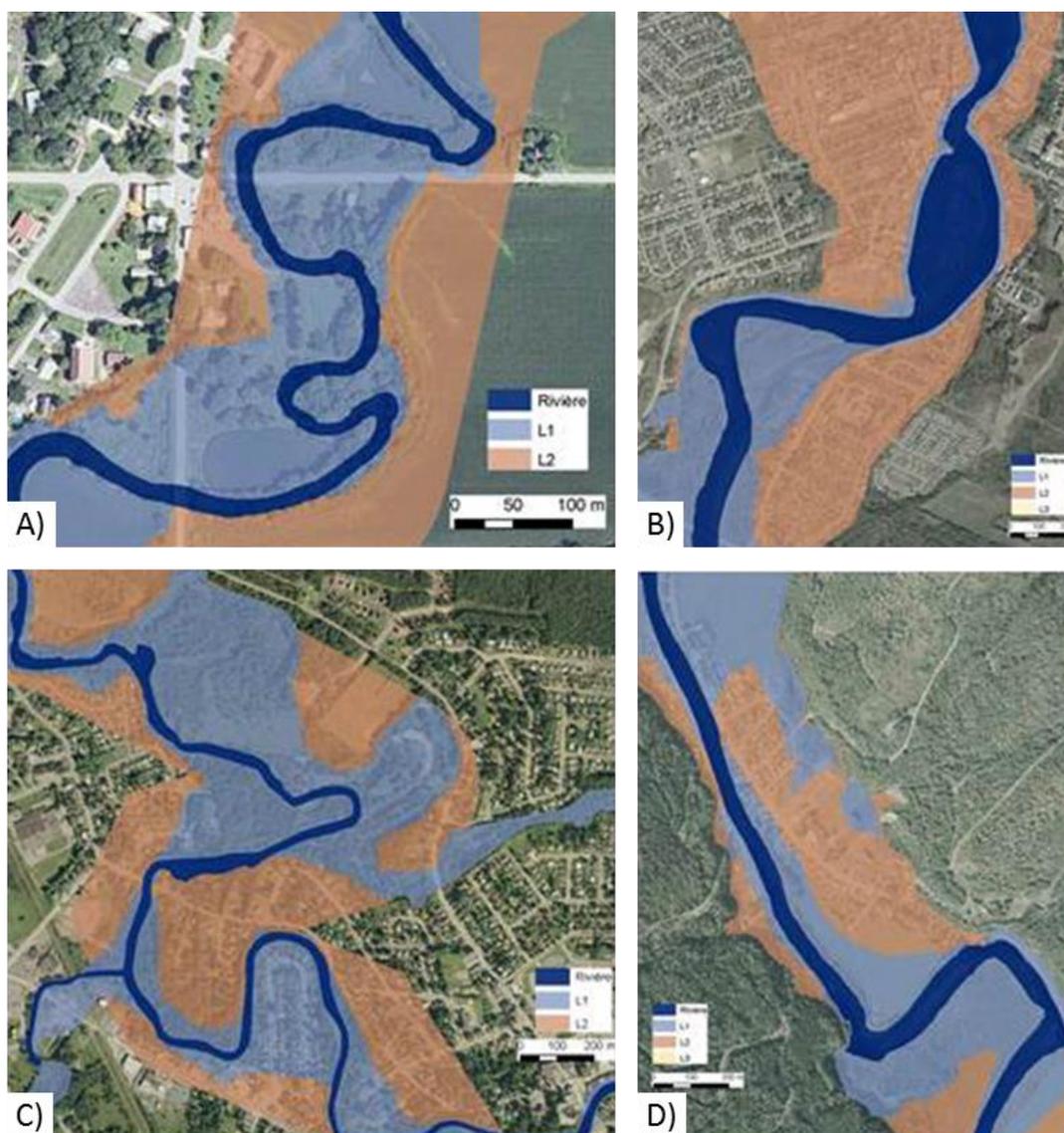


Figure 5.5 Espace de liberté dans les secteurs urbanisés : A) St-Armand (rivière de la Roche); B) Matane (rivière Matane); C) Cowansville (rivière Yamaska Sud-Est) et D) Saint-René-de-Matane (rivière Matane).

Dans les secteurs fortement confinés, comme dans la partie amont de la rivière de la Roche, les espaces de mobilité et d'inondabilité sont presque identiques (Figure 5.6). En général, les zones d'inondations très fréquentes (N1) sont plus larges que les zones fortement mobiles, comme c'est le cas sur la rivière de la Roche, en aval (Figure 5.6). Les seuls cas où l'espace de mobilité s'étend au-delà de l'espace d'inondabilité se retrouvent dans des tronçons qui ont été stabilisés sur des terrasses qui limitent l'inondabilité, mais qui sont érodables. Pour la Yamaska Sud-Est, 84 % des zones d'inondabilité N1 incluent la zone de mobilité M1. Il est par contre fréquent que l'espace de mobilité M2 (qui tient compte des caractéristiques des méandres) dépasse la zone d'inondabilité, surtout dans le cas des rivières avec terrasses érodables (de la Roche et Yamaska Sud-Est).

Dans un espace de liberté, la présence de méandres et de milieux humides aura vraisemblablement un impact sur la vitesse de transmission des crues. D'une part, la vitesse est réduite par la sinuosité des méandres et, d'autre part, la rugosité accrue associée à la végétation des milieux humides réduit aussi grandement la vitesse tout en permettant le stockage d'une partie du volume d'eau et des sédiments. Des bénéfices d'un espace de liberté en amont sont donc attendus en aval où le pic de crue devrait être moindre. En général, les zones agricoles, où une capacité d'évacuation adéquate de l'eau est requise afin d'assurer d'une bonne productivité, se trouvent plutôt à l'aval des bassins versants étudiés ici. Il est donc probable que la création d'un espace de liberté n'ait pas de conséquences négatives pour les producteurs agricoles en termes d'évacuation d'eau quand bien même les vitesses étaient réduites par rapport à une situation sans espace de liberté.

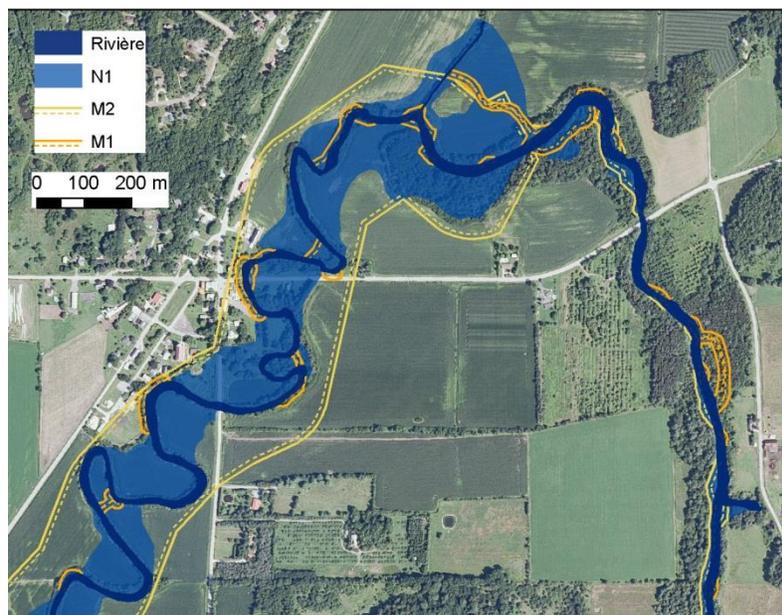


Figure 5.6 Espace d'inondabilité (N1) et de mobilité (M1 et M2) pour une section de la rivière de la Roche.

5.1.1. Discussion sur l'incertitude: espace de mobilité

La prévision de la mobilité du chenal des rivières est un processus qui comprend de nombreuses sources d'erreur et une forte incertitude. De plus, les différentes étapes du processus font intervenir à plusieurs reprises un jugement d'expert qui inclut une certaine proportion de subjectivité et d'approximations. Conséquemment, la détermination des espaces de mobilité des cours d'eau est un exercice cartographique difficile dont le résultat doit être interprété avec plus de circonspection que ne le requiert la cartographie de l'espace d'inondabilité.

La détermination du corridor de mobilité par l'amplitude des méandres, étape primordiale à la détermination de l'espace M2, est sans doute la méthodologie la plus couramment utilisée pour déterminer l'espace de mobilité. 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 moins pertinente. L'ensemble de la plaine alluviale peut en effet être susceptible d'être mobilisé par la rivière dans ces situations, indépendamment de l'amplitude des méandres. La méthode par amplitude des méandres 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 là où une instabilité est présente. Des méthodes palliatives ont été appliquées dans ces cas (prise en compte de marques de tracés anciens ou utilisation d'un tronçon de référence). Les zones deltaïques (embouchure de la rivière Matane dans le fleuve Saint-Laurent et de la Yamaska Sud-Est dans le lac Davignon) sont également des sections où l'amplitude des méandres est une méthode peu adaptée.

Déterminer si les terrasses peuvent être érodées ou non, et si elles limitent par conséquent l'espace de mobilité, peut être une étape plus difficile. 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 l'espace M2) 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.

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. La technique utilisée se base également sur l'hypothèse d'une érosion linéaire dans le temps et dans l'espace, or l'évolution de la forme des méandres ne suit pas une direction linéaire à long terme. La classification de l'entièreté du corridor de liberté en zone M1 permet de pallier à cette limite pour les zones de fort dynamisme. Pour les méandres ponctuellement plus dynamiques que l'ensemble du tronçon où ils se situent, et en particulier pour les cas de méandres ayant une amplitude instable, un jugement d'expert est nécessaire pour corriger les zones susceptibles d'être érodées.

Il est également important de remarquer que pour l'ensemble des méthodes utilisées, il a été présumé que les phénomènes futurs pouvaient être prédits à partir de l'observation des phénomènes passés. Le comportement des rivières peut cependant se modifier dans le temps, en particulier selon des changements hydrologiques liés à l'utilisation du sol ou de la rivière (p. ex. 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 pas été effectuée. En outre, les recoupements de méandres peuvent obéir à des cycles (Hooke, 2003) qui ne sont pas pris en compte par la méthodologie.

Enfin, les méthodes utilisées pour déterminer l'espace de mobilité des rivières ne prennent pas en compte les éléments anthropiques du territoire. Ainsi, les routes ou voies ferrées longeant les cours d'eau peuvent modifier le comportement des cours d'eau. Par exemple, sur la Yamaska Sud-Est à l'aval du village de West-Brome, il est possible que le confinement de la rivière par la voie ferrée provoque une érosion accrue sur les secteurs adjacents (Figure 5.7). Par ailleurs, les ponts entravent également la migration du lit 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 sont identifiés à l'annexe 6.

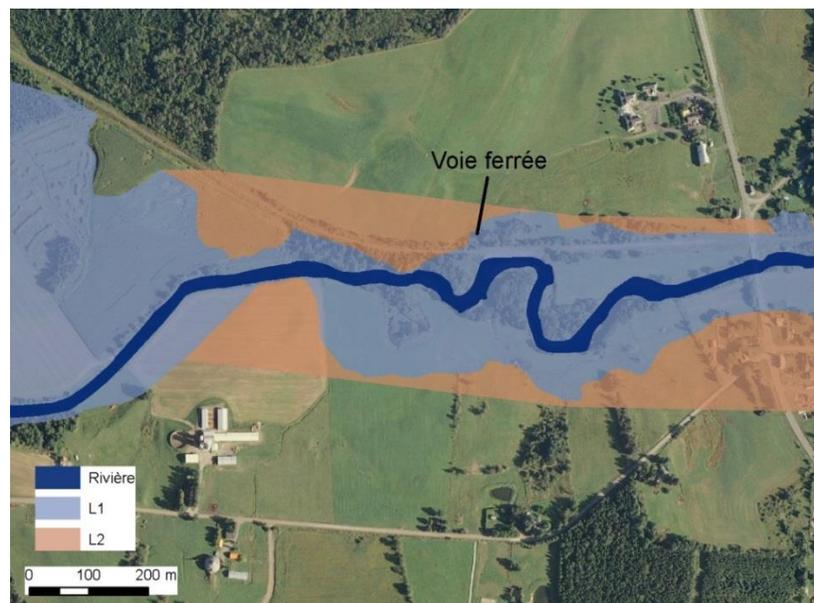


Figure 5.7 Impact potentiel de la voie ferrée située dans l'espace de liberté sur la migration de la rivière Yamaska Sud-Est à l'ouest de West Brome.

5.1.2. Discussion sur l'incertitude: espace d'inondabilité

La cartographie de l'espace d'inondabilité reflète de nombreux choix fixés de manière à rencontrer les objectifs relatifs à la protection civile et à la préservation de l'intégrité fluviale. Au niveau de la protection civile, l'acceptabilité de l'aléa d'inondabilité se pose par des critères d'ordre quantitatif avec, au Québec, un accent porté sur la fréquence d'inondation. La relation entre la cartographie hydrogéomorphologique (HGM) et la fréquence d'inondation est, au mieux, approximative. L'HGM rend compte d'une dynamique agissant à long terme, mais les transitions observées dans la morphologie ne renvoient pas nécessairement à des échelles équivalentes à celles choisies dans une perspective de gestion du risque. Aussi, la complexité inhérente aux styles fluviaux et aux plaines inondables se traduit par des couplages différents entre les formes observées et les processus de crues, notamment au niveau de la fréquence d'inondation.

Dans le cadre de ce projet, la cartographie HGM est employée de façon à minimiser l'incertitude entourant la rencontre des objectifs relatifs à la fréquence d'inondation. Les modèles hydrauliques appliqués sur les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est indiquent que 94 % (DLR) et 90 % (YSE) de la plaine est inondée par un débit de récurrence 20 ans. Cette proportion est certainement variable à travers le réseau fluvial, notamment en fonction de la pente ou de la puissance spécifique des tronçons fluviaux. Le choix du seuil de puissance spécifique du cours d'eau (75 W/m^2) vise à assurer que les surfaces assimilées à un niveau hiérarchique N2 (20-100 ans) ne sont que marginalement inondées par une crue de récurrence 20 ans. Dans le cas de la rivière Matane, la disponibilité des cotes de crue 20 et 100 ans sur l'ensemble du tronçon fluvial apporte une assurance supplémentaire que ce qui est classé N2 est réellement inondé à une récurrence supérieure à 20 ans.

Une approche alternative consiste à assumer la probabilité que ce qui est classé N2 puisse chevaucher dans une plus grande proportion la cote de récurrence de 20 ans. La figure 5.8 montre l'effet d'un seuil alternatif fixé à 30 W/m^2 sur un tronçon fluvial de la rivière Yamaska Sud-Est près de la municipalité de Brigham. Ce choix fait apparaître des niveaux hiérarchiques N2 dont les surfaces sont susceptibles d'être partiellement inondées à une fréquence inférieure à 20 ans. Le choix du seuil réfère en fait à la manière dont l'incertitude associée à la variabilité dans le couplage entre formes et processus est gérée dans l'application du concept d'espace d'inondabilité.

Au niveau de la préservation de l'intégrité fluviale, les critères peuvent aussi être exprimés d'un point de vue quantitatif, soit selon des processus par des variables de fréquence, de profondeurs d'eau ou de vitesses d'écoulement. L'intérêt de l'approche HGM est la préservation stratégique de certaines zones de la plaine inondable qui sont connues pour supporter des fonctions essentielles du système fluvial. Le choix des critères, quantitatifs (orientés sur les processus) et/ou qualitatifs (orientés sur les formes), requiert implicitement une définition de ce qu'est l'intégrité fluviale de manière à identifier les méthodes de cartographie appropriées pour en assurer le maintien. Dans le cadre de ce projet, l'intégrité fluviale est définie dans une perspective nomothétique, c'est-à-dire relative à des généralités rattachées à l'archétype de ce qu'est la plaine inondable et son fonctionnement à l'état naturel.

Dans le domaine appliqué de la restauration de cours d'eau, l'état naturel est reconnu comme une condition dynamique, contrôlée par des facteurs d'ordres climatique et sédimentaire, mais aussi par un historique de perturbations anthropiques (Wohl et Merritt, 2007). Les fonctions naturelles sont par ailleurs variables dans l'espace et ne sont pas toujours synonymes de bienfaits écologiques tels qu'une biodiversité accrue résultant d'un habitat plus hétérogène (Dufour et Piégay, 2009). En revanche, l'approche nomothétique est probablement celle qui, par sa simplicité, optimise la pratique de cartographie d'un espace de liberté.

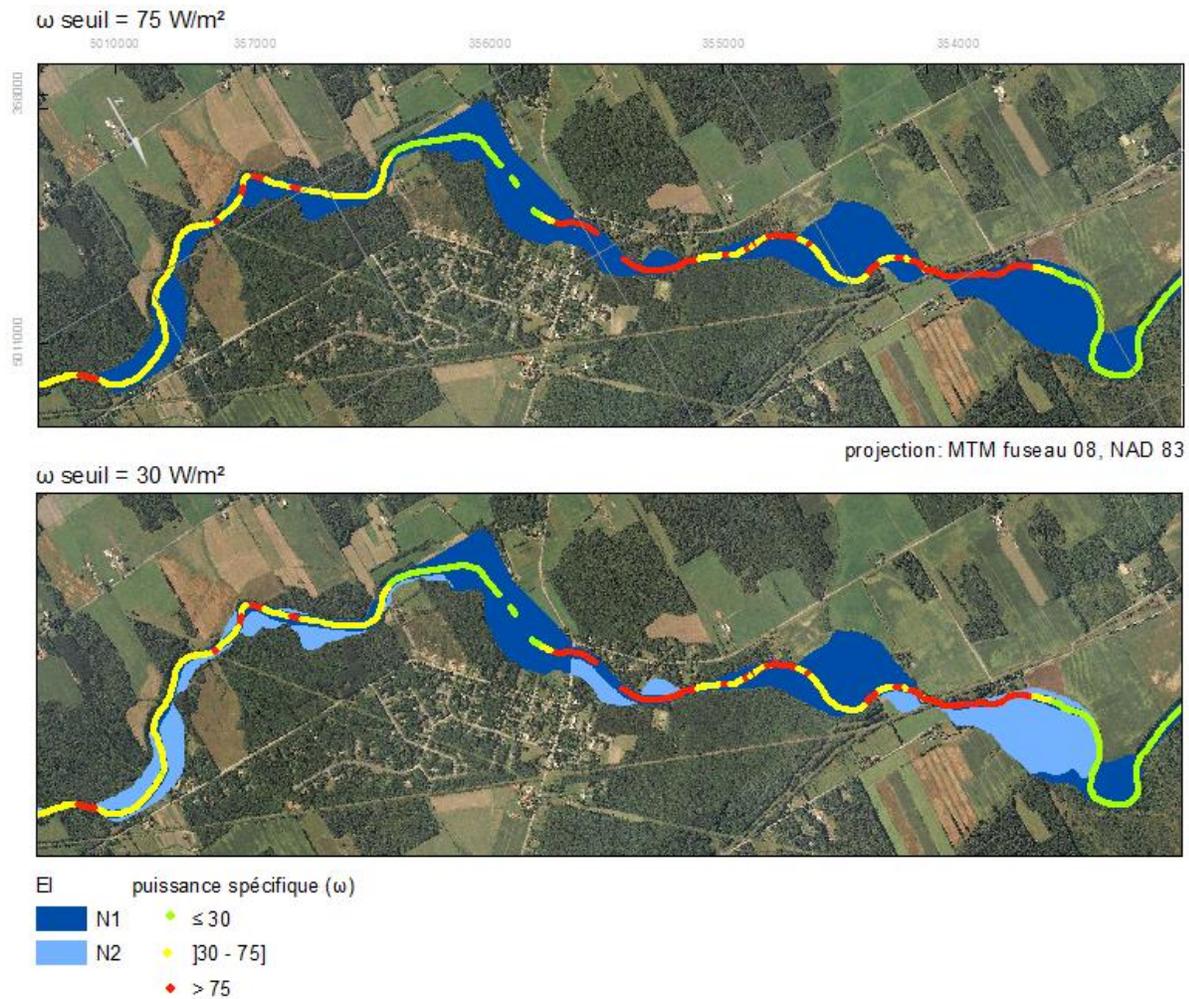


Figure 5.8 Effet du seuil de puissance spécifique sur la composition de l'espace d'inondabilité sur la rivière Yamaska Sud-Est (municipalité de Brigham).

5.2. Cartographie avec changements climatiques

5.2.1. Impacts des changements climatiques sur le climat

Afin de mettre en contexte les changements attendus aux divers indicateurs hydrologiques, il convient d'abord de présenter les changements attendus sur quelques variables climatiques clés pour les régions de la rivière Yamaska Sud-Est et de la rivière Matane. Il est présumé que les changements sur la rivière de la Roche seront similaires à ceux sur la Yamaska Sud-Est.

5.2.1.1. *Température moyenne*

La normale de température moyenne annuelle dans la région de Yamaska Sud-Est pour la période 1971-2000 est de 5,7 °C. Une légère tendance à la hausse peut être observée au cours de cette période (Figure 5.9A), bien que non significative selon un test de tendance de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$). La température moyenne mensuelle varie de -10 °C en hiver à 20 °C l'été (Figure 5.9B). On observe par contre des pointes minimum journalières jusqu'à -30 °C en janvier et février et des pointes maximum jusqu'à 28 °C au mois d'août. Il est à noter que la station de Brome représente la portion inférieure du spectre de températures du bassin versant de la Yamaska Sud-Est, la station étant située à une altitude de 206 m en amont du bassin. Les modèles climatiques s'entendent généralement tous sur une augmentation des températures annuelles, aussi bien pour l'horizon 2050 que l'horizon 2080, de l'ordre de 2,5 et de 3,6 °C, respectivement (Figure 5.9C). Cette augmentation est statistiquement significative à $\alpha=0,05$ selon le test de Wilcoxon-Kruskal-Wallis. L'augmentation est généralement plus importante au cours des mois d'hiver que des mois d'été.

Quant à la normale de température moyenne annuelle pour la région de Matane pour la période 1971-2000, elle est de 1,8 °C. Une légère tendance à la hausse peut être observée au cours de cette période (Figure 5.10A), bien que non significative selon un test de tendance de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$). La température moyenne mensuelle varie de -15 °C en hiver à 16 °C l'été (Figure 5.10B). On observe par contre des pointes minimum journalières jusqu'à -30 °C en janvier et février et des pointes maximum jusqu'à 26 °C au mois de juillet. Les modèles climatiques s'entendent généralement tous sur une augmentation des températures annuelles, aussi bien pour l'horizon 2050 que l'horizon 2080, de l'ordre de 2,5 et de 3,8 °C, respectivement (Figure 5.10C). Cette augmentation est statistiquement significative à $\alpha=0,05$ selon le test de Wilcoxon-Kruskal-Wallis. L'augmentation est généralement plus importante au cours des mois d'hiver que des mois d'été, ce qui pourrait notamment avoir un impact sur le risque d'embâcle sur la rivière.

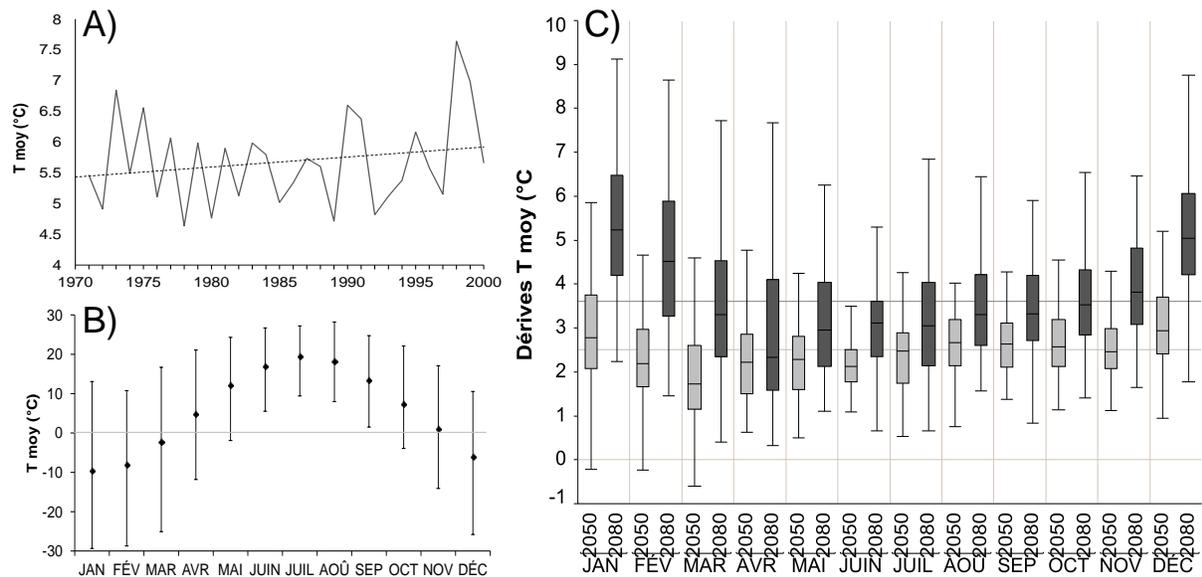


Figure 5.9 Températures moyennes à la station climatique de Brome. A) Températures moyennes annuelles de 1971 à 2000. La courbe en pointillé indique une légère tendance à la hausse sur cette période. B) Températures moyennes journalières de 1971 à 2000. C) Dérives attendues des températures moyennes par l'ensemble des modèles climatiques pour les horizons 2050 et 2080. L'augmentation annuelle moyenne est de 2,5 °C pour l'horizon 2050 (trait horizontal gris pâle) et de 3,6 °C pour l'horizon 2080 (trait horizontal gris foncé).

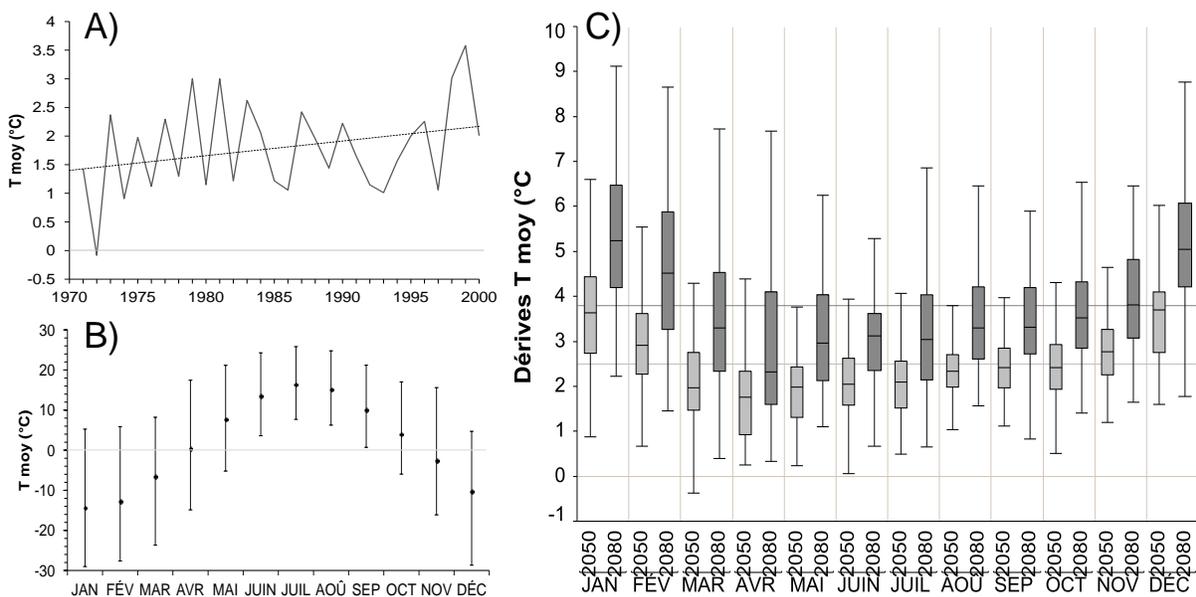


Figure 5.10 Températures moyennes à la station climatique de Saint-René-de-Matane. A) Températures moyennes annuelles de 1971 à 2000. La courbe en pointillé indique une légère tendance à la hausse sur cette période. B) Températures moyennes journalières de 1971 à 2000. C) Dérives attendues des températures moyennes par l'ensemble des modèles climatiques pour les horizons 2050 et 2080. L'augmentation annuelle moyenne est de 2,5 °C pour l'horizon 2050 (trait horizontal gris pâle) et de 3,8 °C pour l'horizon 2080 (trait horizontal gris foncé).

5.2.1.2. *Précipitations totales*

La normale des précipitations totales annuelles dans la région de Yamaska Sud-Est pour la période 1971-2000 est de 1218 mm. Une légère tendance à la baisse peut être observée au cours de cette période (Figure 5.11A), bien que non significative selon un test de tendance de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$). Les précipitations totales mensuelles sont réparties presque également au cours de l'année et avoisinent les 100 mm par mois (Figure 5.11B). La variabilité interannuelle est par contre passablement importante, alors que certains mois peuvent recevoir jusqu'à 240 mm. Le consensus des modèles climatiques par rapport au signal de changement climatique est beaucoup moins clair que pour les températures. La tendance qui peut être détectée en examinant la médiane de l'ensemble indique une hausse pour la plupart des mois de l'année, à l'exception des mois de juillet et d'août, et ce, aussi bien pour l'horizon 2050 que l'horizon 2080 (Figure 5.11C). La moyenne annuelle indique une augmentation de 7,9 % pour l'horizon 2050 et de 11,3 % pour l'horizon 2080. Cette augmentation est statistiquement significative à $\alpha=0,05$ selon le test de Wilcoxon-Kruskal-Wallis.

La normale des précipitations totales annuelles dans la région de Matane pour la période 1971-2000 est de 1077 mm. Une légère tendance à la hausse peut être observée au cours de cette période (Figure 5.12A), bien que non significative selon un test de tendance de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$). Les précipitations totales mensuelles sont réparties presque également au cours de l'année et avoisinent les 90 mm par mois (Figure 5.12B). La variabilité interannuelle est passablement importante, alors que certains mois peuvent recevoir jusqu'à 200 mm. Le consensus des modèles climatiques par rapport au signal de changement climatique est beaucoup moins clair que pour les températures. La tendance qui peut être détectée en examinant la médiane de l'ensemble indique une hausse pour tous les mois de l'année pour l'horizon 2050 et pour l'horizon 2080 (Figure 5.12C). La moyenne annuelle indique une augmentation de 10,5 % pour l'horizon 2050 et de 14,8 % pour l'horizon 2080. Ces augmentations sont statistiquement significatives à $\alpha=0,05$ selon le test de Wilcoxon-Kruskal-Wallis.

5.2.1.3. *Ratio de précipitations liquides et solides entre décembre et mars*

Bien que les modèles prédisent une augmentation générale des précipitations à l'échelle annuelle, le ratio de précipitations liquides et solides entre les mois de décembre et mars renseigne sur l'état (liquide ou solide) de ces précipitations au cours des mois d'hiver. Pour les deux rivières, des tendances à la hausse du ratio sont observées de 1971 à 2000 (Figure 5.13A et B). Toutefois, ces tendances ne sont pas significativement différentes de zéro selon un test de tendance de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$). En climat futur, les modèles climatiques s'entendent tous sur une augmentation de la proportion de précipitations liquides au cours de l'hiver (Figure 5.13C). À l'horizon 2050, on prévoit une augmentation de 83,8 % au ratio moyen de 56,7 % au cours de la période de référence sur la rivière Yamaska Sud-Est et une augmentation de 108,4 % au ratio de référence de 13,7 % pour la Matane. Pour l'horizon 2080, on prévoit une augmentation de 150,5 % sur la rivière Yamaska Sud-Est et une augmentation de 183,8 % pour la Matane. Ces augmentations sont statistiquement significatives à $\alpha=0,05$ selon le test de Wilcoxon-Kruskal-Wallis.

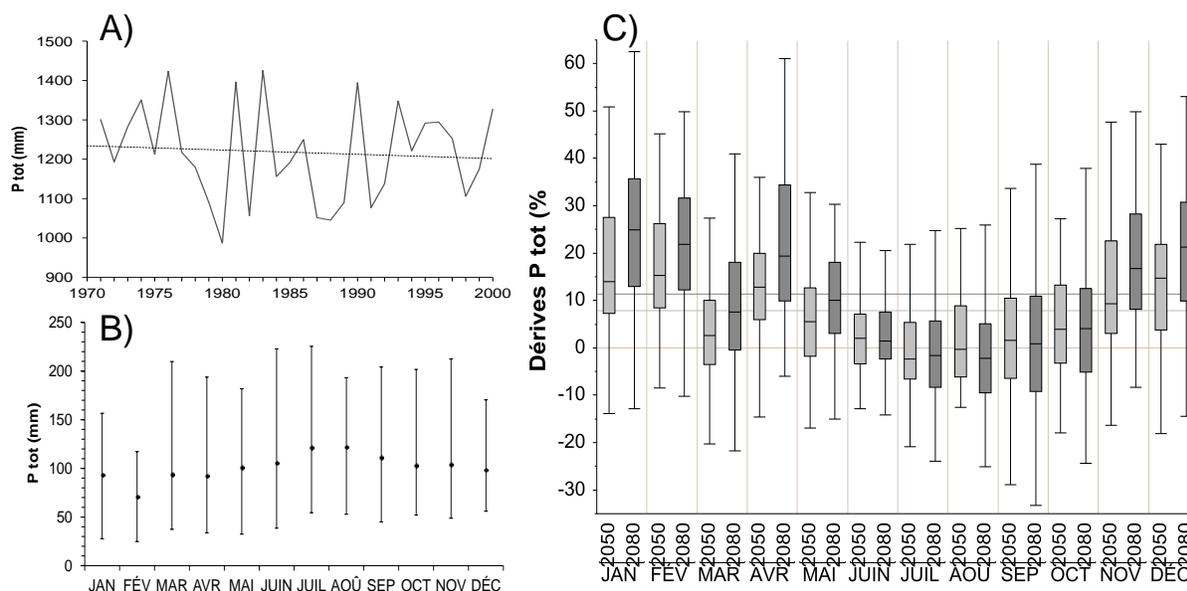


Figure 5.11 Précipitations à la station climatique de Brome. A) Précipitations totales annuelles de 1971 à 2000. La courbe en pointillé indique une légère tendance à la baisse sur cette période. B) Précipitations mensuelles de 1971 à 2000. C) Dérives attendues des précipitations par l'ensemble des modèles climatiques pour les horizons 2050 et 2080. L'augmentation annuelle moyenne est de 7,9 % pour l'horizon 2050 (trait horizontal gris pâle) et de 11,3 % pour l'horizon 2080 (trait horizontal gris foncé).

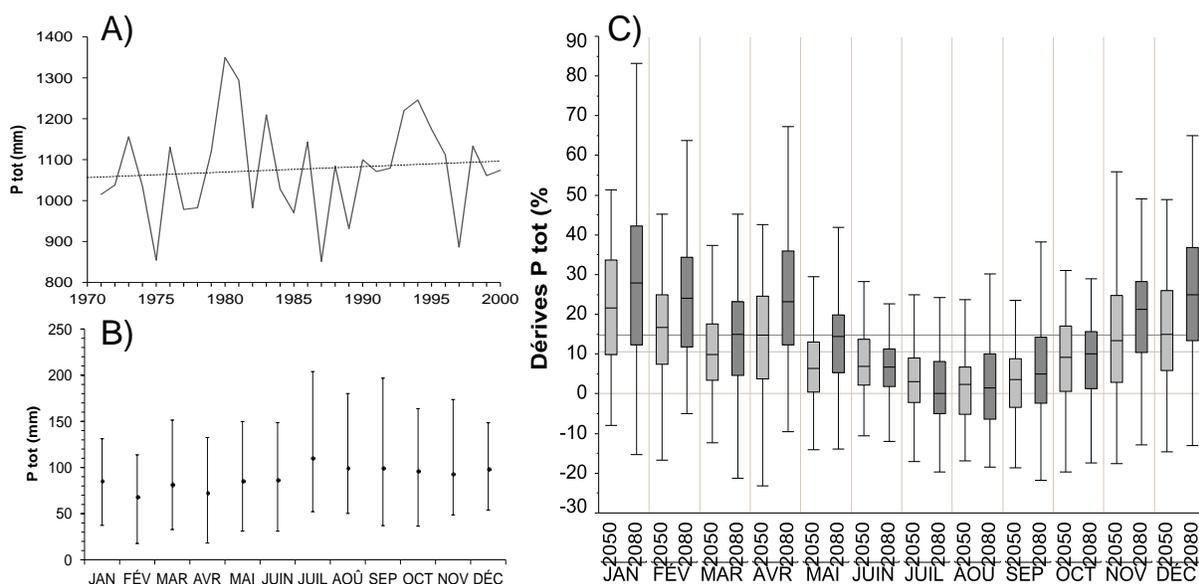


Figure 5.12 Précipitations à la station climatique de Saint-René-de-Matane. A) Précipitations totales annuelles de 1971 à 2000. La courbe en pointillé indique une légère tendance à la hausse sur cette période. B) Précipitations mensuelles de 1971 à 2000. C) Dérives attendues des précipitations par l'ensemble des modèles climatiques pour les horizons 2050 et 2080. L'augmentation annuelle moyenne est de 10,5 % pour l'horizon 2050 (trait horizontal gris pâle) et de 14,8 % pour l'horizon 2080 (trait horizontal gris foncé).

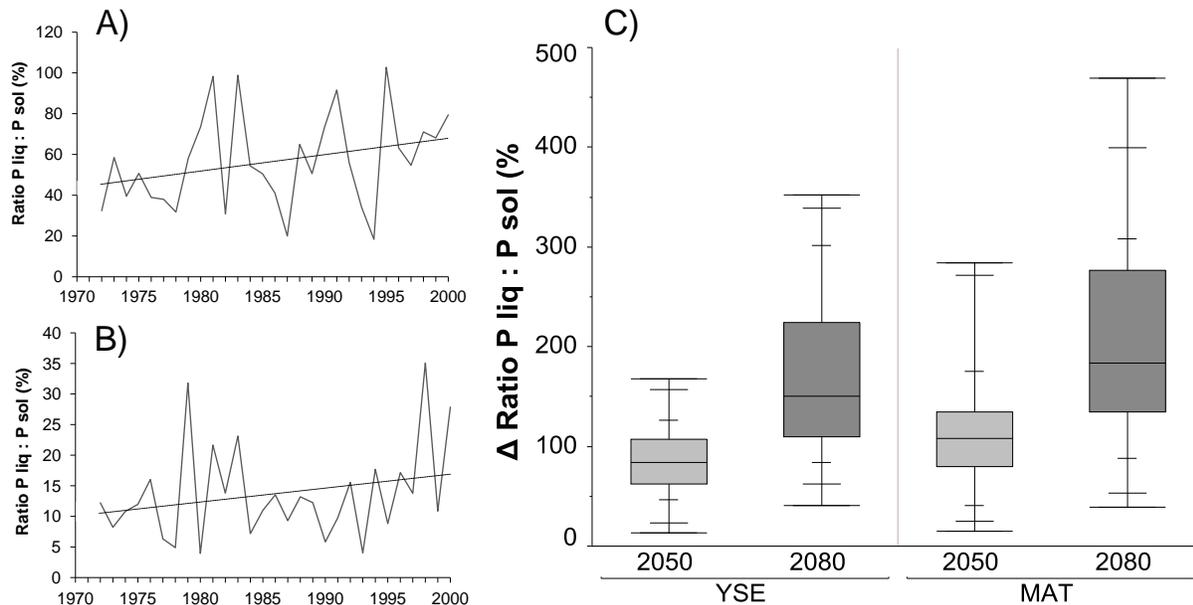


Figure 5.13 Ratio de précipitations liquides et solides entre les mois de décembre et mars pour la période de référence (1971-2000) pour les rivières A) Yamaska Sud-Est et B) Matane. C) Dérives du ratio P liq : P sol pour les horizons 2050 et 2080 pour les deux rivières.

5.2.1.4. Précipitations maximales annuelles sur 24 h entre mai et octobre

Au cours de la période de référence de 1971 à 2000, les tendances de précipitations maximales sur 24 h entre les mois de mai et d'octobre ne sont pas très marquées (Figure 5.14A et B). De fait, les tendances observées ne sont pas significativement différentes de zéro pour les deux rivières. Cependant, en climat futur, les modèles climatiques prédisent une augmentation des P max de l'ordre de 11,1 % et de 10,4 % pour les rivières Yamaska Sud-Est et Matane, respectivement (horizon 2050) (Figure 5.14C). Pour l'horizon 2080, cette augmentation est de 17,2 % pour la Yamaska Sud-Est et de 11,0 % pour la Matane. Ces différences sont significativement significatives à $\alpha=0,05$ selon le test de Wilcoxon-Kruskal-Wallis.

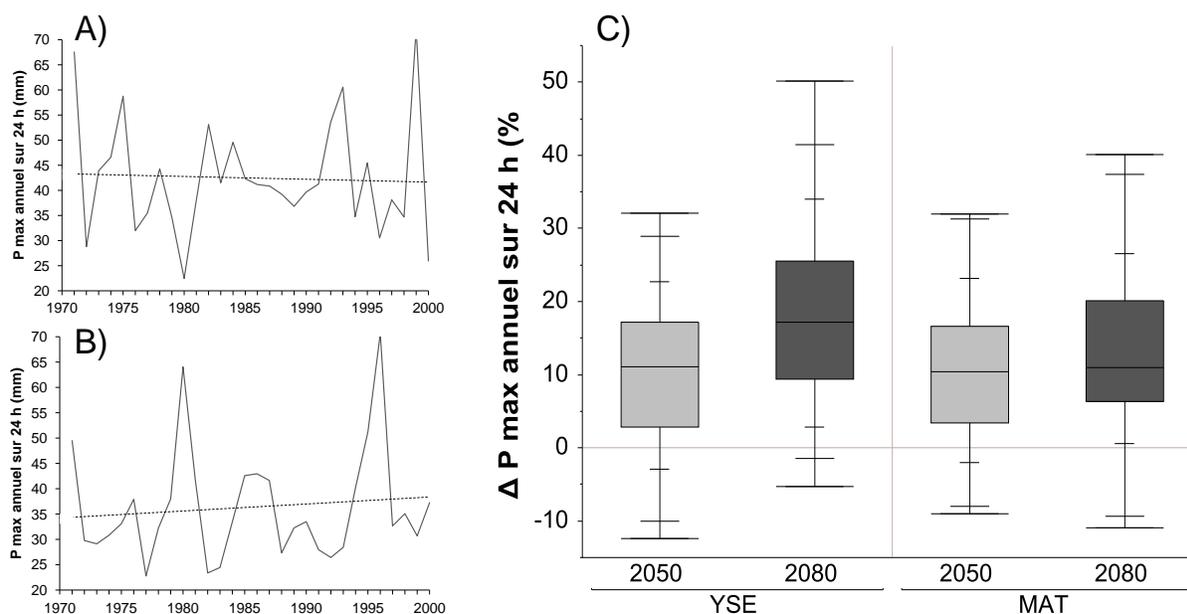


Figure 5.14 Précipitations maximales annuelles sur 24 h entre les mois de mai et d'octobre pour la période de référence (1971-2000) pour les rivières A) Yamaska Sud-Est et B) Matane. C) Dérives des précipitations maximales annuelles sur 24 h pour les horizons 2050 et 2080 pour les deux rivières.

5.2.2. Impacts des changements climatiques sur l'hydrologie en général

5.2.2.1. Débit moyen

Pour la rivière Yamaska Sud-Est, une tendance à la baisse est observée du débit moyen de 1971 à 2000 (Figure 5.15A). Cette tendance est significativement différente de zéro selon un test de tendance de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$). En ce qui concerne les prévisions futures, la dérive médiane pour l'indicateur de débit moyen est de -1,3 % pour l'horizon 2050 et de -0,6 % pour l'horizon 2080 (Figure 5.15C). Ceci indique donc une très légère tendance à la baisse de la quantité d'eau transigeant par la rivière Yamaska Sud-Est en climat futur, ce qui concorde avec les observations de la période de référence. L'incertitude sur le signal, dont témoigne l'écart entre les 10^e et 90^e centiles, est de 16 % pour l'horizon 2050 et de 21 % pour l'horizon 2080. Le consensus des modèles de l'ensemble par rapport à la direction du changement indique une tendance incertaine. Selon un test de Wilcoxon-Kruskal-Wallis, les différences par rapport au débit moyen de la période de référence ne sont toutefois pas significatives pour les deux horizons futurs.

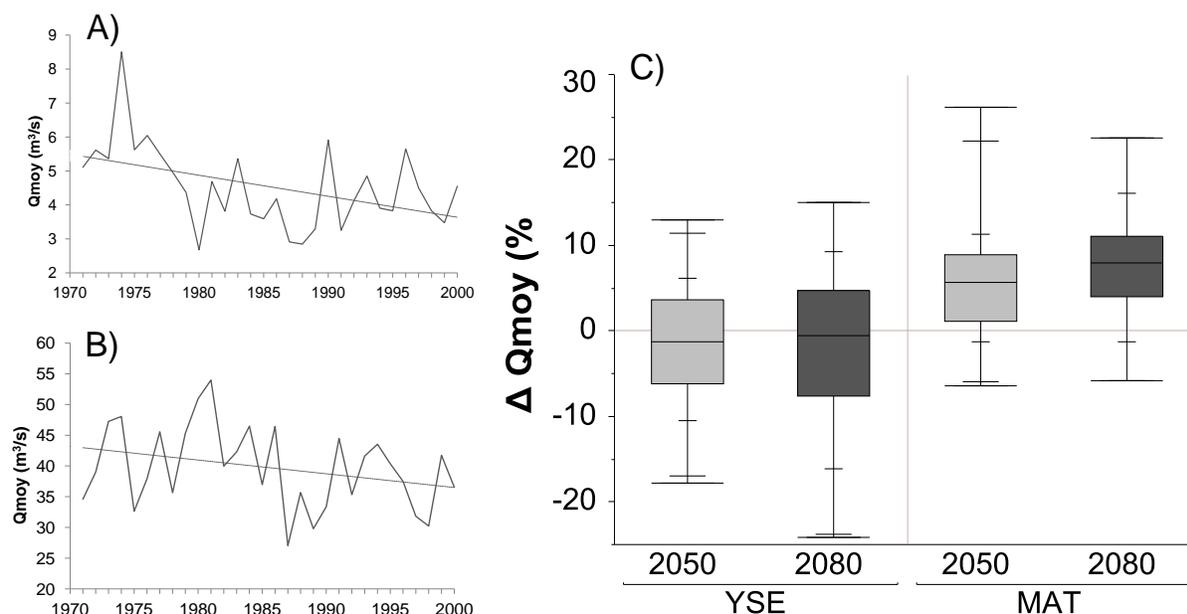


Figure 5.15 Débit moyen observé pour la période de référence (1971-2000) pour les rivières A) Yamaska Sud-Est et B) Matane. C) La médiane de l'ensemble des modèles climatiques prédit une très légère diminution des débits moyens sur la Yamaska Sud-Est et une légère augmentation sur la Matane. Les diagrammes à moustaches présentent l'étendue min-max ainsi que les 2.5^e, 10^e, 25^e, 50^e, 75^e, 90^e et 97.5^e quantiles.

Pour la rivière Matane, une tendance à la baisse du débit moyen est également observée de 1971 à 2000 (Figure 5.15B). Cette tendance n'est toutefois pas significativement différente de zéro selon un test de tendance de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$). En climat futur, la dérive médiane pour l'indicateur de débit moyen est de 5,7 % pour l'horizon 2050 et de 8,0 % pour l'horizon 2080 (Figure 5.15C). Ceci indique donc une tendance à la hausse de la quantité d'eau transigeant par la rivière Matane en climat futur. L'incertitude sur le signal est de 12 % pour l'horizon 2050 et de 16 % pour l'horizon 2080. Le consensus des modèles de l'ensemble par rapport à la direction du changement est par contre plus convaincant, indiquant une augmentation probable de l'indicateur. Selon un test de Wilcoxon-Kruskal-Wallis, la différence par rapport au débit moyen de la période de référence est non significative pour l'horizon 2050, mais significative pour l'horizon 2080.

5.2.2.2. Débits de crue

À l'échelle annuelle, les modèles climatiques prédisent pour la rivière Yamaska Sud-Est une augmentation des débits de crue de récurrence 2 ans (Q_2 ; 6,8 %), 20 ans (Q_{20} ; 8,9 %) et 100 ans (Q_{100} ; 9,4 %) pour l'horizon 2050 (Figure 5.16) par rapport aux valeurs de la période 1971-2000 (Tableau 5.1). Des augmentations similaires sont prévues pour l'horizon 2080 (Q_2 : 3,9 %; Q_{20} : 12,0 %; Q_{100} : 20,5 %). Lorsque l'année est divisée en ses deux sous-régimes de crue, c'est-à-dire le printemps (février à mai) et l'été/automne (juin à janvier), il apparaît que les tendances pour les crues de printemps (généralement à la baisse) se distinguent des tendances pour les crues annuelles et d'été/automne (généralement à la

hausse). Ceci s'explique par une diminution du stockage de précipitations solides sous forme de couvert de neige, entraînant de moins fortes crues lors de la fonte printanière. L'incertitude se situe généralement entre 16 et 37 % pour l'horizon 2050 et entre 20 et 42 % pour l'horizon 2080. Le consensus des modèles par rapport à la direction du changement indique une augmentation probable pour les débits de crue à l'échelle annuelle, une tendance incertaine pour les débits de crue printaniers et une augmentation très probable pour les débits de crue d'été et d'automne.

Quant à la rivière Matane, les modèles climatiques prédisent une augmentation des débits de crue annuels de récurrence 2 ans (Q_2 ; 1,8 %), mais une diminution des débits de crue 20 ans (Q_{20} ; -6,8 %) et 100 ans (Q_{100} ; -8,2 %) pour l'horizon 2050 (Figure 5.17) par rapport aux valeurs de la période 1971-2000 (Tableau 5.2). Des résultats similaires sont prévus pour l'horizon 2080 (Q_2 : 2,4 %; Q_{20} : -5,6 %; Q_{100} ; -5,9 %). Lorsque l'année est divisée en ses deux sous-régimes de crue, c'est-à-dire le printemps (janvier à juin) et l'été/automne (juillet à décembre), il apparaît que les tendances pour les crues de printemps (généralement à la baisse) sont celles qui influencent davantage les tendances des crues annuelles puisque les tendances pour les crues d'été/automne sont quant à elles généralement à la hausse.

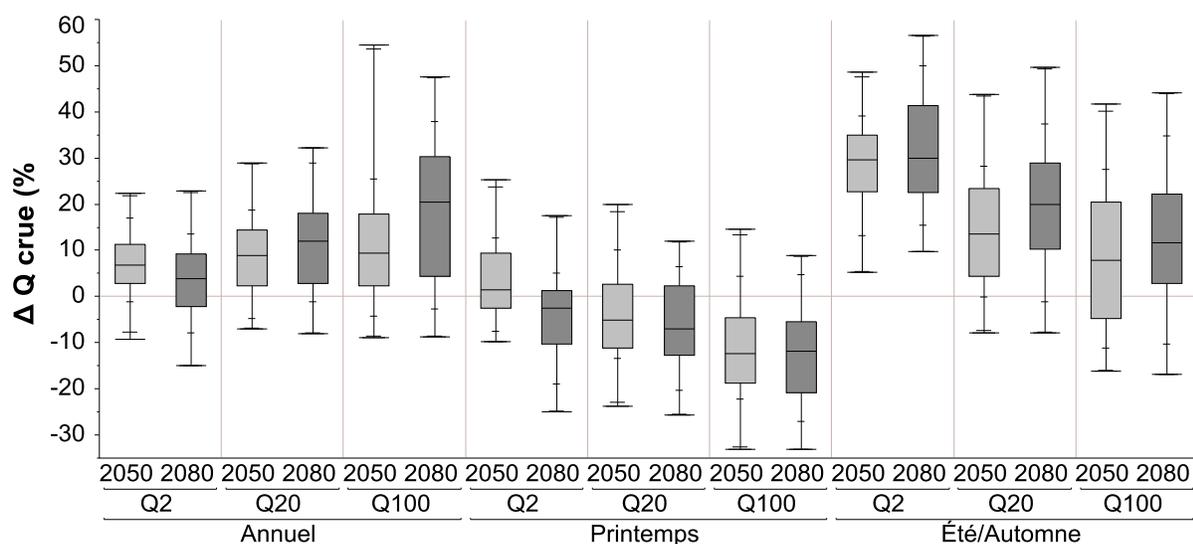


Figure 5.16 Dérives des débits de crue pour la rivière Yamaska Sud-Est pour les horizons 2050 et 2080.

Tableau 5.1 Débits de crue observés (m^3/s) sur la Yamaska Sud-Est pour la période 1971-2000

Annuel			Printemps			Été/Automne		
Q2	Q20	Q100	Q2	Q20	Q100	Q2	Q20	Q100
69,75	119,97	146,13	77,67	141,29	185,45	54,25	116,52	160,95

Ceci s'explique par une diminution du stockage de précipitations solides sous forme de couvert de neige, entraînant de moins fortes crues lors de la fonte printanière. Toutefois, comme les crues printanières sur la rivière Matane sont généralement de trois à quatre fois plus importantes que les crues d'été/automne, le signal à la baisse des crues printanières entraîne avec lui le signal des débits de crue à l'échelle annuelle. L'incertitude se situe généralement entre 20 et 30 % pour l'horizon 2050 et entre 21 et 28 % pour l'horizon 2080 pour les débits de crue annuels et printaniers. L'incertitude est toutefois beaucoup plus importante pour les débits de crue d'été/automne, entre 26 et 64 % pour l'horizon 2050 et entre 47 et 60 % pour l'horizon 2080. Le consensus des modèles par rapport à la direction du changement indique généralement une diminution probable pour les débits de crue à l'échelle annuelle et printanière, et une augmentation très probable pour les débits de crue d'été et d'automne.

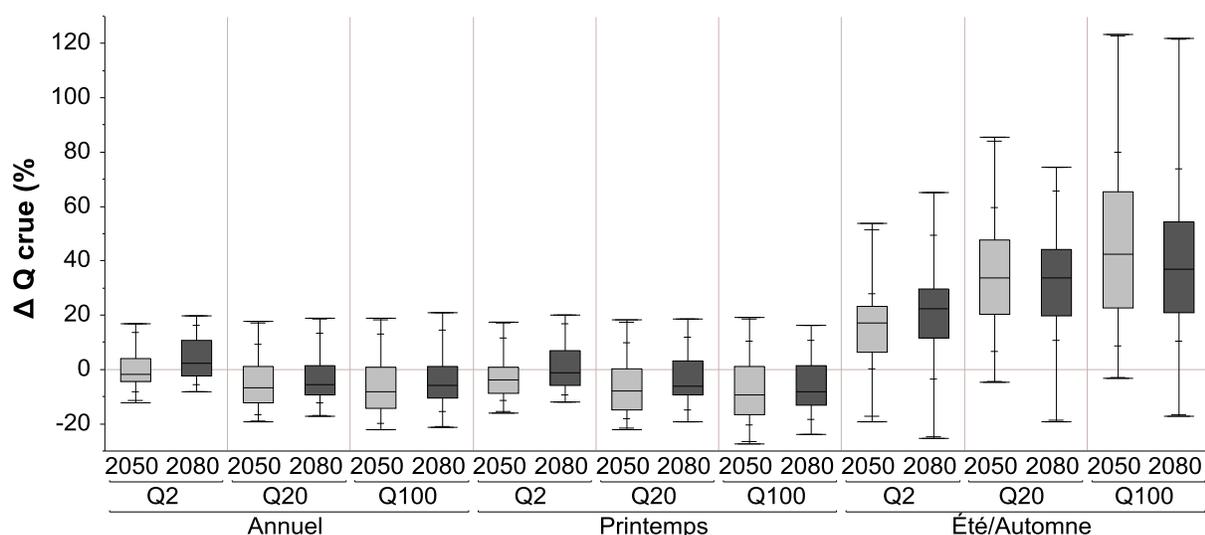


Figure 5.17 Dériver des débits de crue pour la rivière Matane pour les horizons 2050 et 2080.

Tableau 5.2 Débits de crue observés (m^3/s) sur la Matane pour la période 1971-2000

Annuel			Printemps			Été/Automne		
HF2	HF20	HF100	HF2	HF20	HF100	HF2	HF20	HF100
389,69	683,39	837,58	460,26	774,62	971,81	162,32	247,81	290,39

5.2.2.3. Débits d'étiage d'été

Pour la rivière Yamaska Sud-Est, les dérives de débits d'étiage présentent une forte baisse pour l'horizon 2050 (Q_{2-7} : -45 %; Q_{10-7} : -46 %) (Figure 5.18) par rapport à la période 1971-2000 (Tableau 5.3). Les modèles comportent une incertitude relativement faible (approx. 25 %) et un fort consensus de diminution très probable pour ces indicateurs. À l'horizon 2080, le Q_{2-7} présente également une forte diminution de -53 % et une incertitude passablement faible (33 %), alors que le signal du Q_{10-7} est moins clair, avec une incertitude de 97 % pour une médiane de -19 %.

Le signal pour les débits d'étiage de la rivière Matane est moins tranché que celui sur la Yamaska Sud-Est. Les modèles prédisent une diminution probable du Q_{2-7} tant à l'horizon 2050 (-7,8 %) qu'à l'horizon 2080 (-16,4 %). Pour ce qui est du Q_{10-7} , la tendance est incertaine, avec des médianes de 2,4 % pour l'horizon 2050 (incertitude de 51 %) et de 1,2 % pour l'horizon 2080 (incertitude de 51 %).

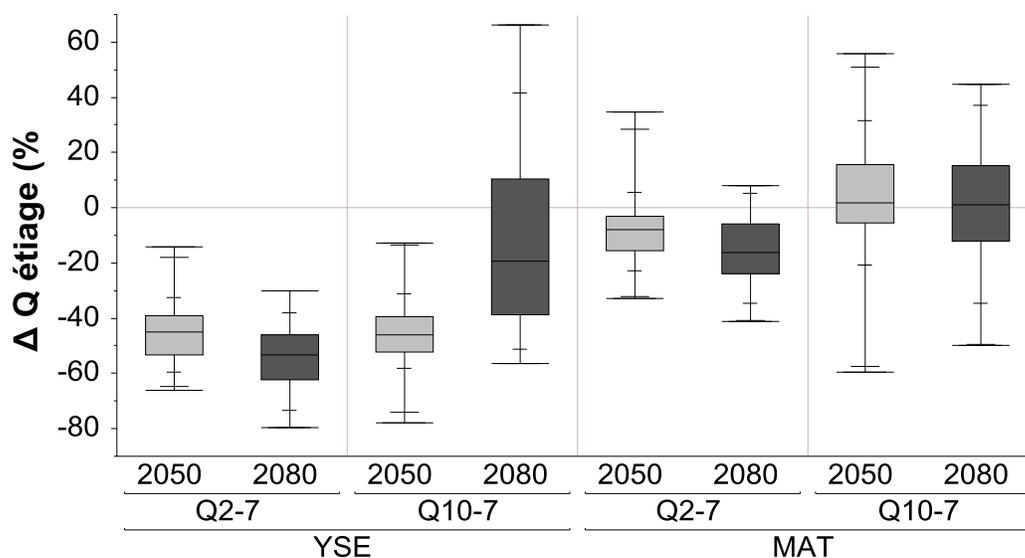


Figure 5.18 Dérives des débits d'étiage Q_{2-7} et Q_{10-7} pour les rivières Yamaska Sud-Est et Matane pour les horizons 2050 et 2080.

Tableau 5.3 Débits d'étiage observés (m^3/s) sur la Yamaska Sud-Est et la Matane pour la période 1971-2000

	Q2-7	Q10-7
YAMASKA SE	0,126	0,042
MATANE	6,739	4,622

5.2.2.4. Journée à mi-volume de la période de février à juin

Tant pour la rivière Yamaska Sud-Est que pour la rivière Matane, aux horizons 2050 et 2080, les modèles climatiques prédisent tous un devancement de la crue printanière (Figure 5.19). Pour la Yamaska Sud-Est, ce devancement est de l'ordre de 10 ± 5 jours et de 13 ± 6 jours pour les horizons 2050 et 2080 respectivement. Le devancement est de 12 ± 9 jours pour l'horizon 2050 et de 22 ± 6 jours pour l'horizon 2080 sur la rivière Matane.

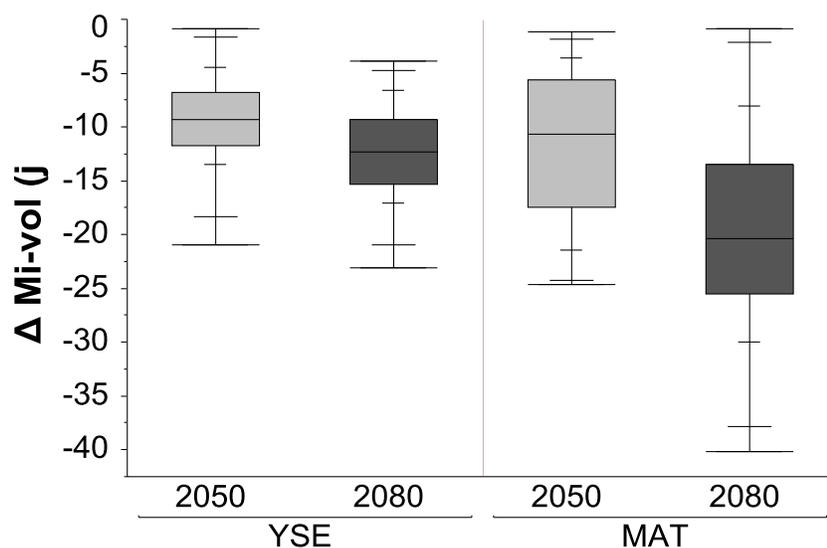


Figure 5.19 Journée à mi-volume de la période février à juin pour les rivières Yamaska Sud-Est et Matane pour les horizons 2050 et 2080.

5.2.2.5. Synthèse

Les projections climatiques futures s'accordent généralement bien avec les tendances observées au cours de la période de référence (1971-2000) (Tableau 5.4). Les tendances à la baisse observées au niveau des précipitations pour la région de la Yamaska Sud-Est, *a priori* contradictoires aux dérives climatiques positives pour les horizons 2050 et 2080, ne s'avèrent pas significatives, ce qui impute un niveau de confiance insuffisant à cette évaluation. Il est également à noter que les modèles climatiques prévoient une hausse des débits moyens de la rivière Matane alors qu'une tendance à la baisse (non-significative) a plutôt été observée entre 1971 et 2000.

Ces modifications dans le régime de températures et de précipitations et incidemment dans le régime des débits auront nécessairement des impacts sur la dynamique des rivières en climat futur. Ces impacts seront différents selon la région du Québec observée. Par exemple, l'augmentation des températures et des précipitations prévue aux horizons 2050 et 2080 entraîne une diminution de la quantité d'eau transitant par la Yamaska Sud-Est (baisse du

débit moyen) alors que des tendances similaires de températures et de précipitations mènent plutôt à une augmentation du débit moyen pour la rivière Matane aux horizons 2050 et 2080. Dans ce cas-ci, les variations de température, et par conséquent d'évapotranspiration, pourraient être à l'origine des réponses différentes dans les deux bassins versants.

Pour ce qui est des débits de crue, la tendance varie selon la saison examinée. Dans le cas de la Yamaska Sud-Est, les débits de crue associés à la crue printanière sont appelés à diminuer légèrement, en raison d'un couvert de neige accumulée moins important, mais les débits de crue d'été et d'automne sont appelés à augmenter de façon significative, ce qui pourrait entraîner des inondations plus importantes et plus fréquentes au cours de cette période de l'année. Pour la rivière Matane, bien que l'on prévoie une augmentation des débits de crue d'été et d'automne, la diminution des débits de crue printaniers, en raison d'un stock de neige moins important au cours de l'hiver, ont une plus grande influence sur les débits de crue annuels qui sont par conséquent également appelés à diminuer. Ces différences entre la Yamaska Sud-Est et la Matane, malgré des projections climatiques futures similaires pour les deux régions, soulignent l'importance de facteurs autres que le climat dans l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur le régime hydrologique des rivières, notamment la taille des bassins versants de ces rivières.

Dans le cas de la rivière Matane, comme pour les deux autres cours d'eau à l'étude dans le cadre de ce projet, il convient de noter que la gamme des débits de crues futurs projetés demeure très large, faisant état d'une incertitude importante quant aux changements réels à prévoir. Bien que la médiane de l'ensemble (indication de la tendance lourde des projections) révèle une tendance à la baisse des débits de récurrences 20 et 100 ans pour la rivière Matane, il n'en demeure pas moins que plusieurs sources d'incertitude n'ont pas été abordées dans le cadre de ce projet (incertitude relative à la méthode de mise-à-l'échelle des projections climatiques; au modèle hydrologique et son mode de calage – seul HSAMI a été utilisé –, ainsi qu'au modèle statistique Pearson III utilisé pour générer les débits de crue). L'incertitude est à ce point importante que l'analyse des indicateurs Q_{20} et Q_{100} en devient très délicate. Il n'est ainsi pas improbable d'envisager qu'une autre étude d'impact des changements climatiques sur les débits de la rivière Matane, utilisant des paramètres différents, puisse générer une tendance différente (c.-à-d. à la hausse) des débits futurs. Une telle évaluation n'a toutefois pas été possible dans le cadre de ce projet.

Les tendances concernant les débits d'étiage sont quant à elles plus nettes. La sévérité des étiages d'été est appelée à augmenter de façon importante, davantage sur la Yamaska Sud-Est que sur la Matane. Ces étiages plus sévères risquent d'avoir des conséquences non seulement sur les quantités d'eau en rivière, mais également sur la qualité de cette eau (température plus élevée de l'eau, plus forte concentration en polluants, etc.).

Les changements attendus dans le régime hydrologique des cours d'eau ont le potentiel de modifier non seulement la récurrence des inondations, mais également les superficies inondées associées aux fréquences 2, 20 et 100 ans. D'importants changements morphologiques pourraient également entraîner des modifications dans les espaces inondés. Les taux d'érosion pourraient aussi être appelés à changer. De tels scénarios ont été testés par le biais de modèles hydrauliques et d'érosion des berges.

Tableau 5.4 Synthèse des variables climatiques et hydrologiques examinées

	YAMASKA SUD-EST				MATANE			
	1971-2000		Dérives climatiques futures		1971-2000		Dérives climatiques futures	
	Moyenne	Tendance	2050	2080	Moyenne	Tendance	2050	2080
Température moyenne annuelle (°C)	5,7	↑	2,5 °C	3,6 °C	1,8	↑	2,5 °C*	3,8 °C*
Précipitations totales (mm)	1218	↓	7,9 %	11,3 %	1077	↑	10,5 %	14,8 %
Précipitations liquides :								
Précipitations solides (décembre à mars) (%)	56,7	↑	83,8 %	150,5 %	13,7	↑	108,4 %	183,8 %
P max sur 24 h (mai à octobre) (mm)	42,5	↓	11,1 %	17,2 %	36,4	↑	10,4 %	11,0 %
Débit moyen (m ³ /s)	4,4	↓	-1,3 %	-0,6 %	39,7	↓	5,7 %	8,0 %
Débits de crue annuels (m ³ /s)	Médiane				Médiane			
Q ₂	69,8		6,8 %	3,9 %	389,7		1,8 %	2,4 %
Q ₂₀	120,0		8,9 %	12,0 %	683,4		-6,8 %	-5,6 %
Q ₁₀₀	146,1		9,4 %	20,5 %	837,6		-8,2 %	-5,9 %
Débits d'étiage d'été (m ³ /s)								
Q ₂₋₇	0,126		-45 %	-53 %	6,739		-7,8 %	-16,4 %
Q ₁₀₋₇	0,042		-46 %	-19 %	4,622		2,4 %	1,2 %
Mi-volume ₂₋₆ (jours)	101 ^e		10 j	13 j	131 ^e		12 j	22 j

5.2.3. Impacts des changements climatiques sur la mobilité

5.2.3.1. Simulation 1 - Ruisseau North Branch

La première modélisation est effectuée sur un secteur dynamique du ruisseau North Branch. La figure 5.20 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 alors que l'amplitude simulée atteint 98 m. 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 ainsi qu'aux limites du modèle utilisé.

Une deuxième simulation est produite en utilisant un débit augmenté de 10 %. Cette augmentation de 10 % correspond approximativement à l'augmentation prévue pour les Q_{20} pour les horizons 2050 et 2080 dans le bassin-versant de la Yamaska Sud-Est. La figure 5.21 présente les tracés fluviaux des simulations avec augmentation de débit en comparaison avec la simulation en débit actuel. 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, mais une augmentation de 4 % de l'amplitude du corridor de mobilité.

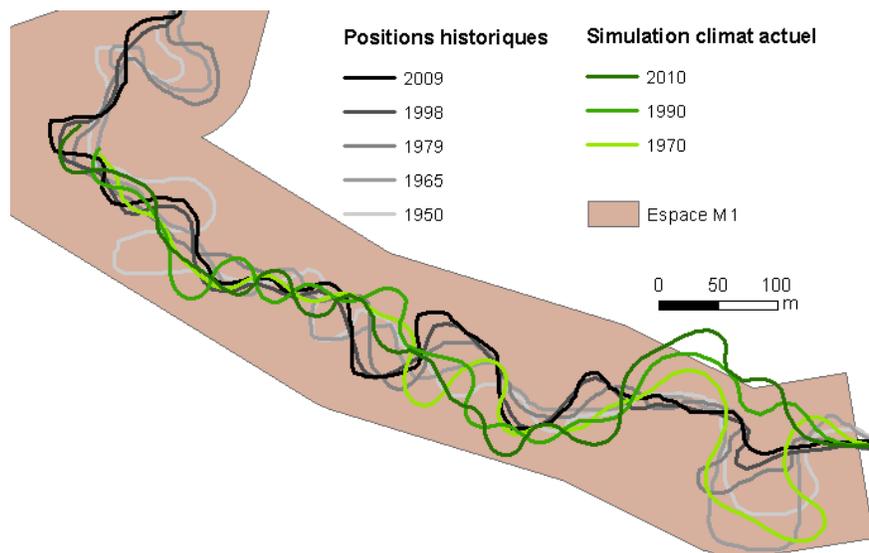


Figure 5.20 Comparaison des positions historiques du chenal et des positions obtenues par la simulation en climat actuel.

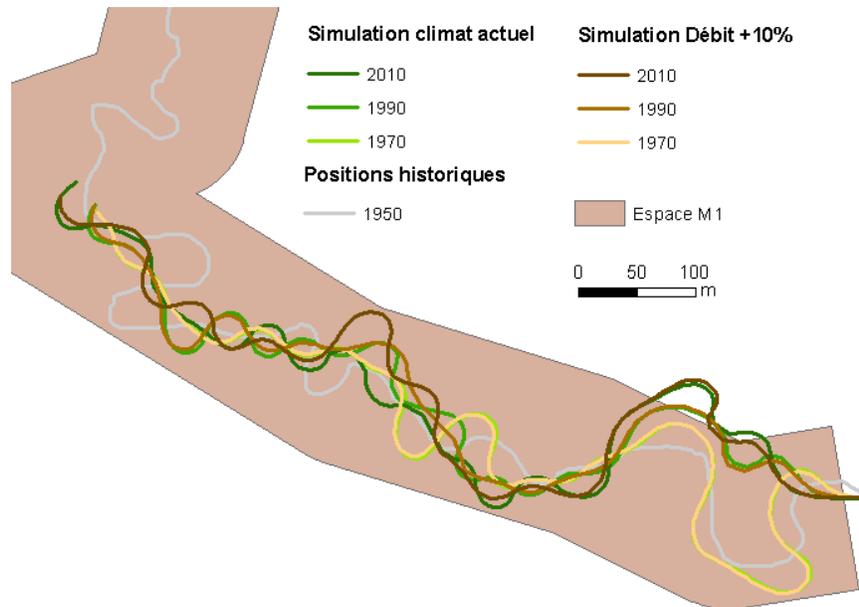


Figure 5.21 Comparaison des positions du chenal obtenues par la simulation en climat actuel et la simulation avec un débit augmenté de 10 %.

Dans le cas d'un système alluvial comme celui du ruisseau North Branch, l'amplitude du corridor de mobilité sur le tronçon modélisé est principalement contrôlée par les recoupements de méandres. Ces derniers empêchent en effet le développement de méandres complexes, et des simulations non présentées dans ce document montrent que l'amplitude du corridor de mobilité est très sensible au seuil de recoupement des méandres (fixé pour les simulations présentées ici à deux fois la largeur du chenal). 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. À long terme, la simulation en débit augmentée devrait montrer une augmentation du taux d'érosion moyen, mais cette tendance ne peut être observable sur la courte durée de la simulation effectuée.

À la lumière de ces résultats, puisque l'espace de mobilité M2 cartographié est déterminé par l'amplitude des méandres et le confinement par les terrasses ou murs de vallées, il est estimé que la cartographie de l'espace M2 est peu sensible aux changements climatiques. La cartographie de l'espace de mobilité est par conséquent robuste et peut être utilisée dans un contexte de changements climatiques. Pour les mêmes raisons, la distinction entre les tronçons peu dynamiques et 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 de mobilité M1, sera également peu affectée par les changements climatiques.

5.2.3.2. Simulation 2 - Rivière Matane

La deuxième simulation, 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 5.22 montre l'évolution historique de la zone simulée 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 5.22. 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 contraint dans les simulations, en raison de l'enrochement existant à cet endroit. À cet endroit, les simulations montrent une augmentation maximale de 8,5 % de la contrainte de cisaillement suite à l'augmentation du débit. Les simulations sont par ailleurs effectuées en contraignant la rivière sur la plaine alluviale. Malgré les différences importantes entre la simulation avec 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.

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 de mobilité M1. 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'incertitude sont intégrées dans cette méthodologie.

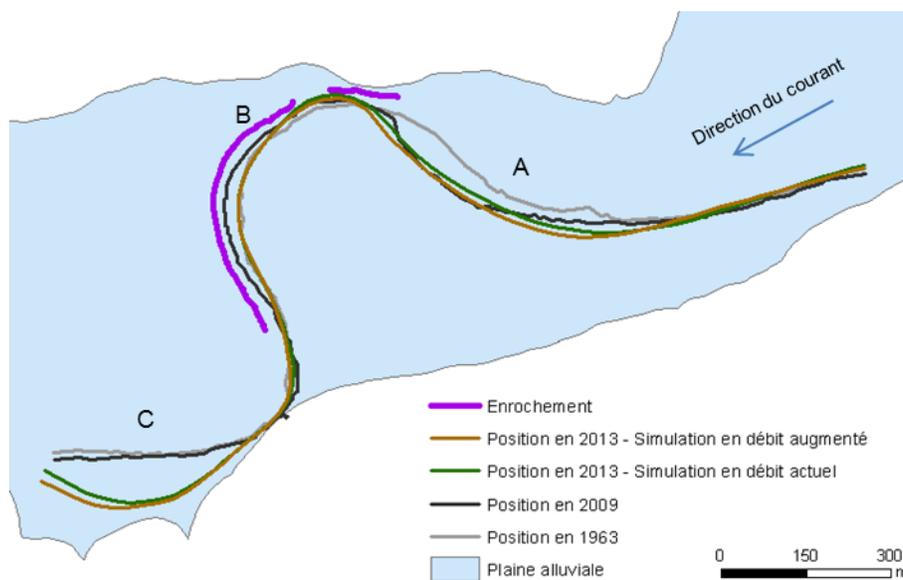


Figure 5.22 Résultats des simulations et comparaison avec les positions historiques de la rivière Matane.

Dans ce cas-ci, l'incertitude associée aux changements climatiques n'est pas majeure par rapport aux autres incertitudes de la méthode, et ne semble donc pas significativement modifier la cartographie de l'espace M1. Il convient cependant d'insister à nouveau sur le fait que la cartographie de la mobilité à court terme, représentée par l'espace M1, est une cartographie établie au meilleur des connaissances actuelles, mais qui demeure malgré tout approximative.

Au-delà des modifications aux dynamiques d'érosion révélées par les deux modélisations effectuées, il est possible que les changements climatiques engendrent des modifications géomorphologiques plus fondamentales. Une modification du débit morphogène pourrait 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 d'accumulation qui est difficilement prévisible. Dans les simulations avec RVR Meander, seule une légère augmentation de la longueur d'onde (2,4 %) a été notée, mais cela peut s'expliquer par une période de simulation (60 ans) trop courte pour que la longueur d'onde d'équilibre soit atteinte. L'augmentation des contraintes de cisaillement, suggérée 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.*, 2011).

Des changements dans l'utilisation du sol, par l'urbanisation en particulier, pourraient également modifier l'hydrologie et la morphologie des rivières dans un avenir proche. La signature hydrologique des changements environnementaux dans le bassin versant peut être plus significative que celle liée aux changements climatiques. Dans ce contexte, l'implémentation d'un corridor de mobilité protégé correspondant à l'espace de mobilité M2, dont la robustesse aux changements climatiques est élevée, semble une mesure de mitigation minimale pour tenir compte d'un ensemble de changements environnementaux possibles.

5.2.4. Impacts des changements climatiques sur l'inondabilité

L'impact des changements climatiques sur les zones d'inondabilité est examiné à l'aide d'une analyse de sensibilité des simulations numériques HEC-RAS pour une fourchette de débits, d'abord en ce qui a trait aux surfaces inondées, et ensuite aux changements de profondeur et de vitesse associés à des changements de débit.

5.2.4.1. *Robustesse de la cartographie hydrogéomorphologique*

La cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables mène à l'identification des espaces inondables N1, N2 et N3. Les espaces N1 et N2 comprennent en partie les zones inondées par les débits de récurrence 20 et 100 ans (rivière Matane). L'analyse de robustesse

évalue dans quelle mesure les limites d'inondations dépassent N1 et N2 lorsque les zones 0-20 ans et 20-100 ans sont produites avec les débits incrémentés dans HEC-RAS. Les superficies des espaces N1 et N2 sont soustraites des superficies produites dans HEC-RAS afin de quantifier les surfaces excédantes qui correspondent aux modifications anticipées dans les limites d'inondations suite aux changements climatiques. La figure 5.23 illustre les étapes du calcul des surfaces excédantes et souligne la raison pour laquelle les valeurs de surfaces excédantes pour les débits actuels peuvent être positives. La figure 5.23A montre les limites de la cartographie hydrogéomorphologique alors que la figure 5.23B présente la surface inondée produite par HEC-RAS pour les conditions actuelles (incrément 0) sur le site de la rivière Yamaska Sud-Est. La figure 5.23C montre la surface inondée additionnelle obtenue en soustrayant la plaine hydrogéomorphologique (encadré A) à la surface modélisée (encadré B). Cette surface additionnelle provient de la nature de l'encaissant du secteur modélisé, comme l'illustrent la figure 5.23D et la figure 5.23E.

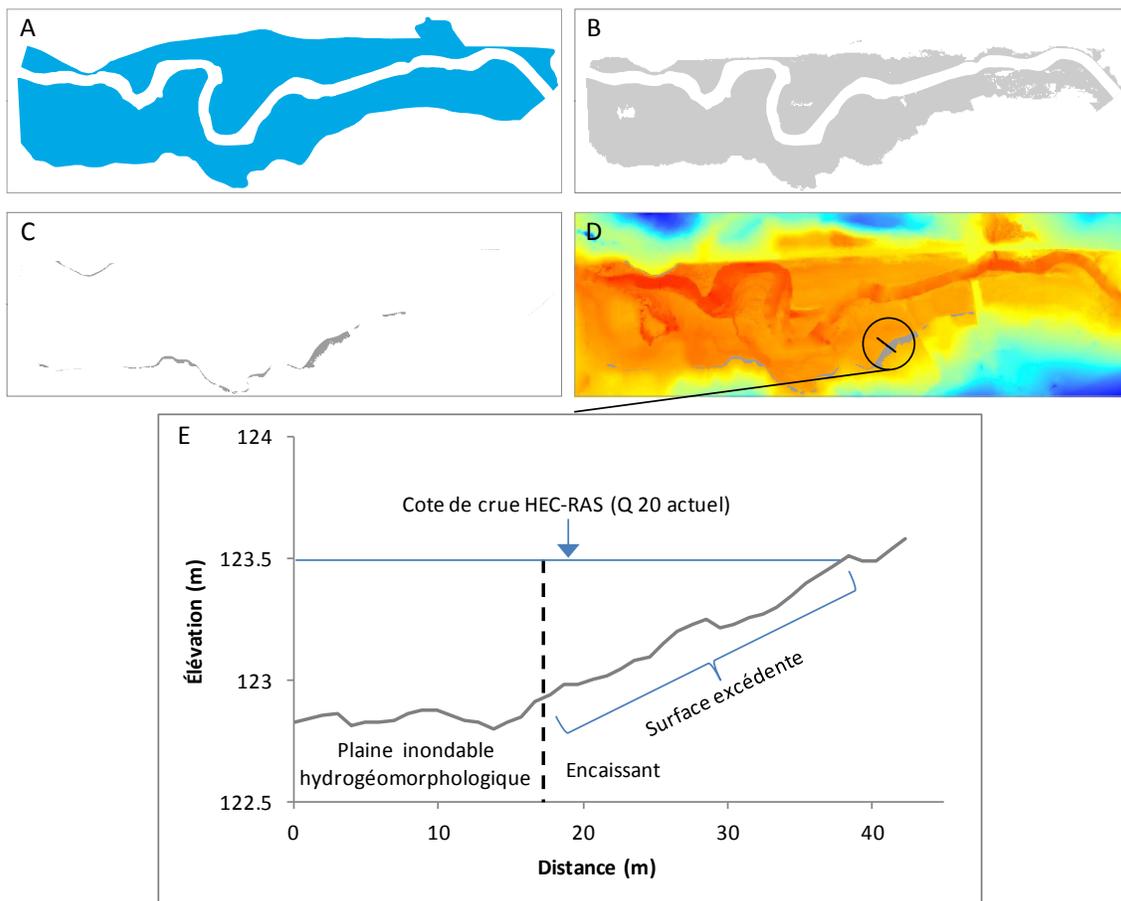


Figure 5.23 Méthodologie du calcul de la surface inondée additionnelle. A) Plaine cartographiée avec la méthode hydrogéomorphologique; B) modélisation de la surface inondée avec HEC-RAS pour le Q_{20} actuel; C) surface inondée additionnelle; D) position du profil topographique et E) profil topographique.

La figure 5.24 présente l'augmentation de la superficie inondée en dehors de la zone cartographiée avec la méthode hydrogéomorphologique en fonction de la dérive des débits projetés pour les horizons 2050 et 2080. Pour simplifier la comparaison entre les trois cours d'eau, les superficies inondées sont exprimées en pourcentage de différence entre la cartographie hydrogéomorphologique et la cartographie simulée alors que les débits sont exprimés en pourcentage de différence entre les débits actuels et les débits incrémentés utilisés pour les simulations. Pour les trois rivières, la superficie inondée additionnelle est inférieure à 5 % pour les tendances centrales 2080. Par contre, les superficies additionnelles croissent plus rapidement pour la rivière Matane par rapport aux rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est.

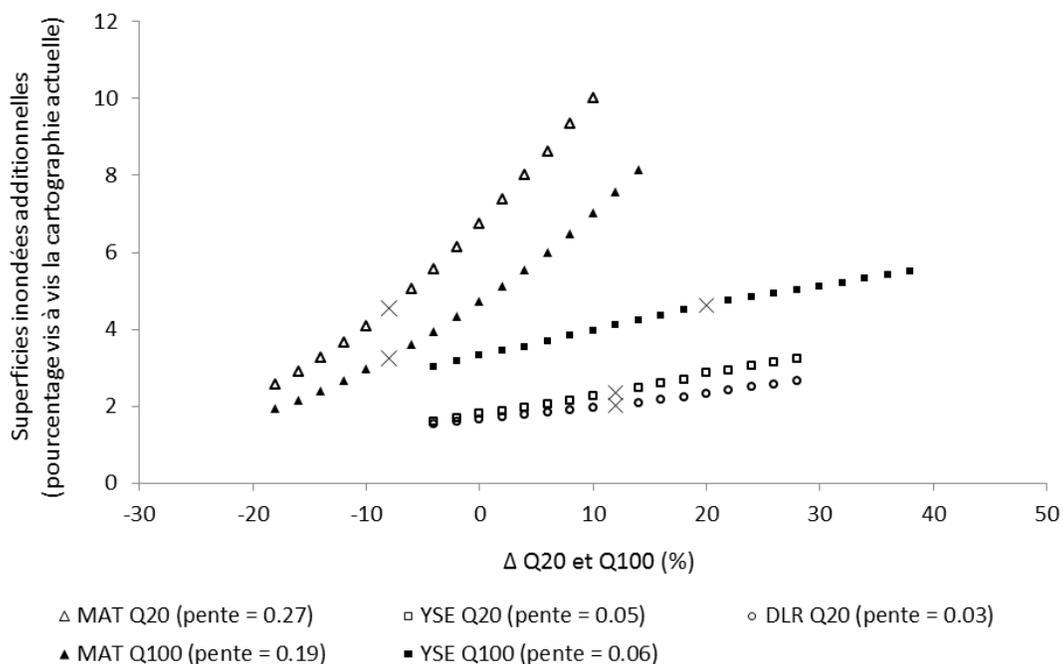


Figure 5.24 Superficies inondées additionnelles en pourcentage par rapport à la cartographie en climat actuel selon la dérive des débits projetés par les changements climatiques. Les valeurs de débits incrémentés couvrent l'étendue entre le 10^e et le 90^e percentile des dérives projetées pour les horizons 2050 et 2080 (écart maximal pour les deux périodes) et 'X' est le 50^e percentile associé à l'horizon 2080.

Les changements anticipés dans les superficies inondées par rapport au climat actuel sont avant tout le reflet des décisions dans l'attribution des niveaux d'inondations pour chaque rivière (N1; N2; N3). Pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, cette augmentation est associée aux inondations qui excèdent les limites de la plaine inondable hydrogéomorphologique et qui submergent l'encaissant. L'encadré E de la figure 5.23 montre un profil topographique d'un encaissant submergé. La relation entre les superficies inondées additionnelles et l'augmentation du débit est surtout fonction de la forme et de la pente de

l'encaissant de la plaine inondable. Un encaissant à faible pente fera en sorte que la superficie inondée augmentera rapidement avec l'augmentation du débit tandis qu'un encaissant à pente forte fera en sorte que l'augmentation du débit occasionnera plutôt une augmentation de la profondeur et de la vitesse de l'eau. L'augmentation linéaire de la superficie inondée est liée au fait que la pente de l'encaissant est constante et que l'eau n'atteint pas de nouvelles surfaces. Aussi, la modélisation hydraulique suggère des erreurs de cartographie là où certaines surfaces sont en fait visiblement inondées sous les conditions actuelles de débit de récurrence 20 et 100 ans. Pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, la robustesse (faible pente de la relation et faible valeur de pourcentage) est plus élevée parce que la plaine inondable est relativement simple, avec des terrasses bien définies qui définissent le champ d'activité fluviale pour une gamme de crues.

Pour la rivière Matane, l'analyse compare plus directement les étendues inondées par les cotes 20 et 100 ans en fonction de la dérive des débits projetés puisque la cartographie en climat actuel repose, en partie, sur la délimitation des zones 0-20 ans et 20-100 ans du CEHQ (MENV, 1989, 2004). Le cas de la rivière Matane montre que les variations de débits projetées pour les cotes de crues 20 et 100 ans ont des impacts plus substantiels sur les limites de la cartographie lorsque l'on augmente dans les percentiles des débits dérivés. À une dérive nulle des débits, les superficies inondées sont supérieures (4 à 6 %) aux cotes de crues 20 et 100 ans auparavant identifiées par les cartes produites par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec. Cet écart s'explique en partie par les changements déjà observés dans les conditions hydrologiques et morphologiques entre les deux périodes pour lesquelles la modélisation hydraulique a été produite. Dans le scénario le plus pessimiste (90^e percentile), la croissance des superficies inondées reste toutefois limitée à 10 % par rapport aux surfaces déjà identifiées par la cartographie HGM en climat actuel.

Au Québec, quelques études ont tenté de caractériser les impacts des changements climatiques sur les plaines inondables (Laforce, 2008; Simard, 2008; Laforce *et al.*, 2011). Laforce (2008) montre notamment que les superficies des zones inondées pour la rivière du Nord à Lachute varient entre une diminution de 17,2 ha (19,8 %) et une augmentation de 12,3 ha (14,2 %) pour les débits de récurrence 100 ans pour l'horizon 2080. Tous soulignent que l'incertitude dans ces chiffres émane de la variabilité dans la modélisation hydroclimatique. En comparaison, les augmentations attendues pour les rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane sont moins importantes et moins variables.

Cette analyse de la robustesse de la cartographie de l'espace d'inondabilité ne considère pas la spatialité des différences de surfaces inondées observées. Pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, les tronçons modélisés couvrent de petites superficies (longueurs) et il est possible que la distribution spatiale des différences soit relativement homogène. Pour la rivière Matane, cependant, comme le tronçon modélisé couvre une superficie (longueur) plus grande et que les formes observées dans la plaine inondable sont plus variables, il est possible que la distribution spatiale des différences soit plus hétérogène.

5.2.4.2. Sensibilité des vitesses d'écoulement et des profondeurs

L'analyse de sensibilité évalue dans quelle mesure les variables de vitesse et de profondeur sont affectées par les changements projetés dans les débits de récurrence 20 et 100 ans, premièrement à partir d'une analyse des tendances centrales (médianes) et deuxièmement à partir d'une analyse des histogrammes de fréquence. La figure 5.25 et la figure 5.26 présentent respectivement les changements attendus dans la tendance centrale (médiane) associée aux variables vitesse d'écoulement et profondeur d'eau (les valeurs du chenal sont exclues). Pour chacun des sites modélisés, les changements attendus sont linéaires (régression linéaire de type 1). Pour la variable de vitesse d'écoulement, le site de la rivière Yamaska Sud-Est présente les valeurs les plus élevées par rapport aux rivières de la Roche et Matane, mais une sensibilité égale à la rivière Matane pour les débits de récurrence 20 ans. Les changements de vitesse projetés en fonction de la dérive des débits sont presque identiques, à l'exception de la rivière de la Roche qui présente une pente plus faible que les autres sites modélisés pour le débit de récurrence 20 ans. Pour la variable de profondeur d'eau, les valeurs médianes sont différentes d'un site à un autre (de la Roche < Matane < Yamaska Sud-Est), mais les pentes associées aux changements attendus en fonction de la dérive sont similaires. Dans le détail, la sensibilité des profondeurs d'eau (pente de la relation) est moindre pour la rivière de la Roche et plus élevée pour la rivière Matane.

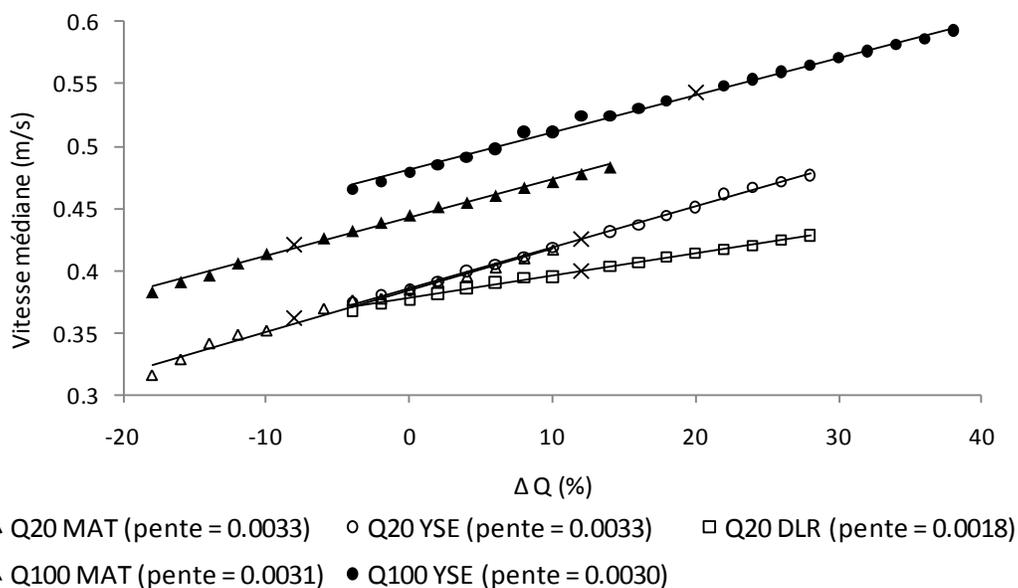


Figure 5.25 Sensibilité de la tendance centrale (médiane) des vitesses d'écoulement en fonction de la dérive des débits 20 et 100 ans. Les valeurs de débits incrémentés couvrent l'étendue entre le 10^e et le 90^e percentile des dérives projetées pour les horizons 2050 et 2080 (écart maximal pour les deux périodes) et 'X' est le 50^e percentile associé à l'horizon 2080.

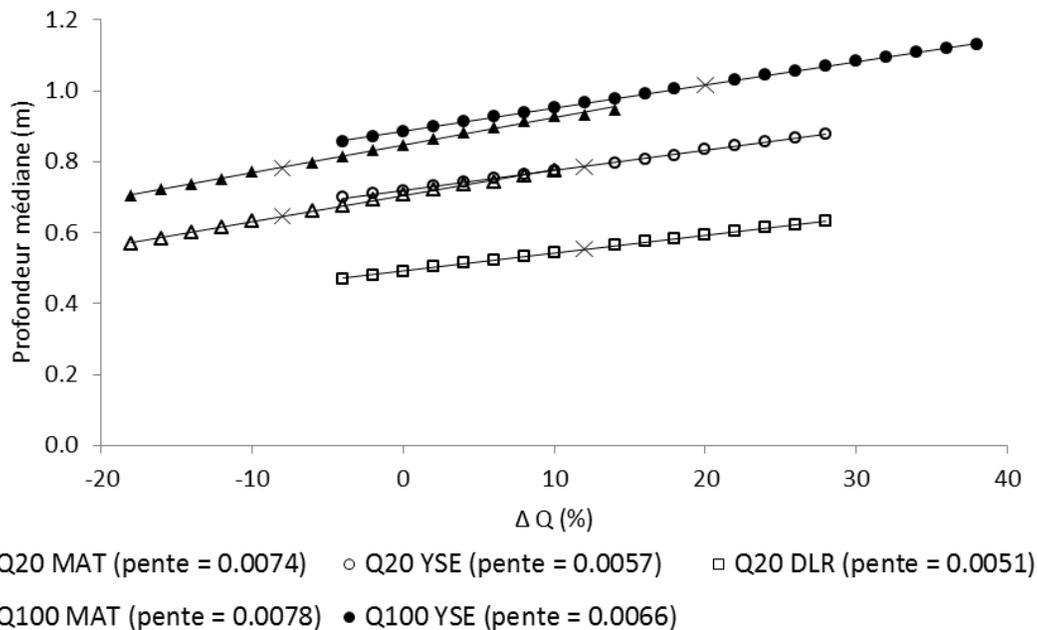


Figure 5.26 Sensibilité de la tendance centrale (médiane) des profondeurs d'écoulement en fonction de la dérive des débits 20 et 100 ans. Les valeurs de débits incrémentés couvrent l'étendue entre le 10^e et le 90^e percentile des dérives projetées pour les horizons 2050 et 2080 (écart maximal pour les deux périodes) et 'X' est le 50^e percentile associé à l'horizon 2080.

Les histogrammes de fréquence associés aux valeurs de vitesse et de profondeur sont agencés dans une matrice permettant d'évaluer leur évolution en fonction des débits (Figure 5.27 et Figure 5.28). Dans ces matrices, l'axe des y représente les classes de vitesse/profondeur, l'axe x représente la différence de débit par rapport aux conditions actuelles (0 est le débit actuel) et l'axe des z représente la fréquence des observations convertie en valeur de superficie de plaine inondable (m²). Des lignes en pointillé sont ajoutées sur les figures pour identifier les 10^e et 90^e percentiles des simulations hydroclimatiques des horizons 2050 et 2080, pour chacune des rivières. Des valeurs associées à l'intensité de l'aléa sont également positionnées sur les matrices. Pour la variable de vitesse, une valeur de 1 m/s marque le seuil à partir duquel les interventions de secours nécessitent des véhicules motorisés (Vinet, 2010). Pour la variable de profondeur, une valeur de 0,5 m marque le seuil à partir duquel le déplacement d'une personne ou d'un véhicule est sévèrement contraint (indépendamment de la vitesse d'écoulement).

Les matrices de distributions de fréquence associées à la vitesse et à la profondeur pour les rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane (20 et 100 ans) présentent toutes des variations linéaires en fonction des décalages attendus dans les débits. Par contre, les matrices montrent que l'étendue des valeurs de vitesse et de profondeur augmente progressivement de la rivière de la Roche à la Yamaska Sud-Est et de la Yamaska Sud-Est à la Matane. Pour la rivière Matane, la faible démarcation de la tendance centrale dans les valeurs de profondeurs est en partie liée à la taille du site modélisé. De l'amont à l'aval du site, l'aire de drainage du bassin versant est presque doublée, ce qui explique que la profondeur d'eau varie davantage et que la tendance centrale se démarque peu. Cette

variabilité reflète aussi en partie une topographie de plaine inondable plus irrégulière, marquée par une morphologie de crêtes et de sillons, de méandres abandonnés et de dépressions d'origines diverses. Cette irrégularité est liée à des stades différents d'inondation et donc à une plus grande variabilité dans les valeurs de profondeur. En comparaison, pour les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, la tendance centrale est plus démarquée due à une topographie plus homogène qui est conséquemment inondée de façon plus synchrone. Dans tous les cas, le seuil de 0,5 m identifié comme un seuil de risque pour les déplacements est très fréquemment franchi, indépendamment des dérives de débits projetés.

L'irrégularité topographique de la rivière Matane est également associée à des dépressions basses isolées du chenal et qui sont inondées par des eaux stagnantes. Cette situation explique la présence d'un pic dans la distribution des valeurs de vitesse situé à 0 m/s, surtout à faible débit, lorsque les inondations sont peu connectées en surface. La présence croissante de vitesses élevées entre le site de la rivière de la Roche et de la Yamaska Sud-Est et entre le site de la Yamaska Sud-Est et de la Matane est associée à une pente de plus en plus élevée entre les sites. L'impact de ces valeurs fortes apparaît par une fréquence plus élevée de circonstances où le seuil de vitesse de 1 m/s (associé aux capacités d'interventions) est franchi. En raison de sa faible pente, ce seuil n'est jamais atteint sur la rivière de la Roche, indépendamment de la dérive des débits projetés. Par ailleurs, l'impact de ces valeurs fortes sur la morphogénèse est évident en climat actuel par la représentation croissante de formes d'érosion sur la plaine inondable entre les sites (chenaux de débordement, érosion de talus, remaniement de surface). Il est donc possible de faire l'hypothèse que la croissance des valeurs maximales de vitesse d'écoulement puisse avoir également un impact morphologique substantiel dans les systèmes à plus forte pente où un seuil associé à la mobilisation des sédiments et à l'érosion est franchi plus fréquemment.

5.2.5. Impacts des changements climatiques sur l'espace de liberté

En combinant les analyses de sensibilité sur la mobilité et l'inondabilité, il est possible de conclure que la cartographie de l'espace de liberté est robuste et que les zones prioritaires définies (L1 et L2) ne changeront pas significativement en climat futur. En effet, une augmentation de 10 % des débits n'a pas d'impact majeur sur l'espace de mobilité tel que simulé par le logiciel RVR Meander. Ces simulations ont souligné les ajustements morphologiques dans la progression des méandres et dans les zones d'érosion localisées, mais ces changements produisent des tracés fluviaux qui demeurent dans l'enveloppe délimitée par les espaces de mobilité. En ce qui a trait à l'espace d'inondabilité, les changements dans les surfaces inondées sont somme toute assez restreints et majoritairement contenus dans les limites hydrogéomorphologiques proposées, même avec une fourchette de débits Q_{20} et Q_{100} assez large (de -20 % à 40 % en comparaison avec les débits Q_{20} et Q_{100} actuels). Cette fourchette de débits permet de bien cerner les changements anticipés sur la rivière Matane. En effet, une baisse du débit de récurrence 20 ans et 100 ans est prévue lorsqu'on analyse le signal à l'échelle annuelle, alors qu'une hausse des débits est anticipée pour les crues estivales et automnales, selon l'analyse hydroclimatique effectuée dans le cadre de ce projet.

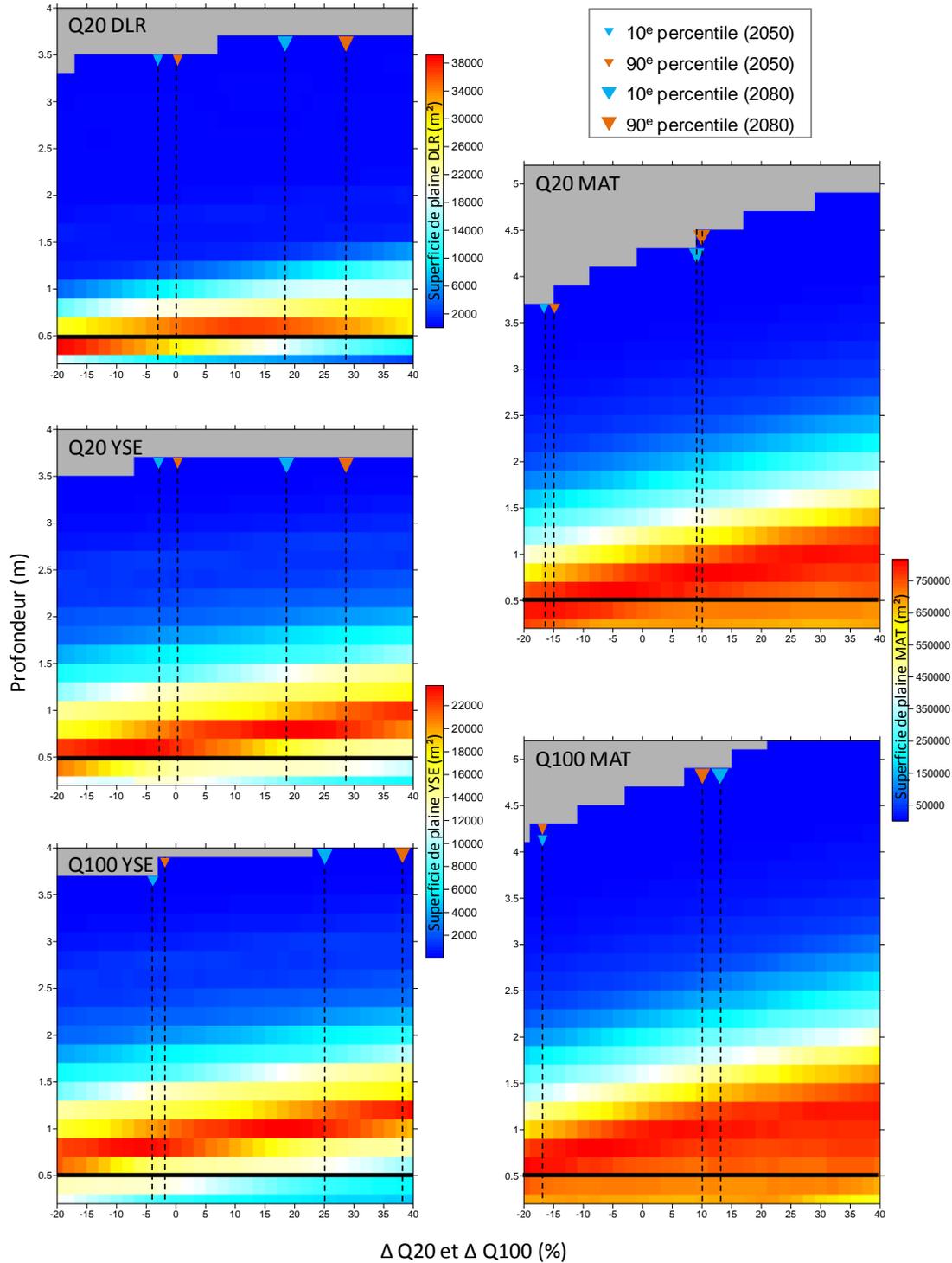


Figure 5.27 Matrices d'histogrammes de fréquences des profondeurs d'eau observées, converties en superficies de la plaine (m²), en fonction de la dérive des débits projetés par les changements climatiques.

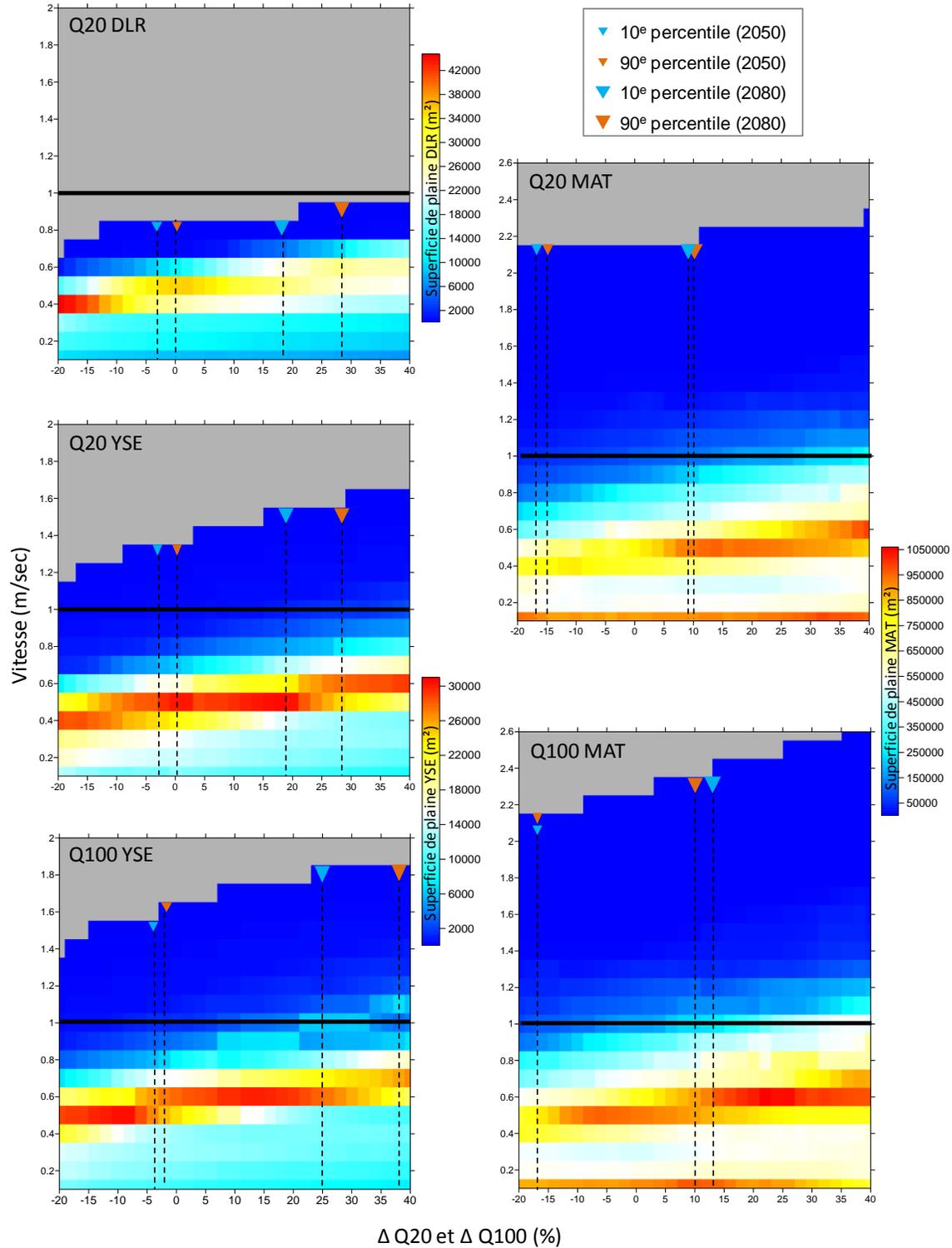


Figure 5.28 Matrices d'histogrammes de fréquences des vitesses d'écoulement observées, converties en superficies de plaine (m^2), en fonction de la dérive des débits projetés par les changements climatiques.

L'analyse de sensibilité de l'inondabilité est faite en comparant directement les zones d'inondabilité définies par l'approche hydrogéomorphologique N1 et N2 et celles définies par la modélisation des zones de récurrence 0-20 ans et 20-100 ans, respectivement. Puisque les zones modélisées ne sont pas totalement incluses dans les zones N1 et N2, il est possible d'observer une augmentation des superficies inondées même dans les scénarios où le débit diminue (Figure 5.24). Toutefois, les taux d'augmentation des surfaces inondées avec l'augmentation des débits demeurent faible dans le cas de la rivière de la Roche et Yamaska Sud-Est, ce qui implique des changements minimes dans les limites des zones L1 et L2 en cas de débits plus élevés à l'avenir. Ces taux sont toutefois plus élevés pour la rivière Matane, ce qui indique que les limites entre les zones L1 et L2 pourraient possiblement être affectées en climat futur, bien que la tendance observée par les modèles climatiques soit plutôt une diminution qu'une augmentation des débits.

Les analyses de sensibilité ont été réalisées individuellement, c'est-à-dire que nous avons d'une part évalué la sensibilité des changements morphologiques favorisant la mobilité et d'autre part la sensibilité des zones inondables aux changements de débits. Or, dans la réalité les changements morphologiques et les inondations surviennent en concomitance. Il est en fait très probable que des ajustements morphologiques à la section transversale surviennent en même temps que les débits évoluent sur les horizons 2050 et 2080. Par exemple, si les débits augmentent, il est fort probable que l'aire des sections transversales augmentera aussi pour refléter l'augmentation de débit. De telles relations sont cependant assez complexes et peuvent dépendre fortement de la trajectoire morphologique du cours d'eau (Biron *et al.*, 2013). Ici, l'analyse de sensibilité des zones inondables ne tient pas compte des ajustements morphologiques potentiels aux sections transversales, or il serait possible de réaliser une telle analyse. Cette dernière permettrait de mieux évaluer la robustesse des espaces de liberté définis dans le cadre de ce travail. Il nous semble qu'une telle analyse confirmerait la robustesse de la démarche hydrogéomorphologique.

En somme, à la lumière de ces analyses de sensibilité, la cartographie de l'espace de liberté nous semble assez robuste pour s'appliquer dans une gestion à long terme pour les trois rivières à l'étude.

5.3. Connectivité entre la rivière et la nappe

5.3.1. Cas de la rivière de la Roche

5.3.1.1. Analyse des milieux humides

Les deux milieux humides à l'étude sur la rivière de la Roche ont été identifiés comme des marécages riverains (cf. Moisan, 2011). L'analyse a non seulement permis d'identifier les espèces végétales présentes dans ces deux milieux, mais également de les délimiter de façon plus précise que ce que pouvait offrir les cartographies effectuées à partir de photographies aériennes.

Le milieu humide A est divisé en sept zones de végétation caractéristique des milieux humides, en plus d'une zone forestière. Les espèces d'arbres dominantes sont le frêne rouge

(*Fraxinus pennsylvanica*), l'érable à sucre (*Acer saccharum*), le noyer cendré (*Juglans cinerea*), le caryer cordiforme (*Carya cordiformis*), le frêne blanc (*Fraxinus americana*), le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*), le frêne noir (*Fraxinus nigra*) et l'érable à Giguère (*Acer negundo*). La strate arbustive est généralement peu représentée. Quant aux herbacées, les espèces principales sont la lysimaque nummulaire (*Lysimachia nummularia*), le carex (*Carex sp.*), la renouée de Virginie (*Persicaria virginiana*), la vigne à cinq folioles (*Parthenocissus quinquefolia*), la matteuccie fougère-à-l'autruche (*Matteuccia struthiopteris*), l'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea*), le pâturin (*Poa pratensis*), le fétuque (*Festuca rubra*), le laportéa du Canada (*Laportea canadensis*), et l'impatiante du Cap (*Impatiens capensis*).

Le milieu B est également divisé en sept zones de végétation. Les espèces d'arbres dominantes sont le tilleul d'Amérique (*Tilia americana*), l'orme d'Amérique (*Ulmus americana*), le frêne blanc (*Fraxinus americana*), l'érable argenté (*Acer saccharinum*), le frêne noir (*Fraxinus nigra*), le frêne rouge (*Fraxinus pennsylvanica*), le chêne à gros fruits (*Quercus macrocarpa*), l'érable noir (*Acer nigrum*) et l'érable à sucre (*Acer saccharum*). Les arbustes sont ici aussi peu présents. La strate herbacée est quant à elle principalement composée de renouée de Virginie (*Persicaria virginiana*), d'amphicarpe bractéolée (*Amphicarpaea bracteata*), d'onoclée sensible (*Onoclea sensibilis*), de lysimaque nummulaire (*Lysimachia nummularia*), de carex (*Carex sp.*), de matteucie fougère-à-l'autruche (*Matteucia struthiopteris*), d'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea*), et d'athyrie fougère-femelle (*Athyrium filix-femina*).

5.3.1.2. Niveaux d'eau

Il est intéressant d'analyser les fluctuations de niveaux d'eau dans le cours d'eau et dans les piézomètres à l'échelle des saisons ainsi qu'à l'échelle des événements de pluie. La figure 5.29 présente les données d'avril à octobre 2012. Il est à noter que les niveaux dans la rivière au milieu humide A sont estimés à partir des valeurs mesurées au milieu humide B avant le 21 juin, date à laquelle la sonde Solinst a été installée.

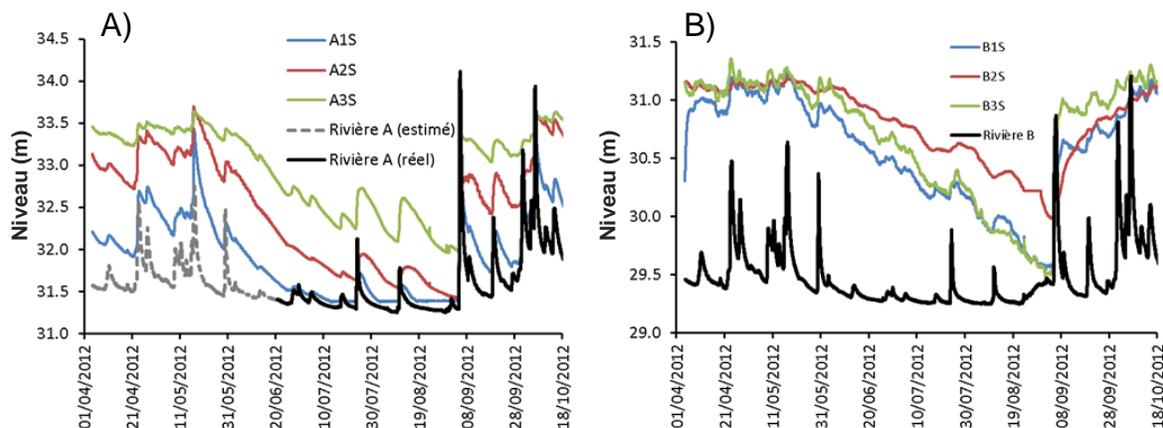


Figure 5.29 Variations des niveaux d'eau (élévation au-dessus du niveau de la mer) dans la rivière (ligne en noir) et dans les piézomètres d'avril à octobre 2012 pour le A) milieu humide A et B) milieu humide B (cf. Figure 4.13 pour la localisation des piézomètres).

Il ressort très clairement de la figure 5.29 que la nappe phréatique fluctue de façon synchrone avec le niveau de la rivière dans le milieu humide A, particulièrement pour les deux piézomètres les plus près du cours d'eau (A1S et A2S; cf. Figure 4.13 pour la position des piézomètres). À partir de juillet, les événements pluvieux importants créent une augmentation temporaire du niveau de la rivière au-delà du niveau des piézomètres A1S et A2S. L'inversion momentanée des gradients hydrauliques est également observée pour deux événements majeurs de l'automne (5 septembre et 6 octobre). Dans le milieu humide B, la réponse de la nappe aux variations de niveaux d'eau est nettement moins forte. Le niveau de la nappe baisse progressivement tout au long de l'été 2012 jusqu'à la pluie du 5 septembre qui engendre une hausse soudaine du niveau de la nappe, avec une montée jusqu'à 1,5 m au piézomètre B3S. Pour cet événement et pour l'événement du 6 octobre, les niveaux dans la rivière excèdent temporairement les niveaux dans les trois piézomètres. Ces résultats indiquent que la rivière est connectée plus dynamiquement à la zone riveraine au milieu humide A qu'au milieu humide B.

Le contraste dans la connectivité hydrologique entre les deux milieux humides apparaît aussi nettement dans l'analyse de corrélations croisées (Figure 5.30). Pour le milieu humide A, la corrélation est très forte (de 0,90 pour le piézomètre A1 à 0,77 pour le piézomètre A3) et le décalage entre le pic dans la rivière et dans les piézomètres est faible (de 6 à 21 heures). La corrélation maximale pour le milieu B est de 0,61, avec des valeurs de décalage de plus d'un ordre de grandeur plus élevé, allant jusqu'à 330 heures (Figure 5.30). Le décalage est plus court au milieu humide A, ce qui s'explique par les sédiments plus grossiers qui facilitent le transfert de l'onde de pression dans la zone riveraine.

Les résultats montrent que les corrélations pluie-niveaux (Figure 5.31) sont beaucoup plus faibles que les corrélations niveaux-niveaux. Ceci s'explique par une transformation importante du signal de pluie par son passage dans la zone non saturée. Les corrélations maximales pluie-niveaux piézométriques sont du même ordre de grandeur pour les deux milieux humides (maximum 0,09 au milieu humide A et 0,05 au milieu humide B).

Au milieu humide A, le décalage entre les niveaux dans la rivière et ceux dans les piézomètres est similaire à celui entre la pluie et les niveaux dans la rivière, et plus court que celui entre la pluie et les niveaux dans les piézomètres. Ceci indique que dans ce milieu humide, les niveaux dans la rivière ont réellement un effet sur les niveaux dans les piézomètres. La forme asymétrique du corrélogramme croisé niveau rivière-niveau piézomètres confirme que la première fonction joue un rôle direct sur la seconde (dans le cas où les deux fonctions seraient simultanément et indépendamment influencées par la précipitation, le corrélogramme croisé serait symétrique). Au milieu humide B, le décalage entre le signal de pluie et le niveau piézométrique est plus court que celui entre le niveau dans la rivière et le niveau piézométrique. Il n'est donc pas possible de conclure à une influence des variations de niveau dans la rivière sur les variations de niveaux dans les piézomètres.

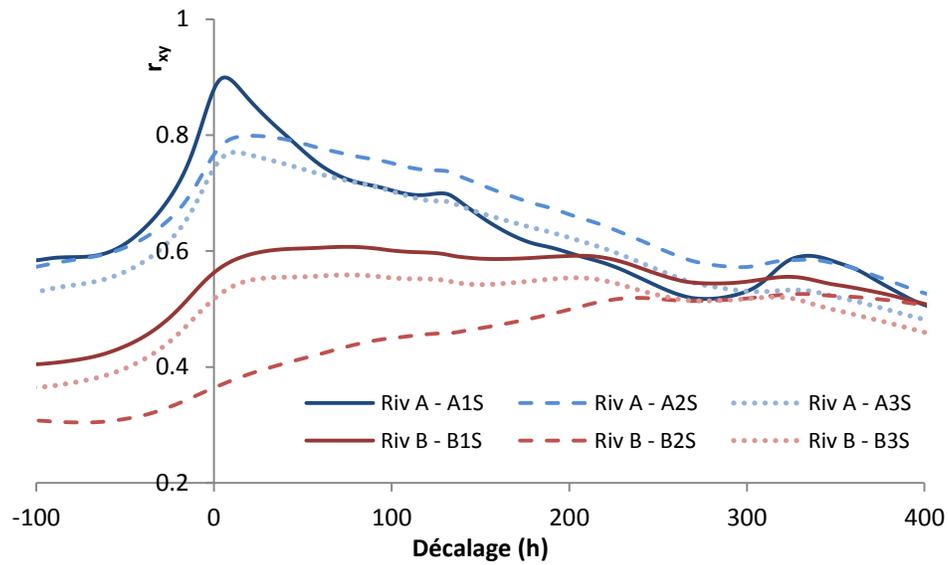


Figure 5.30 Correlations croisées entre le niveau dans la rivière et le niveau dans les trois piézomètres pour les milieux humides A et B en 2012.

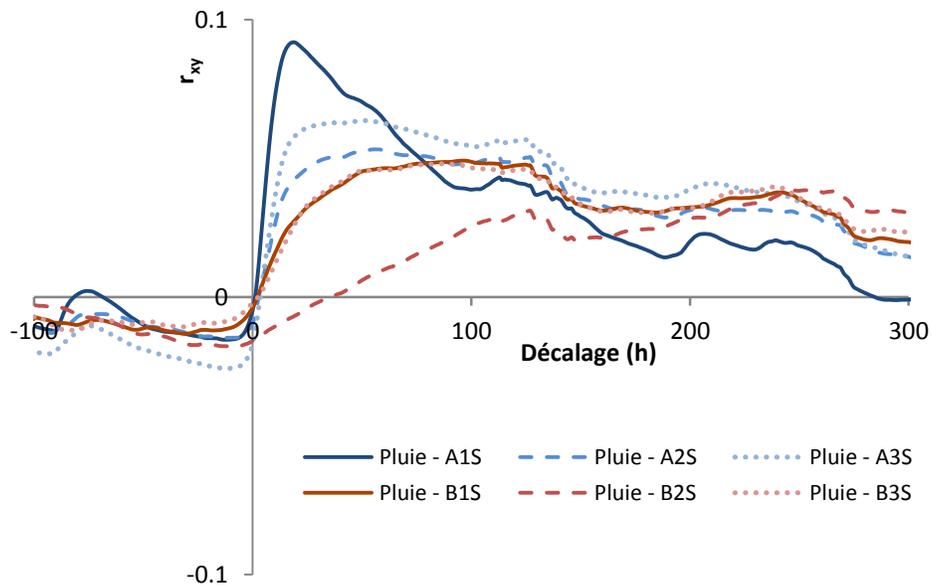


Figure 5.31 Correlations croisées entre les précipitations de Philipsburg et les niveaux d'eau dans la rivière et dans les piézomètres des deux milieux humides

Les températures dans les piézomètres dans les deux milieux humides varient peu au cours d'une année, avec des minima autour de 5 °C, généralement atteints en avril, et des maxima entre 13 °C et 14 °C atteints au début du mois d'octobre (Figure 5.32). Les variations observées suivent celles de la température de l'air au cours de l'année, sans changement marqué en lien avec les événements pluvieux (ceci a été confirmé par les analyses corrélatoires croisées - résultats non montrés dans ce document). La température de l'eau souterraine aux piézomètres est donc influencée par les variations à long terme de la température de l'air et ne subit pas l'influence des variations de niveau de la rivière.

À l'échelle des événements, le contraste est tout aussi apparent entre les deux milieux humides (Figure 5.33). En septembre, le niveau dans les trois piézomètres au milieu humide A monte très rapidement et décroît par la suite (Figure 5.33A) alors que le niveau des piézomètres au milieu humide B monte plus progressivement et continue de monter plusieurs jours après la pluie. On note aussi un plafonnement du niveau d'eau au milieu B qui indique un étalement de la crue (hydrogramme en forme d'aileron de requin, figure 5.33A) dans le marécage (ce comportement n'est pas observé au milieu humide A). Lors de la crue d'octobre, le niveau de la nappe demeure à peu près constant et au même niveau pour les trois piézomètres dans le milieu B, tandis que les niveaux fluctuent avec celui de la rivière et sont plus bas pour le piézomètre le plus près du cours d'eau dans le milieu humide A (Figure 5.33B).

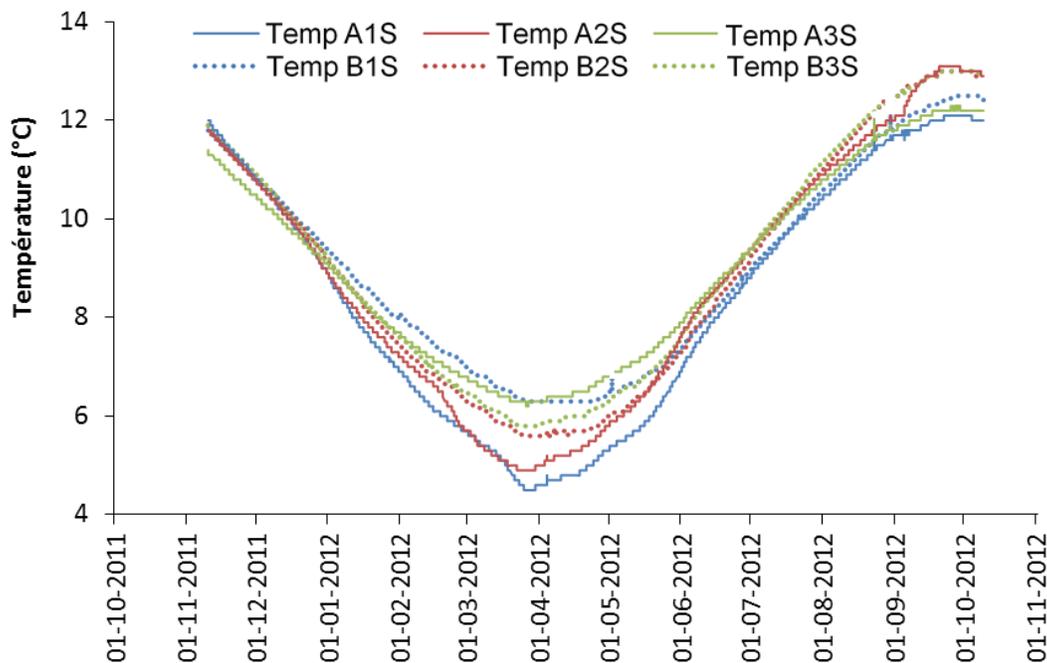


Figure 5.32 Température de l'eau dans les piézomètres des deux milieux humides.

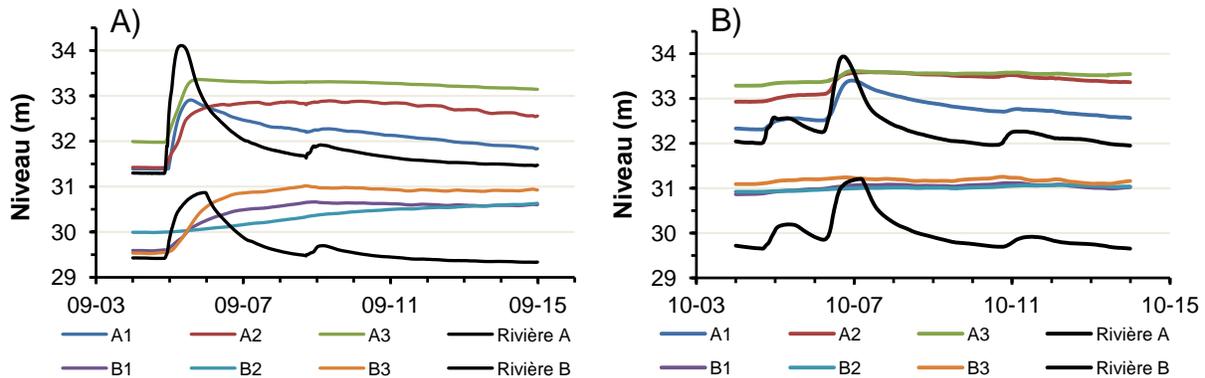


Figure 5.33 Variations des niveaux d'eau (élévations au-dessus du niveau de la mer) dans la rivière et dans les piézomètres pour les deux milieux humides pour A) un événement de pluie survenu le 5 septembre (61 mm de précipitation) et B) un événement de pluie survenu le 6 octobre (27 mm de précipitation).

5.3.1.3. Températures

Températures de l'eau dans le cours d'eau

La figure 5.34 illustre les variations horaires mesurées aux différentes sondes de température installées le long du cours d'eau en comparaison avec les variations horaires de températures de l'air. Pendant le mois de mai et plus tard en septembre et octobre, la température de l'eau est similaire pour toutes les sondes. Entre juin et août, certaines sondes ont des températures maximales plus fraîches. Ceci est interprété comme un apport d'eau souterraine. La figure 5.34 a été divisée en deux sections de rivière, chacune correspondant à un degré de couverture végétale similaire, c'est-à-dire de l'amont à T05 et de T06 au milieu humide B. Dans la portion amont, la sonde T01 a un comportement très différent des autres. Il est probable qu'elle ait été enfouie sous les sédiments. Les différences observées aux autres sondes peuvent s'expliquer par des conditions d'ensoleillement différentes. Dans la portion aval, les températures maximales diminuent entre les stations T06 et T07, alors que les températures minimales sont similaires. Ceci pourrait indiquer un apport d'eau souterraine plus important dans cette portion de la rivière. À T08 (immédiatement en amont du milieu humide B), la température minimale descend systématiquement à 15 °C entre les périodes de précipitations. Ceci indique une importante arrivée ponctuelle d'eau souterraine. Les températures minimales augmentent ensuite à nouveau à la sonde du milieu humide B.

À l'échelle des événements de pluie, il est frappant de constater une tendance inverse entre les milieux humides A et B suite au passage de la crue du 5 septembre (Figure 5.35), alors que les températures remontent dans le milieu humide A entre le 6 et le 8 septembre, avec une cyclicité diurne qui s'approche progressivement de celle des températures de l'air. Pendant cette période, les températures continuent de chuter dans le milieu humide B. Le contraste entre les deux milieux est nettement moins grand lors de l'événement du 6 octobre (Figure 5.35B).

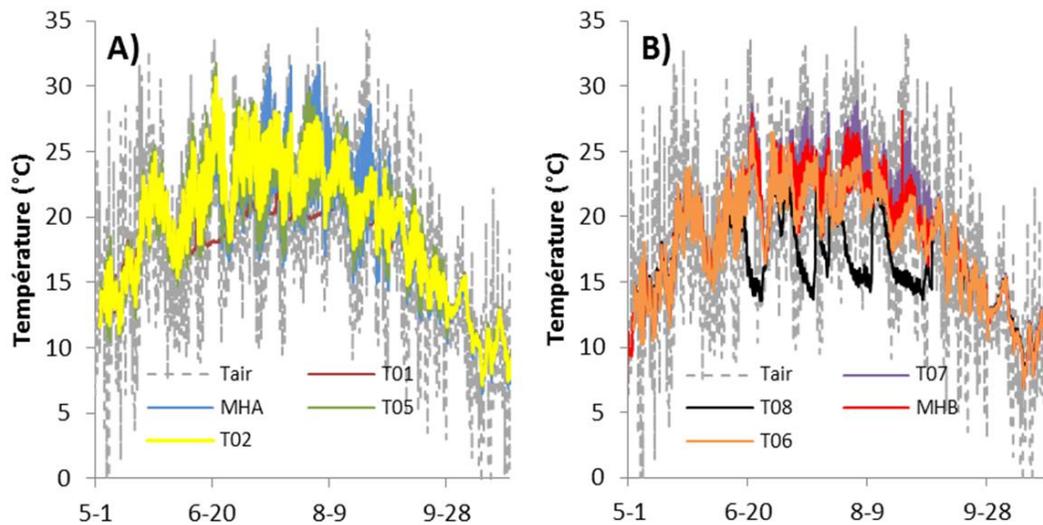


Figure 5.34 Variation de la température de l'eau dans la rivière de mai à octobre 2012 A) de l'amont à T05 et B) de T06 au milieu humide B. La température de l'air est aussi indiquée en gris (ligne grise tiretée) sur l'axe de droite.

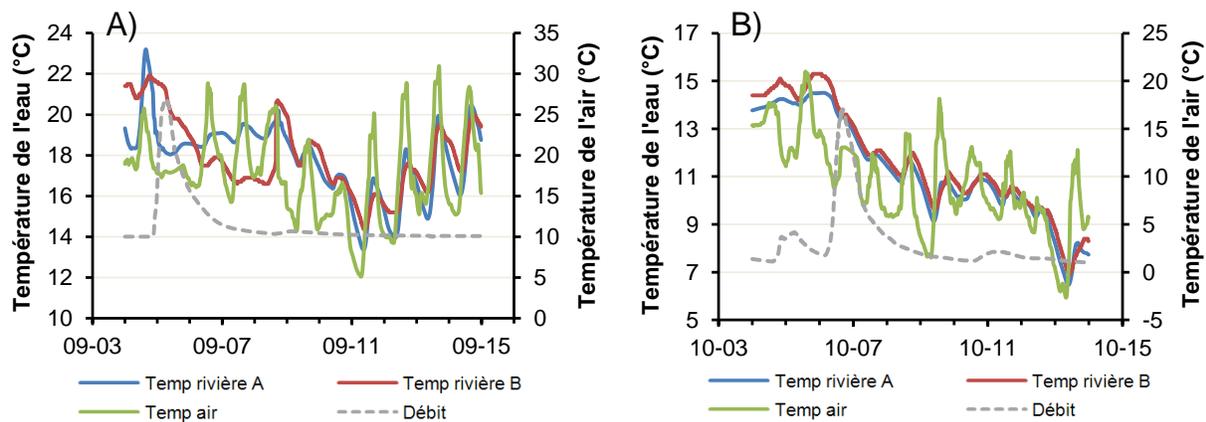


Figure 5.35 Variation de la température de l'air (en vert) et de l'eau de la rivière au milieu humide A (en bleu) et B (en rouge) pour l'événement du A) 5 septembre et du B) 6 octobre. L'hydrogramme de crue est indiqué en gris (ligne tiretée) à titre indicatif afin de situer le pic de crue (les valeurs de débit ne correspondent pas aux valeurs sur les axes des ordonnées).

Variations spatio-temporelles de la température de l'eau par DTS

Les variations spatiales de température sont aussi très différentes entre les deux milieux humides. Les données DTS (Distributed Temperature Sensor) révèlent clairement la présence de zones plus fraîches et plus chaudes (Figure 5.36). Dans le milieu A, on note la présence d'une zone avec couvert végétal dans la partie aval. Toutefois, les températures maximales ne semblent pas directement liées à l'ombrage procuré par ces zones puisque tant des secteurs chauds (jusqu'à 31 °C) que frais (autour de 22 °C) s'y retrouvent (Figure 5.36A). Cette variabilité ne s'explique pas non plus par la profondeur d'eau et doit donc en partie être liée à un apport d'eau souterraine qui semble toutefois assez diffus. Le tronçon de rivière le plus près des piézomètres est en fait le plus chaud.

Les températures maximales dans le milieu humide B montrent une amplitude spatiale plus importante que dans le milieu A (16,6 °C comparé à 9,3 °C) (Figure 5.36). Ceci est dû à la présence d'eau nettement plus fraîche dans la partie amont du tronçon, où les températures maximales ne dépassent pas 10 °C, même lorsque la température de l'air atteignait 30 °C. Comme pour le milieu A, les variations de la température ne semblent pas suivre le patron spatial des zones avec ombrage (en vert pâle sur la figure 5.36) ou des zones plus profondes, bien que le secteur plus frais à l'amont corresponde à une zone assez profonde (près de 1,6 m).

Au moment des mesures DTS, la température moyenne de l'eau en chaque point de mesure était plus grande au milieu humide B qu'au milieu humide A, à l'exception des premiers 100 m où un influx d'eau souterraine abaisse brusquement la température de la rivière (Figure 5.37). Cette zone concorde avec les températures de l'eau observées à la station T08. À l'exception de ces premiers 100 m, la température maximale est similaire dans les deux milieux humides. Il est intéressant de noter que des baisses de température moyenne et maximale localisées sont visibles au milieu humide B. Il s'agit probablement d'apports ponctuels d'eau souterraine.

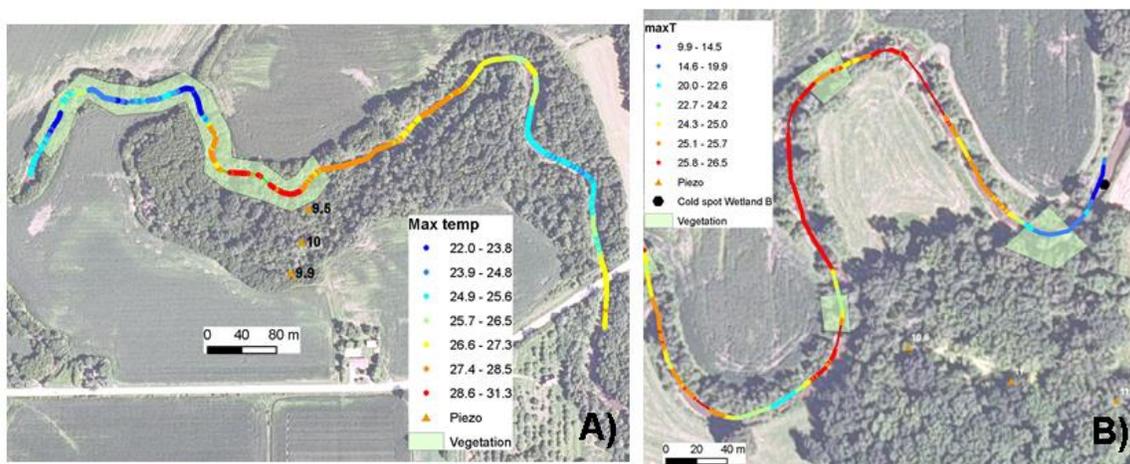


Figure 5.36 Variation spatiale de la température maximale mesurée par DTS dans le A) milieu humide A et B) milieu humide B. À noter que l'échelle de températures n'est pas la même dans les deux cas.

L'écart-type sur les valeurs ponctuelles est d'ailleurs plus faible à ces endroits, et plus particulièrement dans les premiers 100 m, confirmant que les températures de l'eau ont une amplitude moindre due à un apport constant d'eau souterraine (Figure 5.38). Dans le milieu humide A, les écarts-types sont relativement faibles jusqu'à 700 m, indiquant probablement une zone d'apport diffus d'eau souterraine. Par la suite, les écarts-types augmentent de manière marquée.

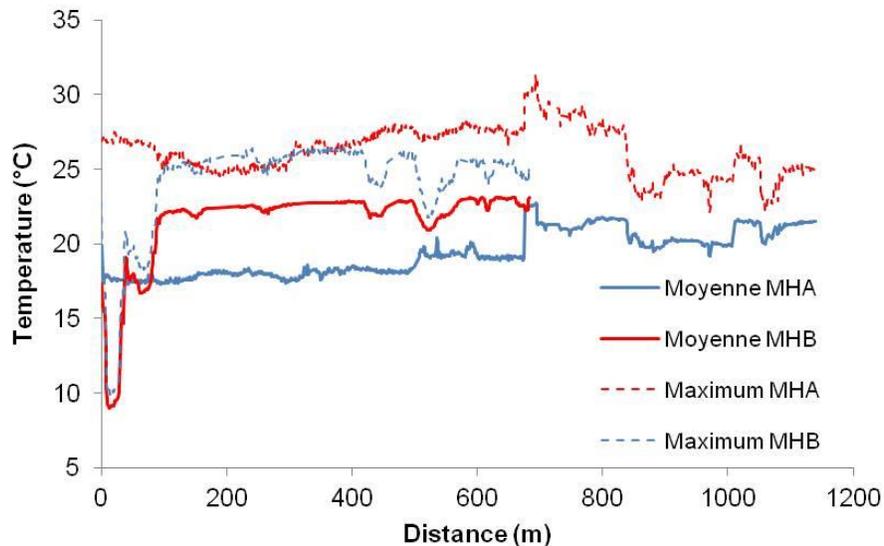


Figure 5.37 Températures moyennes et maximales mesurées à l'aide du DTS aux deux milieux humides.

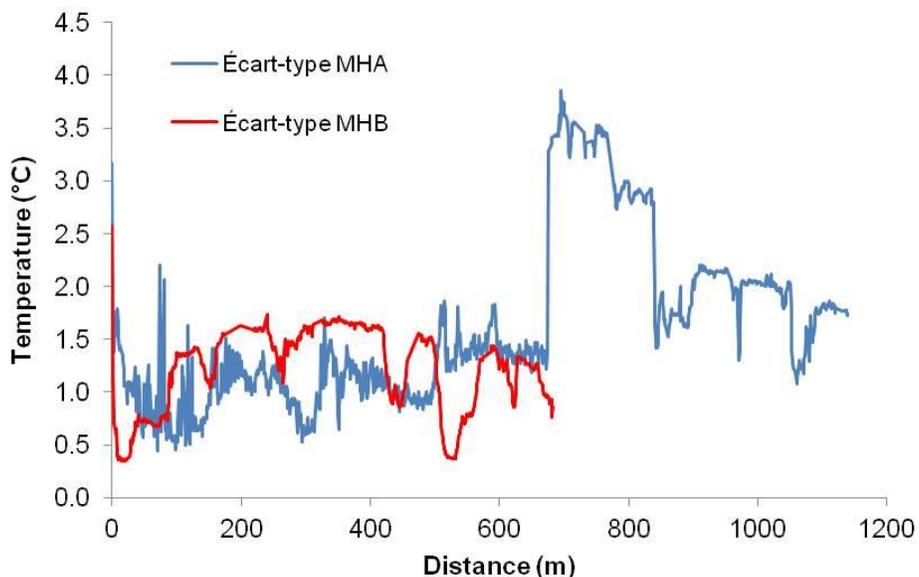


Figure 5.38 Écart-type des températures mesurées à l'aide du DTS aux deux milieux humides.

5.3.1.4. Isotopes stables de l'eau et radon

Les données des précipitations locales n'étant pas disponibles, la droite des eaux météoriques locales a été générée pour la zone d'étude (Online isotopes in precipitation calculator, www.waterisotope.org). La gamme des valeurs illustrées reflète la variabilité annuelle des précipitations correspondant à une altitude de 40 m (Figure 5.39). Les eaux analysées sont situées immédiatement sous cette droite. L'eau de l'aquifère (cf. puits municipal au roc) est la plus appauvrie, ce qui reflète la recharge printanière (appauvrie) de l'eau souterraine. L'eau de la rivière est plus enrichie que celle de l'aquifère, mais plus appauvrie que l'eau des précipitations. Ceci reflète un mélange d'apports directs des précipitations et d'apports d'eau souterraine. La signature isotopique de l'eau de surface prélevée dans les deux milieux humides est similaire à celle des précipitations de juin et juillet et s'éloigne de la droite météorique mondiale, ce qui indique la présence d'évaporation. L'eau des piézomètres A1S, A2S, A3S, A3L et B3L a une composition isotopique similaire à celle de l'aquifère tandis que l'eau des piézomètres B1S, B1L et B2S est similaire à celle de la rivière. Les dépôts meubles à l'endroit de ces derniers sont aussi moins perméables qu'ailleurs sur les profils piézométriques et les précipitations s'y infiltrent probablement plus lentement. Les autres piézomètres (A1L, A2L, B2L et B3S) ont une composition isotopique située entre les pôles rivière et aquifère. Ceci indique que tous les piézomètres sont influencés par l'eau souterraine, mais à des degrés divers.

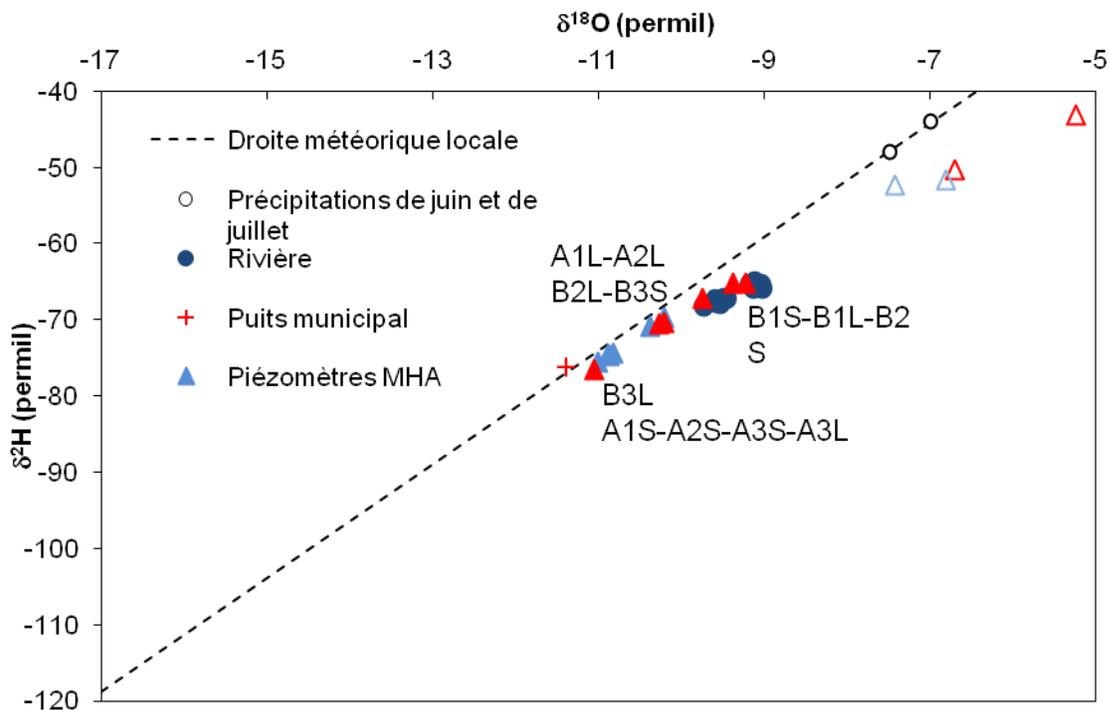


Figure 5.39 Isotopes stables analysés dans les échantillons d'eau sur la rivière de la Roche.

Les activités en radon (^{222}Rn) mesurées en août 2012 sur la zone étudiée varient de 2,79 à 159,32 Bq/L et sont illustrées à la figure 5.40. Les valeurs les plus élevées sont observées dans la portion amont de la zone étudiée, mais il est difficile d'identifier une tendance spatiale. Ceci reflète la grande variabilité spatiale de la production de radon dans l'aquifère. Dans la rivière, l'activité en ^{222}Rn est relativement stable, sauf immédiatement en amont du milieu humide B où elle augmente très rapidement à 1,87 Bq/L. La zone avec des températures beaucoup plus fraîches à l'amont du milieu humide B ressort très clairement dans les concentrations de radon plus élevées à cet endroit (Figure 5.40). Dans la portion de rivière qui traverse le milieu A, les concentrations sont environ la moitié de celles du milieu B (entre 0,22 et 0,30 Bq/L) mais elles varient moins spatialement, ce qui pourrait refléter un apport plus diffus d'eau souterraine très similaire à celui présent sur le reste de la rivière. La variation spatiale des concentrations en radon révèle que, malgré une connectivité hydrologique plus grande dans le milieu humide A, l'apport d'eau souterraine est plus important dans le milieu humide B. Dans les piézomètres du milieu humide A, l'activité en ^{222}Rn varie de 4,57 à 7,39 Bq/L) tandis que dans le milieu humide B, elle varie de 1,42 à 8,89 Bq/L. Ces résultats confirment que les piézomètres des deux milieux humides sont influencés par l'eau souterraine.

La dynamique du ^{222}Rn a été simulée sur l'ensemble de la rivière de la Roche à l'aide du modèle Radin14. La profondeur et la largeur de la rivière, l'évaporation, le temps de séjour de l'eau dans la rivière ainsi que le débit d'entrée dans la rivière sont des paramètres requis par le modèle. Le modèle a été calé en ajustant le coefficient de vitesse de transfert gazeux de la rivière à l'atmosphère (4 m/j), l'activité en ^{222}Rn dans l'eau souterraine (activité maximale en amont de la rivière), ainsi que les débits d'eau souterraine entrant dans différentes portions de la rivière.

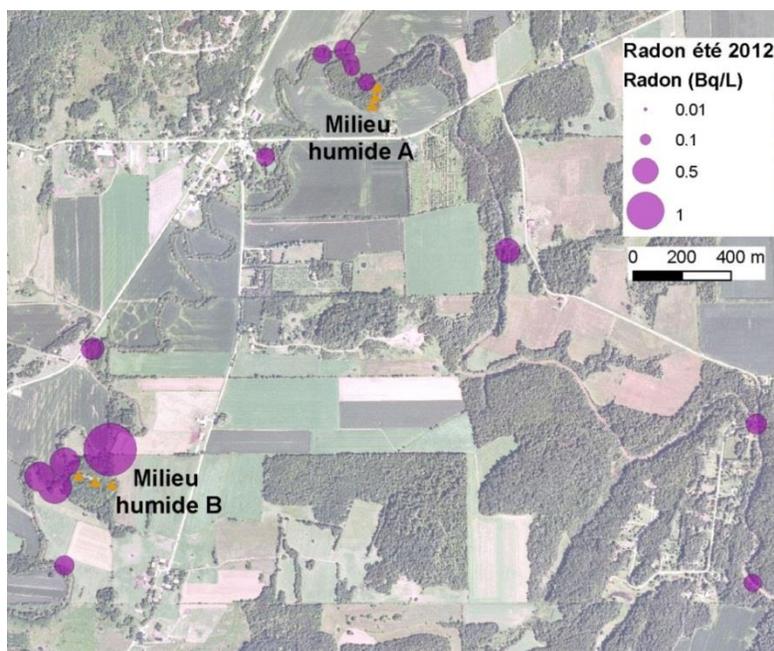


Figure 5.40 Variabilité dans les concentrations en radon le long de la rivière de la Roche lors de l'échantillonnage réalisé au mois d'août 2012.

Dans le modèle calé, les apports d'eau souterraine sont sensiblement les mêmes jusqu'à 7,5 km de l'amont (varient de 0,1 à 0,2 m³/j/m). Ils augmentent significativement à l'approche du milieu humide B, atteignant 2,8 m³/j/m immédiatement en amont du milieu humide (dans la zone d'apport d'eau souterraine ponctuelle identifiée précédemment), pour redescendre à 0,3 m³/j/m à l'aval du milieu humide. Les mesures de débits en rivière disponibles n'ont pas permis de confirmer que les apports d'eau souterraine sont réellement plus importants entre la station T05 et la station T08 (moitié aval du cours d'eau). L'apport total d'eau souterraine à la rivière dans la zone d'étude est de 3,09 m³/j. Cet apport correspond à 100 % de l'accroissement du débit de l'amont vers l'aval de la zone d'étude, ce qui est tout à fait plausible puisque l'échantillonnage a été réalisé en période d'étiage (aucun ruissellement direct ou hypodermique) et que les tributaires ont une contribution négligeable (environ 150 m³/j).

La figure 5.41 présente les débits totaux de la rivière mesurés et simulés, de même que les activités en ²²²Rn mesurées et simulées. Ces résultats confirment que le secteur entourant le milieu humide B est une zone d'apports importants d'eau souterraine, et ce malgré la présence de dépôts fins dans cette portion de la rivière. Les apports d'eau souterraine dans le secteur du milieu humide A sont à peine supérieurs à ceux calés plus en amont sur la rivière. Vu le comportement très différents des deux milieux humides par ailleurs assez semblables, cette contribution de l'aquifère dans le secteur du milieu humide B ne peut être liée directement à la présence du milieu humide.

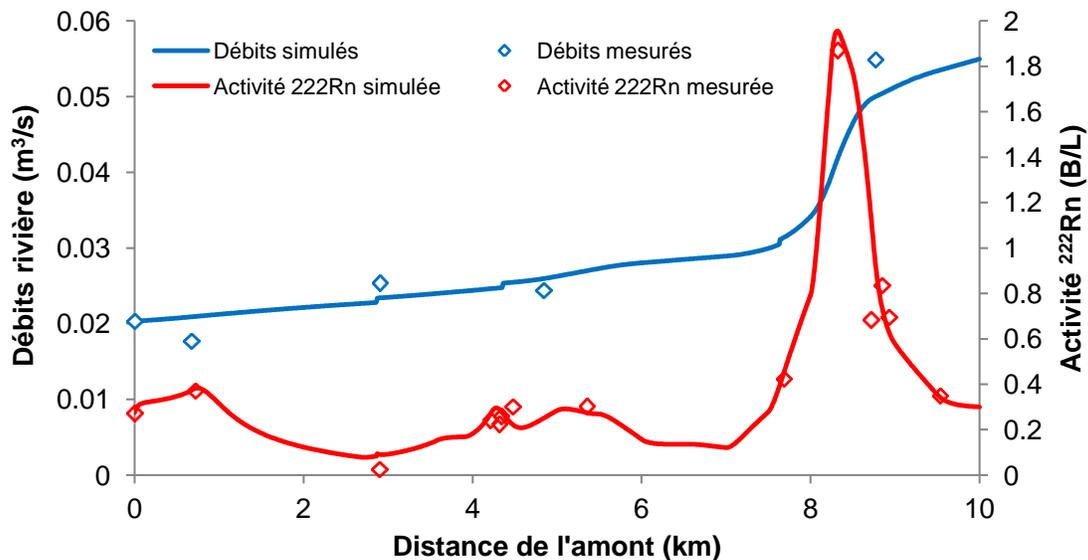


Figure 5.41 Débits totaux et activité en ²²²Rn mesurés et simulés.

5.3.2. Cas de la rivière Matane

La figure 5.42 présente les fluctuations des niveaux piézométriques et du niveau de la rivière Matane pour la période de juin à novembre 2011 sur le site instrumenté (site à Dancause). Durant cette période, sept crues sont survenues et le synchronisme des niveaux piézométriques avec le niveau de la rivière est très marqué. Ce synchronisme est révélé notamment par l'analyse de corrélations croisées entre les niveaux piézométriques et le niveau de la rivière pour l'événement du 5 au 12 septembre (Figure 5.43A). Sans égard à la distance du cours d'eau, les corrélations croisées entre le niveau de la rivière et le niveau piézométrique excèdent toutes la valeur de 0,9. Ces valeurs sont similaires à celles observées sur la rivière de la Roche pour le milieu humide A. Comme sur la rivière de la Roche, les corrélations croisées niveaux-niveaux sont nettement supérieures à celles des analyses précipitations-niveaux. La corrélation croisée entre les précipitations et les niveaux est plus grande sur le site expérimental de la rivière Matane (0,22 à 0,28; Figure 5.43B) que sur la de la Roche, ce qui s'explique par les conductivités hydrauliques plus élevées des sédiments sur le site de la Matane. Sur la rivière Matane, le décalage entre le maximum de crue et le maximum piézométrique augmente avec la distance entre le piézomètre et la rivière (Figure 5.44), ce qui n'a pas été observé systématiquement sur la rivière de la Roche.

L'analyse de la réponse piézométrique dans la plaine révèle le changement dans l'orientation des écoulements souterrains lors du passage d'une crue. La figure 5.45 montre le changement marqué de l'orientation de l'écoulement dans l'aquifère alluvial lors de la crue du 5 au 12 septembre. Avant la montée de la crue, l'écoulement se fait généralement de la plaine vers le cours d'eau dans le sens de la vallée alors qu'au débit maximum, l'écoulement se fait assurément du cours d'eau vers la plaine dans le sens de la vallée. Ce changement de direction n'a été observé que pour la crue de 213 m³/s en septembre 2011.

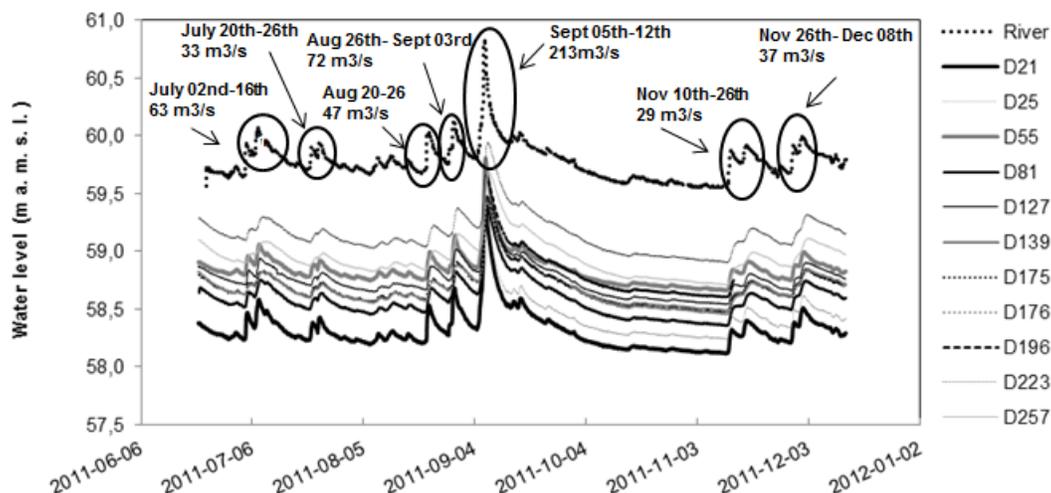


Figure 5.42 Fluctuations des niveaux d'eau de la rivière et des niveaux piézométriques. Le numéro des piézomètres correspond à leur distance en ligne droite à la rivière (Cloutier *et al.*, en prép.).

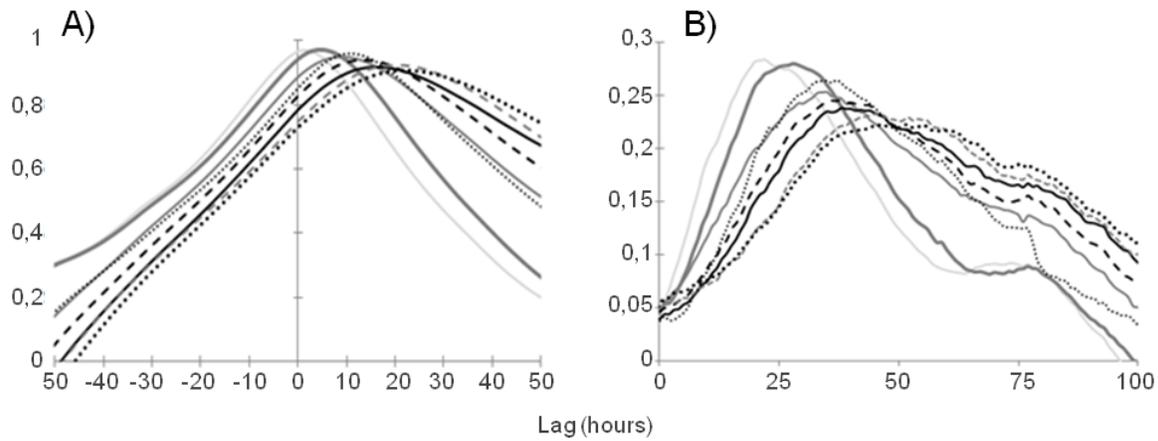


Figure 5.43 A) Corrélations croisées entre les niveaux piézométriques et le niveau d'eau dans la rivière Matane pour l'événement du 5 au 12 septembre. B) Corrélations croisées entre les niveaux piézométriques et les précipitations pour l'événement du 5 au 12 septembre (Cloutier *et al.*, en prép.).

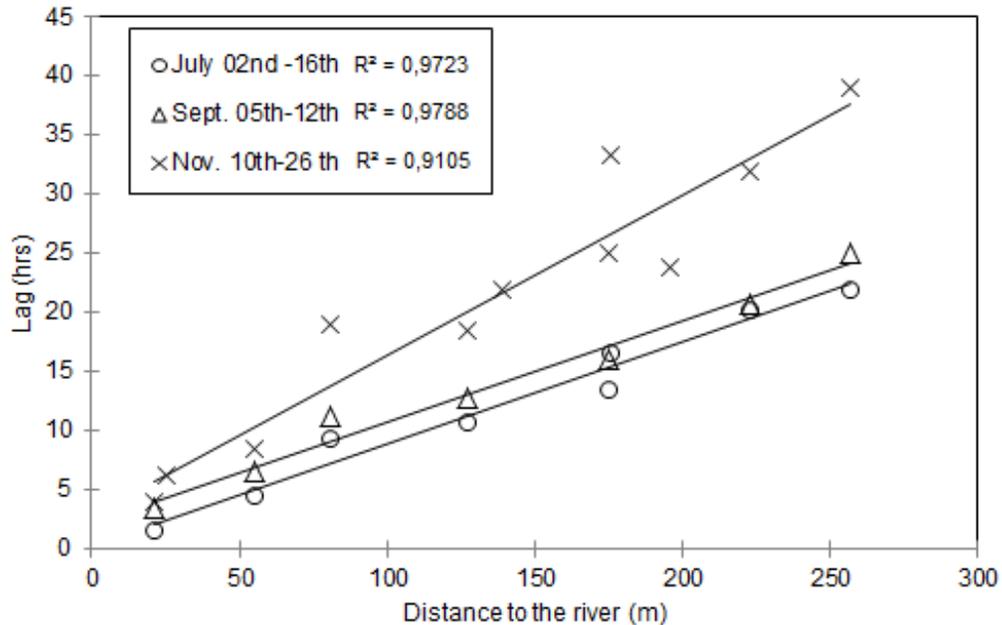


Figure 5.44 Décalage entre le maximum de crue et le maximum piézométrique pour trois événements de crue (Cloutier *et al.*, en prép.).

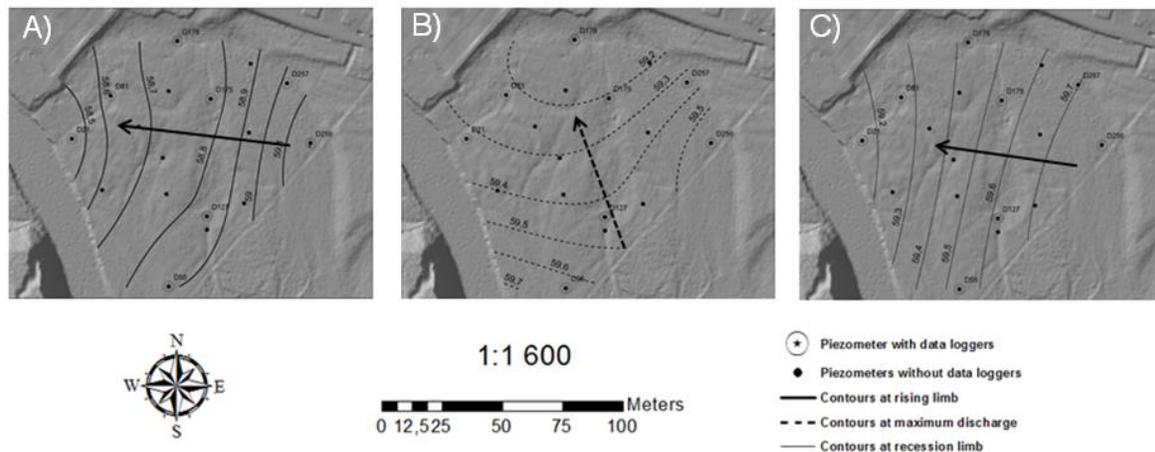


Figure 5.45 Directions de l'écoulement souterrain suggérées par les lignes équipotentiellles durant la plus forte crue survenue du 5 au 12 septembre 2011. A) Directions à $22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 5^e septembre à minuit; B) directions au maximum de crue de $213 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 6 septembre à 14h00; C) directions durant la récession à $112 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 7 septembre à 13h00 (Cloutier *et al.*, en prép.).

Des analyses croisées entre les niveaux en rivière et la température de l'eau dans les piézomètres montrent que la température de l'eau dans la plaine subit l'influence de la crue jusqu'à une distance de 50 m de la rivière (résultats non présentés dans ce document). Ceci pourrait suggérer une infiltration d'eau fluviale sur une courte distance à l'intérieur de la plaine, contribuant ainsi à la recharge de l'aquifère alluvial. Ces phénomènes n'ont pas été observés sur la rivière de la Roche. Ceci s'explique sans doute par la faible largeur de la zone riveraine instrumentée sur la rivière de la Roche.

L'article de Cloutier *et al.* (en prép.) analyse de manière détaillée les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface au site expérimental. Les résultats suggèrent que la pression exercée sur les berges par une crue provoque la propagation d'une onde « phréatique », interprétée comme une onde dynamique, quelle que soit l'amplitude des crues. La vitesse de propagation de cette onde est relativement constante à travers la plaine inondable, mais elle dépend fortement des conditions antécédentes. Ces conclusions suggèrent aussi que l'extension d'une crue est beaucoup plus grande dans le temps et dans l'espace que ne le laisse croire la crue dans le cours d'eau, et ce même à des débits inférieurs aux débits de débordement. Ces travaux permettent ainsi de mieux comprendre et circonscrire l'espace de crue dans la vallée de la rivière Matane.

5.3.3. Synthèse

Les travaux réalisés pour étudier la connectivité entre la rivière et la nappe permettent de faire les observations suivantes:

- La rivière de la Roche reçoit de l'eau de l'aquifère sur toute la zone d'étude, mais les flux entrants varient significativement dans l'espace. Ces flux sont relativement faibles de la frontière du Vermont au milieu humide A et augmentent ensuite significativement jusqu'à la frontière américaine.
- Les apports dans le milieu humide A de la rivière de la Roche sont similaires aux apports dans la portion amont de la rivière et sont de nature diffuse à travers le lit de la rivière. La zone riveraine est connectée de manière dynamique à l'aquifère et subit l'influence des variations de niveau dans la rivière. Il ne semble toutefois pas y avoir de transfert significatif d'eau de la rivière à l'aquifère (c.-à-d. inversion temporaire des gradients, mais pas d'écoulement démontré par des variations rapides de température de l'eau) au moment des crues. Au milieu humide B, les apports d'eau souterraine sont plus ponctuels, notamment dans la portion amont du milieu humide où un apport d'eau souterraine important a été identifié. Les variations de niveau dans la rivière n'ont pas d'influence sur les variations de niveau dans la zone riveraine. La connexion entre la rivière et les dépôts quaternaires voisins est très faible.
- Le radon a permis de mettre en évidence les apports d'eau souterraine ponctuels les plus importants sur la rivière de la Roche, mais ne permet pas de distinguer les apports diffus. L'utilisation du DTS permet d'identifier les venues d'eau ponctuelles de manière très précise.
- La rivière Matane reçoit de l'eau de l'aquifère dans la zone instrumentée, mais en période de forte crue, la direction des gradients hydrauliques s'inverse pour s'orienter de la rivière à la plaine alluviale.
- Sur la rivière Matane, la pression exercée sur les berges par une crue provoque la propagation d'une onde dynamique qui se diffuse à travers la plaine, accompagnée d'un transfert d'eau de la rivière vers la nappe sur une courte distance seulement. La vitesse de propagation de cette onde est relativement constante à travers la plaine d'inondation, mais elle dépend fortement des conditions antécédentes.
- Sur la rivière Matane, l'extension d'une crue est beaucoup plus grande dans le temps et dans l'espace que ne le laisse croire la crue dans le cours d'eau, et ce même à des débits inférieurs aux débits de débordement.
- Les trois sites étudiés pour la connectivité rivière-nappe sont connectés de manière très différente à l'aquifère. La nature et la stratigraphie des dépôts meubles présents dans la plaine alluviale jouent apparemment un rôle majeur dans la variabilité de la connectivité rivière-nappe dans l'espace de liberté d'une rivière. La présence d'un milieu humide dans cet espace apporte une complexité supplémentaire aux échanges rivière-nappe, mais les processus en jeu n'ont pu être identifiés dans ce projet.

5.4. Analyse avantages-coûts et espace de liberté

Un sommaire des coûts et des avantages calculés avec les données décrites et selon les méthodes détaillées à la section 4.7 est présenté au tableau 5.5. Ce sommaire présente l'évaluation des coûts et des avantages escomptés à un taux d'actualisation de 4 % sur une période de 50 ans. Le choix du taux de 4 % correspond à un usage largement répandu dans ce type d'analyse, notamment au sein des institutions gouvernementales. Plusieurs économistes prônent cependant le recours à un taux d'actualisation moins élevé dans le cas de projets à caractère environnemental, à 2 % ou même 0 %, pour tenir compte des bénéfices à long terme des solutions de développement durable. Des analyses de sensibilité ont donc été réalisées pour tenir compte de ces différentes approches.

Dans l'ensemble, on peut constater au tableau 5.5 que l'aménagement de l'espace de liberté pour chacune des trois rivières étudiées est socialement avantageux. Des valeurs nettes variant entre 0,7 et 3,7 millions de dollars sont dégagées pour chacune des trois rivières. Les ratios avantages/coûts sont de 2,3/1 pour la Yamaska Sud-Est, de 5,2/1 pour la de la Roche et de 7,1/1 pour la Matane (Figure 5.46a).

Le choix de 50 ans pour l'analyse avantages-coûts est arbitraire et a été fait pour faciliter la manipulation des résultats, compte tenu qu'avec un taux d'actualisation de 4 %, la valeur des bénéfices au-delà de cet horizon tend à diminuer considérablement. Ce choix entraîne nécessairement une légère sous-estimation des bénéfices dans la mesure où dans un type d'aménagement tel que l'espace de liberté, contrairement aux investissements en infrastructures qui ont une durée de vie limitée, les bénéfices perdurent indéfiniment et ont même le potentiel d'augmenter dans le temps.

Ces questions du taux d'escompte de l'horizon de temps utilisés dans le calcul des bénéfices revêtent ici une certaine importance étant donné que les coûts de la mise en place de l'espace de liberté seraient encourus dès la première année alors que les bénéfices, qu'il s'agisse des économies d'entretien des berges ou des bénéfices dérivés des biens et services écosystémiques, sont récoltés tout au long de l'horizon d'analyse de 50 ans et même de façon croissante en ce qui concerne les milieux humides, ceux-ci se constituant progressivement. La figure 5.46b démontre clairement l'effet d'un taux d'actualisation moindre (2 %) sur les bénéfices. On obtient alors des valeurs nettes variant entre 1,2 et 5,9 millions de dollars pour chacune des trois rivières. Les ratios avantages/coûts sont de 2,2/1 pour la Yamaska, de 4,7/1 pour la de la Roche et de 6,7/1 pour la Matane (Figure 5.46b). Bien évidemment, l'usage d'un taux plus élevé aurait eu l'effet inverse et aurait diminué la valeur des avantages alors que les coûts d'implantation seraient demeurés les mêmes. Par exemple, l'usage d'un taux de 6 % aurait diminué le bilan de la Yamaska Sud-Est à seulement 1,2 millions de dollars, ce qui démontre la forte sensibilité de l'évaluation à cette variable.

Les milieux humides sont reconnus pour jouer un rôle hydrologique (atténuation des crues, Fossey *et al.*, 2012) et écologique majeur. Dans le cas des rivières de la Roche et Matane, la valeur des services écosystémiques rendus par les milieux humides ne correspond qu'à une faible portion des bénéfices (Figure 5.46a), car la superficie de ces zones demeure relativement faible. Ceci est dû en partie au fait qu'il faut du temps avant que des milieux humides additionnels puissent se créer dans l'espace de liberté, ce qui en atténue l'impact économique.

Tableau 5.5 Synthèse des coûts et avantages de l'espace de liberté pour les trois cours d'eau à 4 % d'actualisation.

Type	Catégorie	Valeur (\$ CAD)
Rivière Yamaska Sud-Est		
Coûts	Perte de droit de construction	-2 913 120
	Perte de droit de culture	-1 453 832
	Réductions des coûts de protection – mesures additionnelles	3 269 009
	Réductions des coûts de protection – mesures existantes	589 260
Avantages	Réductions des dommages dus aux inondations (terres agricoles)	142 703
	Augmentation de la superficie des milieux humides	1 499 615
	Création d'une bande riveraine de 15 m	1 241 628
Total		2 375 263
Rivière De La Roche		
Coûts	Perte de droit de construction	-183 600
	Perte de droit de culture	-115 969
	Réductions des coûts de protection – mesures additionnelles	705 487
	Réductions des coûts de protection – mesures existantes	42 676
Avantages	Réductions des dommages dus aux inondations (terres agricoles)	11 298
	Augmentation de la superficie des milieux humides	57 848
	Création d'une bande riveraine de 15 m	229 059
Total		746 799
Rivière Matane		
Coûts	Perte de droit de construction	-630 000
	Perte de droit de culture	-330 172
	Réductions des coûts de protection – mesures additionnelles	2 107 479
	Réductions des coûts de protection – mesures existantes	1 937 764
Avantages	Réductions des dommages dus aux inondations (terres agricoles)	90 176
	Augmentation de la superficie des milieux humides	224 587
	Création d'une bande riveraine de 15 m	263 829
Total		3 663 663

Il est difficile de prévoir exactement à quel rythme les milieux humides vont se reconstituer une fois éliminée toute interférence humaine. Dans l'analyse précédente, un taux de 2 % de reconstitution des milieux humides a été utilisé mais selon les conditions climatiques et la nature de l'environnement de chaque rivière, il est possible que le processus soit deux fois plus rapide. Ainsi, si les milieux humides se reconstituaient sur une période de 25 ans au lieu de 50 ans, leur valeur escomptée dans les trois bassins versants serait de 2,5 millions de dollars au lieu de 1,5 millions de dollars pour la Yamaska Sud-Est, 96 000 \$ au lieu de 58 000 \$ pour la de la Roche et 422 000 \$ au lieu de 225 000 \$ pour la Matane, soit une augmentation dans une proportion semblable à celle de la diminution du taux d'escompte à 2 %.

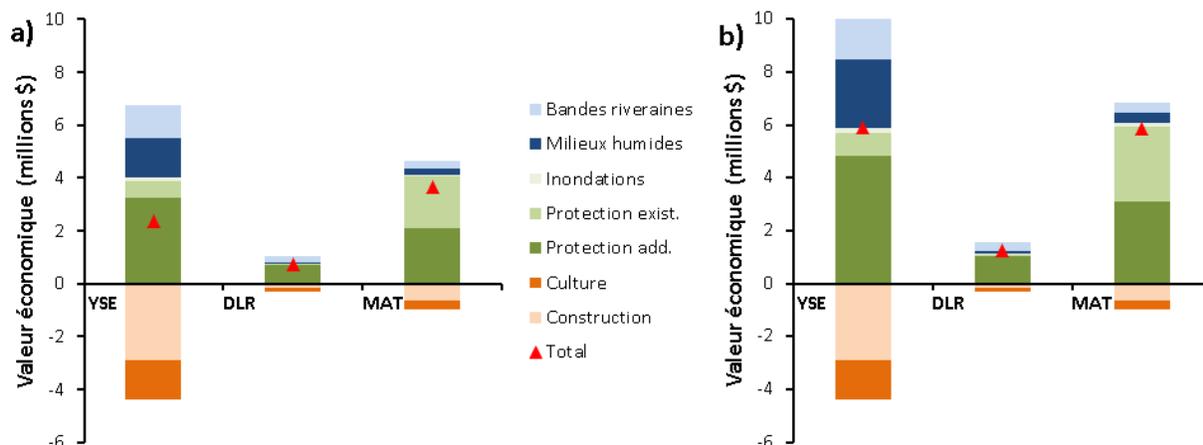


Figure 5.46 Résultats graphiques de l'analyse avantages-coûts pour les trois rivières avec un taux d'actualisation de a) 4 % et b) 2 %.

Le rapport avantages/coûts de la Yamaska Sud-Est est désavantagé par rapport aux autres en raison de l'importance des zones constructibles faisant partie de l'espace de liberté et de la valeur élevée des lots vacants utilisée pour l'analyse dans cette région. Il faut toutefois noter que le développement urbain dans cette partie de l'espace de liberté engendrerait aussi des coûts importants en cas de risques imminents d'inondation, tant pour la municipalité (surveillance, coordination, affichage, avis d'évacuation, pompiers, pompage, sacs de sable, visites des résidences (S. Lajeunesse, comm. pers.)) que pour les propriétaires de bâtiments et infrastructures affectées par les inondations. Ces coûts n'ayant pas été pris en compte dans l'analyse avantages-coûts, il est envisageable que les bénéfiques soient sous-estimés sur la rivière Yamaska Sud-Est. Notons par ailleurs que la valeur utilisée pour calculer la perte du droit de construire fait l'objet d'une analyse de sensibilité dans la mesure où l'on constate une très grande dispersion des valeurs des terrains et qu'il est difficile de déterminer de façon précise la valeur exacte des lots qui feront partie de l'espace de liberté.

Les valeurs utilisées pour quantifier la perte de l'espace constructible sont basées sur la médiane d'un échantillon de valeurs des lots vacants au registre foncier des municipalités touchées. Comme cet échantillon ne correspond pas nécessairement exactement aux lots inclus dans l'espace de liberté et que la valeur moyenne des lots se situe à un niveau beaucoup plus bas, il est fort possible que l'utilisation de la valeur médiane entraîne une forte surévaluation de la perte du droit de construire. À cette fin, le bilan de l'analyse avantages-coûts a été refait avec une diminution de 50 % et de 75 % de cette valeur. Comme on peut le voir au tableau 5.6, de telles diminutions modifieraient à la hausse les résultats de façon importante pour la Yamaska Sud-Est et un peu moins pour la de la Roche et la Matane. Dans le cas de la municipalité de Cowansville, la ville a déjà acheté plusieurs terrains situés dans une bonne portion de l'espace de liberté et est actuellement en négociation pour les autres (S. Lajeunesse, comm. pers.). Il est donc très vraisemblable que la perte réelle du droit de construction soit nettement moindre pour la Yamaska Sud-Est.

Tableau 5.6 Variation de la valeur des lots constructibles pour les trois cours d'eau

Type	Catégorie	Valeur (\$)
Rivière Yamaska Sud-Est		
Coûts	Perte de droit de construction	-2 913 120
	-50%	-1 456 560
	-75%	-728 280
Total		2 375 263
Total 2		3 831 823
Total 3		4 560 103
Rivière De La Roche		
Coûts	Perte de droit de construction	-183 600
	-50%	-91 800
	-75%	-45 900
Total		746 799
Total 2		838 799
Total 3		884 499
Rivière Matane		
Coûts	Perte de droit de construction	-630 000
	-50%	-315 000
	-75%	-157 500
Total		3 663 663
Total 2		3 978 663
Total 3		4 136 163

De même, la valeur de la perte du droit de culture a fait l'objet d'une analyse de sensibilité en raison du fait que la valeur utilisée peut différer sensiblement de celle qui sera négociée pour l'achat des servitudes. La valeur de la perte du droit de culture, soit le prix de la servitude consentie par les propriétaires agricoles, a été établie à l'aide du mécanisme de calcul utilisé au Vermont : le Vermont Easement Calculator. Le montant de 3 200 \$/ha constitue la base d'évaluation utilisée dans cette analyse pour les terres des rivières Yamaska Sud-Est et de la Roche. Cette valeur a été ajustée à 755 \$/ha pour tenir compte de la différence de la valeur des terres entre les régions de la Yamaska Sud-Est et de la Matane. Ces montants représentent environ 25 % de la valeur des terres dans ces deux régions soit un peu plus que la partie des terres situées dans la zone tampon où il serait interdit de cultiver.

Comme l'achat des servitudes est le fruit d'une négociation, il est toutefois possible que les montants qui seront négociés soient plus élevés. Ainsi, l'expérience au Vermont en date de 2010 situe les compensations accordées à environ 4 500 \$/ha. Aux fins de cette analyse avantages-coûts, une analyse de sensibilité a été réalisée avec une augmentation de 100 % de la valeur de la servitude, soit 6 400 \$/ha. Comme on peut le constater dans le tableau 5.7, l'augmentation du coût de la servitude et de la valeur de la perte du droit de cultiver à 6 400 \$/ha pour les rivières Yamaska Sud-Est et de la Roche et à 1 510 \$/ha pour la rivière Matane diminue fortement le bénéfice net pour la société de l'espace de liberté pour les deux premières rivières et dans une moindre mesure pour la Matane, sans toutefois le rendre négatif.

Tableau 5.7 Coûts et avantages des trois espaces de liberté avec un doublement du coût de la servitude

Rivière Yamaska Sud-Est		
Coûts	Perte de droit de construction	-2 913 120
	Perte de droit de culture	-2 907 664
Avantages	Réductions des coûts de protection – mesures additionnelles	3 269 009
	Réductions des coûts de protection – mesures existantes	589 260
	Réductions des dommages dus aux inondations (terres agricoles)	142 703
	Augmentation de la superficie des milieux humides	1 499 615
	Création de bandes riveraines de 15m	1 241 628
Total		921 431
Rivière De La Roche		
Coûts	Perte de droit de construction	-183 600
	Perte de droit de culture	-231 938
Avantages	Réductions des coûts de protection – mesures additionnelles	705 487
	Réductions des coûts de protection – mesures existantes	42 676
	Réductions des dommages dus aux inondations (terres agricoles)	11 298
	Augmentation de la superficie des milieux humides	57 848
	Création de bandes riveraines de 15m	229 059
Total		630 830
Rivière Matane		
Coûts	Perte de droit de construction	-630 000
	Perte de droit de culture	-660 344
Avantages	Réductions des coûts de protection – mesures additionnelles	2 107 479
	Réductions des coûts de protection – mesures existantes	1 937 764
	Réductions des dommages dus aux inondations (terres agricoles)	90 176
	Augmentation de la superficie des milieux humides	224 587
	Création de bandes riveraines de 15m	263 829
Total		3 333 491

Ces analyses de sensibilité démontrent donc que, même en prenant des valeurs plus élevées de compensation financière pour la perte de droit de culture et en utilisant un taux d'actualisation de 4 % qui diminue grandement la valeur des biens écosystémiques (Schmidt et Batker, 2012), l'espace de liberté est socialement avantageux. La figure 5.47 présente un éventail de valeurs minimales et maximales pour chaque catégorie, basé sur l'analyse de sensibilité développée ci-dessus avec un taux d'escompte de 4 %. Pour les scénarios les plus défavorables (Figure 5.47a), des valeurs nettes positives sont dégagées pour chacune des trois rivières, variant entre 0,6 et 3,3 millions de dollars. Avec les scénarios les plus favorables à l'espace de liberté, les bénéfiques passent à 0,9, 4,3 et 5,6 millions de dollars pour les rivières de la Roche, Matane et Yamaska Sud-Est, respectivement (Figure 5.47b).

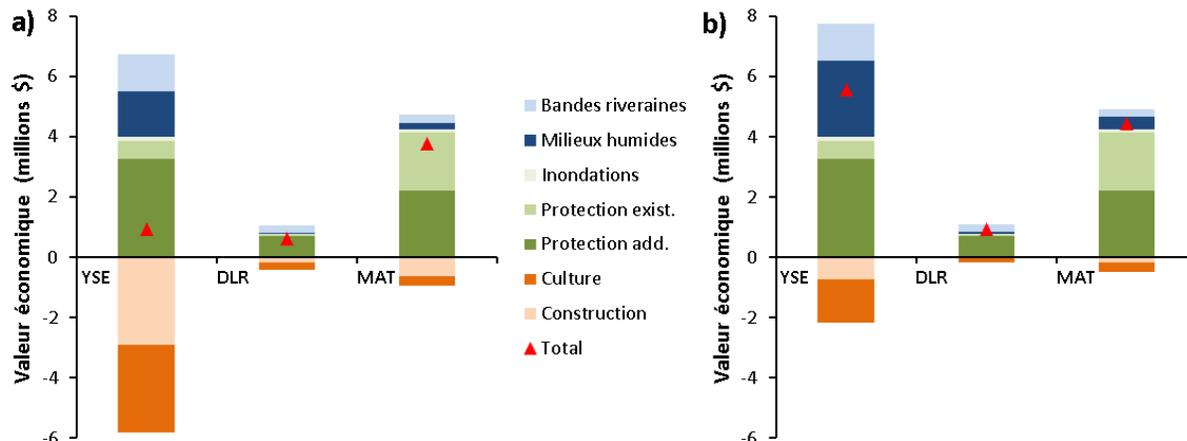


Figure 5.47 Analyse avantages-coûts pour a) les valeurs les moins favorables à l'espace de liberté (valeur de compensation des terres doublée, milieux humides se reconstituant sur une période de 50 ans) et b) les valeurs les plus favorables à l'espace de liberté (valeur des terres constructibles 75 % moindre), milieux humides se reconstituant sur une période de 25 ans).

Synthèse de l'analyse avantages-coûts

L'analyse avantages-coûts suggère que l'addition des bénéfices environnementaux dus à la création de milieux humides et à l'élargissement de bandes riveraines de 15 m, ajoutée aux réductions des coûts de protection des berges tout au long des 50 ans, est nettement supérieure au coût d'implantation de l'espace de liberté. Dans le cas des trois rivières, le coût de la perte de valeur des terrains constructibles ajouté à la servitude versée aux agriculteurs demeure inférieur aux bénéfices générés. Cette conclusion est encore plus forte si on utilise un taux d'escompte plus bas étant donné la distribution temporelle des bénéfices et des coûts, les premiers étant répartis sur toute la durée de vie du projet et au-delà alors que les seconds sont encourus dès le départ.

Il faut également considérer que l'analyse n'a pas tenu compte de tous les bénéfices potentiels de la mise en place de l'espace de liberté dont notamment le bénéfice des inondations évitées de bâtiments et d'infrastructures qui auraient été construits à l'intérieur de l'espace de liberté. Du côté des bénéfices environnementaux, la captation de carbone n'a pas non plus été prise en compte. Enfin, les calculs ont été réalisés sur un horizon temporel de 50 ans, bien que les bénéfices de la protection des milieux humides et des zones tampon riveraines de même que les économies de protection des berges continuent bien au-delà de cette période.

Dans l'ensemble, les diverses analyses de sensibilité ont permis de démontrer la robustesse des résultats obtenus, notamment face à un doublement du coût de la servitude sur les terres agricoles. L'utilisation d'une valeur moindre pour les terrains constructibles ou encore une création de milieux humides plus rapide ont aussi comme effet d'augmenter le bilan positif de la création de l'espace de liberté.

5.5. Rencontre avec les citoyens de Saint-Armand

Les riverains ont été convoqués par lettre à laquelle était annexé un plan d'ensemble de l'espace de liberté sur la rivière de la Roche, ainsi que les limites de l'espace de liberté à l'échelle de leur propriété. Sur l'ensemble de la rivière de la Roche, il y a 39 propriétés et 32 propriétaires riverains différents. Sur l'ensemble des 39 propriétés, il y a :

- neuf propriétés avec activités agricoles, appartenant à 7 propriétaires ;
- trois propriétés appartenant à la municipalité de Saint-Armand
- une église
- une école
- 25 propriétés résidentielles, dont neuf résidences secondaires

À la rencontre du 11 février 2013, 12 propriétaires étaient présents et deux autres propriétaires nous ont contactés suite à la rencontre. Parmi les 12 personnes présentes, trois étaient des agriculteurs (deux autres agriculteurs nous ont contactés par la suite). Des représentants de l'Organisme de bassin versant (OBV) de la baie Missisquoi étaient présents, de même que Monsieur Réal Pelletier, maire de Saint-Armand, et Luc Marchessault, officier municipal et responsable des travaux publics municipaux. Considérant qu'il y a plusieurs propriétés résidentielles où la longueur de la rive est relativement faible, dont neuf résidences secondaires, qu'il y a des propriétés sans bâtiments principal où la rive est en milieu boisé, et que les propriétés agricoles sont les plus susceptibles d'être affectées par la mise en place d'un espace de liberté, nous estimons que la participation à la réunion d'information est représentative.

L'ordre du jour de la réunion était le suivant :

1. Mot de bienvenue du maire de Saint-Armand, Monsieur Réal Pelletier
2. Mise en contexte de Simon Lajeunesse, coordonnateur régional des cours d'eau à la MRC Brome-Missisquoi
3. Notions de géomorphologie, par Pascale Biron
4. Présentation des résultats, par Pascale Biron
5. Discussions

La réunion fut très cordiale et beaucoup de questions ont été posées. Les principales questions ont été les suivantes :

- Comment l'espace de liberté peut-il améliorer la qualité de l'eau?
- Y a-t-il eu des mesures de qualité d'eau?

- La rivière a-t-elle été instrumentée en période de sécheresse ou par temps de pluie?
- Les agriculteurs avaient autrefois l'habitude de déposer les voyages de roches, suite à l'érochage de leurs champs, sur les berges érodées, est-ce que cela a limité les dégâts?
- Il y avait un barrage sur la rivière auparavant, était-ce une bonne chose pour régulariser les crues?
- Comment ça marche au Vermont ?

Les principaux commentaires sont les suivants :

- Il y a quelque chose d'illogique : le milieu agricole se bat contre l'érosion depuis des années, il y a d'immenses dépôts de sédiments à l'embouchure de la rivière de la Roche dans le lac Champlain, le lac se comble de sédiments petit à petit, il y a de graves problèmes de cyanobactéries dans la baie Missisquoi, et il faudrait laisser les berges s'éroder librement...
- L'inondation de la rivière de la Roche fait en sorte que l'eau déborde régulièrement au-dessus du chemin Saint-Armand. Il y a environ un pied d'eau par-dessus une section du chemin Saint-Armand environ 12 heures par année. Ce chemin est une route provinciale sous compétence du ministère des Transports du Québec (MTQ). Le MTQ a contacté la municipalité en 2012 pour surélever le chemin afin d'éviter qu'il soit inondé. La municipalité a refusé, craignant que cela déplace le problème d'inondation et augmente un problème d'érosion en aval.
- Lorsqu'un arbre tombe, cela fait du dommage sur la rive opposée, ça peut boucher les ponceaux. La municipalité et les propriétaires peuvent présentement intervenir afin de retirer les obstructions au libre écoulement de l'eau, comme les arbres tombés et les branches. Plusieurs personnes se sont prononcées pour pouvoir continuer à nettoyer les rives.
- Le comportement de la rivière a changé, il y a plus d'eau acheminée plus rapidement vers la rivière.
- Les propriétaires payent des taxes sur la rivière, sur ses rives et sur les portions de terrain qui ne sont pas cultivables.
- Un agriculteur, le seul qui fait présentement des cultures à grand interligne (maïs et soja), mentionne qu'il s'agit de terres très productives mais il serait d'accord pour céder ses terres en conservation, moyennant une compensation équivalente au prix du marché.
- Les producteurs les plus en aval mentionnent que les terres inondables sont difficiles à travailler, qu'il est souvent impossible d'entrer dans le champ avant le début de l'été. La production est ainsi limitée à du foin, et s'il y a inondation durant la saison de

croissance, il y a dépôt argileux et les animaux refusent de s'alimenter avec ce foin poussiéreux.

- Auparavant, il existait la Loi des trois chaînes : en vertu d'une vieille Loi datant de 1884, le gouvernement du Québec possédait 198 pi (61 m) sur les terres de la couronne concédées de part des cours d'eau et lacs non navigables. Le gouvernement Bourassa avait alors, par amendement législatif en 1988, renoncé son droit de propriété sur les abords de cours d'eau.

Des questions ont aussi été posées relativement aux dispositions réglementaires qui pourraient être mises en place dans l'espace de liberté.

Du point de vue de l'interdiction de construire des infrastructures permanentes dans l'espace de liberté, personne ne s'objecte. Cela semble relever de l'évidence, les personnes présentes connaissent leur terre et personne n'aurait l'idée saugrenue de construire à l'intérieur des limites de l'espace de liberté. De plus, il ne s'agit essentiellement de terres en zone verte, où les constructions sont assujetties à une autorisation de la Commission de protection du territoire agricole (CPTAQ).

Au niveau d'une interdiction potentielle de stabiliser les berges, les propriétaires veulent conserver le droit de protéger les infrastructures existantes. Autrement, personne n'a soulevé d'objections. Dans le cas de la rivière de la Roche, étant donné les coûts élevés d'une stabilisation de berge, l'investissement ne vaudrait pas la peine pour protéger les terres en culture, car il n'y a que des petites superficies agricoles à protéger (10 ha et moins enclavé dans les recouvrements de méandres) et ces superficies sont difficiles à cultiver.

Comme conclusion, il y a beaucoup de sensibilisation à faire pour expliquer le bien-fondé de la mise en place de l'espace de liberté. En milieu agricole, où les politiques publiques mettent de l'avant la lutte à l'érosion et à la pollution diffuse, la notion de «bons» et de «mauvais» sédiments est source de confusion et doit être bien expliquée. Suite aux explications données, les participants semblent avoir saisi la pertinence de l'approche.

Vraisemblablement, la mise en place d'une réglementation basée sur les limites de l'espace de liberté ne susciterait pas une forte opposition à Saint-Armand. L'interdiction de construction et même l'interdiction de stabiliser les berges (sauf pour protéger des infrastructures existantes) semblent acceptables aux yeux des participants à la réunion, sans même qu'il y ait compensation.

De plus, étant donné les contraintes liées au travail du sol dans les sections cultivées dans l'espace de liberté, plusieurs propriétaires agricoles accepteraient volontiers de céder ces parcelles de terrain, moyennant une compensation juste, afin de laisser cet espace à l'état naturel.

6. CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET OUVERTURES

Une gestion par espace de liberté des cours d'eau du Québec exige un changement majeur dans nos perceptions des rivières qui, jusqu'à maintenant, ont été considérées comme des entités relativement statiques dans le paysage. Une analyse hydrogéomorphologique indique que tant la mobilité que l'inondabilité font partie de la dynamique des cours d'eau, et que des évidences de cette dynamique se retrouvent aisément dans le paysage ainsi que sur des photographies aériennes historiques.

Ce projet a permis de développer une méthodologie pour cartographier l'espace de liberté qui, parce qu'elle est basée sur trois études de cas dans des contextes géomorphologiques distincts, s'applique à la plupart des rivières du Québec. En divisant l'espace de liberté en deux principaux niveaux (L1 et L2), il sera plus facile d'intégrer ce mode de gestion aux cadres normatifs existants (voir annexe 3 sur les politiques de l'eau). Ce projet a aussi permis d'acquérir des connaissances sur les liens entre la rivière et la nappe. Bien que les résultats n'aient pas permis d'obtenir un portrait clair du rôle hydrologique des milieux humides sur la rivière de la Roche, il est reconnu que ces zones jouent un rôle hydrologique et écologique essentiel dans l'espace de liberté. Il importe donc de protéger les milieux humides existants et de permettre à d'autres de se développer en permettant notamment les recoupements de méandre qui ont souvent été empêchés dans le passé par des mesures de stabilisation.

L'analyse de sensibilité en changements climatiques révèle que la cartographie de l'espace de liberté en climat actuel est robuste et qu'elle serait adéquate en climat futur. L'espace de liberté est donc un moyen efficace d'adaptation qui assure une meilleure résilience des cours d'eau dans le futur. De plus, l'analyse avantages-coûts révèlent que des bénéfices importants pour la société découleront d'une gestion basée sur l'espace de liberté plutôt que sur des interventions répétées de stabilisation de cours d'eau.

Recommandations :

- *Intégrer la cartographie de l'espace de liberté dans les plans d'aménagement des bassins versants*
- *Considérer l'application de la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (PPRLPI) dans les espaces de liberté L1 et L2;*
- *Définir l'espace L1 comme l'espace fonctionnel minimal des cours d'eau, c.-à-d. ne plus permettre de développement dans cette zone, et initier un programme de compensation financière pour les agriculteurs afin d'éliminer les interventions dans le cours d'eau;*
- *Préserver le plus possible les milieux humides riverains et poursuivre la recherche pour quantifier plus précisément leur rôle hydrologique;*
- *Considérer l'espace de liberté L2 dans les schémas d'aménagement afin d'analyser les risques liés aux inondations et à l'érosion de berge avant de permettre un développement;*
- *Prévoir des séances de formation sur les processus hydrogéomorphologiques afin d'assurer une bonne compréhension de la part des propriétaires riverains quant à la dynamique des cours d'eau, en particulier en ce qui a trait à l'érosion naturelle des berges dans les méandres. Une meilleure connaissance de ces phénomènes*

faciliterait l'acceptabilité sociale d'une gestion par espace de liberté, comme en témoigne la rencontre avec les citoyens tenue à Saint-Armand.

Ouvertures

La cartographie de l'espace de liberté requiert une quantité importante de données de terrain et une expertise qui n'est pas toujours disponible. Il serait donc utile de développer des approches semi-automatisées de limites d'espace de liberté qui permettrait de cartographier assez rapidement ces zones sur un grand nombre de cours d'eau. L'accès à des données LiDAR devrait entre autres être préconisée car plusieurs variables hydrogéomorphologiques clés peuvent être extraites à l'aide d'outils SIG simples d'utilisation (Biron *et al.*, sous presse).

La modélisation numérique de l'évolution des méandres par le logiciel RVR-Meander mériterait d'être poussée plus loin que cela n'a été possible dans ce projet, faute de temps. Cet outil permettrait aux gestionnaires de cours d'eau de bien anticiper les changements de tracé de cours d'eau à venir, et de tester différents scénarios, notamment en fonction de points fixes dans le paysage comme des ponts ou des voies ferrées qui forcent une stabilisation de berge.

La modélisation morphodynamique permettrait de mieux saisir l'évolution du lit du cours d'eau pour différents débits dans le futur (zones d'érosion et zones de dépôt). Il serait également pertinent d'évaluer les niveaux d'inondation en réponse aux ajustements morphologiques des cours d'eau. En effet, une augmentation de débit peut générer un ajustement morphologique à la section transversale qui atténuerait l'augmentation des niveaux d'inondation.

La modélisation hydrodynamique telle qu'employée dans ce projet pour l'analyse de sensibilité de l'espace d'inondabilité à des débits changeants pourrait aussi être utilisée pour mieux comprendre les changements potentiels de la capacité d'évacuation avec et sans espace de liberté.

La modélisation numérique des écoulements de surface et souterrains permettrait de simuler le rôle hydrologique des milieux humides, à l'interface de la rivière et de la nappe. Cette modélisation permettrait de tester différents scénarios (surfaces, longueurs, types et disposition spatiale des milieux humides riverains) sur les volumes d'eau apportés par la nappe à la rivière, sur les crues, sur la qualité de l'eau, de même que sur le potentiel de stockage des sédiments.

Idéalement, un projet pilote serait mis en branle dans un cours d'eau de tête en milieu agricole où un espace de liberté serait implanté avec compensation financière pour les agriculteurs. Des mesures de qualité de l'eau et de charge sédimentaire avant l'implantation d'un espace de liberté devraient être prises, de même qu'un suivi prévu sur plusieurs années après la mise en place de l'espace de liberté afin de quantifier les effets, et aussi afin de valider des modèles numériques.

Enfin, l'analyse des services écosystémiques devrait aussi être développée afin de mieux intégrer l'impact de services rendus dans l'ensemble par l'espace de liberté. Dans cette étude, l'approche par transfert de valeur a été employée pour quantifier les bénéfices de bandes

riveraines élargies, mais ces valeurs devraient être mieux quantifiées localement, notamment dans le bassin de la rivière Yamaska dont les problèmes chroniques de qualité de l'eau ne sont plus à démontrer. Il est tout à fait probable que les résultats d'une analyse plus détaillée des services écosystémiques montreraient avec encore plus de force les bénéfices à long terme pour la société d'adopter l'espace de liberté comme mode de gestion des cours d'eau.

7. RÉFÉRENCES

Abad, J. D., et M. H. Garcia. 2006. «RVR Meander: A toolbox for re-meandering of channelized streams». *Computers and Geosciences*, vol. 32, no 1, p. 92-101.

Alexander, R. B., A. H. Elliott, U. Shankar et G. B. McBride. 2002. «Estimating the sources and transport of nutrients in the Waikato River Basin, New Zealand». *Water Resources Research*, vol. 38, no 12, p. 41-423.

Arnaud-Fassetta, G., L. Astrade, E. Bardou, J. Corbonnois, D. Delahaye, M. Fort, E. Gautier, N. Jacobs, J. L. Peiry, H. Piégay et M. J. Penven. 2009. «Fluvial geomorphology and flood-risk management». *Géomorphologie fluviale et gestion des risques fluviaux*, vol. 2, p. 109-128.

Arrigoni, A. S., G. C. Poole, L. A. K. Mertes, S. J. O'Daniel, W. W. Woessner et S. A. Thomas. 2008. «Buffered, lagged, or cooled? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels». *Water Resources Research*, vol. 44, no 9.

Baker, V.R. 1976. «Hydrogeomorphic methods for the regional evaluation of flood hazards». *Environmental Geology*, vol. 1, no 5, p. 261-281.

Ballais, J.L., S. Chave, N. Dupont, É. Masson et M. J. Penven. 2011. La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables. *Physio-Géo*: 168 p.

Ballais, J.L., G. Garry et M. Masson. 2005. «Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation: le cas du Midi méditerranéen français». *Géoscience*, vol. 337, p. 1120-1130.

Baptist, M. J., W. E. Penning, H. Duel, A. J. M. Smits, G. W. Geerling, G. E. M. van der Lee et J. S. L. van Alphen. 2004. «Assessment of the effects of cyclic floodplain rejuvenation on flood levels and biodiversity along the Rhine river». *River Research and Applications*, vol. 20, no 3, p. 285-297.

Barnaud, G., et E. Fustec. 2007. *Conserver les milieux humides: pourquoi? comment?*. Educagri Editions.

Baskaran, S., R. S. Brodie, T. Ransley et P. Baker. 2009. «Time-series measurements of stream and sediment temperature for understanding river-groundwater interactions: Border Rivers and Lower Richmond catchments, Australia». *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 56, no 1, p. 21-30.

Beaulieu, J., F. Daigle, F. Gervais, S. Murray et C. Villeneuve. 2010. Rapport synthèse de la cartographie détaillée des milieux humides du territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal. Canards Illimités Québec et Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs -Direction du patrimoine écologique et des parcs. Québec: 60 p.

Beedel, M.J., J. Morris et T. M. Hess. 2011. Mobilising the Contribution of Rural Land Management to Flood Risk Management in Scotland. Report to Scottish Government, CR/2010/14. Smiths Gore, Peterborough.

Benito, G., M. Lang, M. Barriendos, M.C. Llasat, F. Francés, T. Ouarda, V. Thorndycraft, Y. Enzel, A. Bardossy et D. Coeur. 2008. «Use of systematic, paleoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation - Review of scientific methods». *Natural Hazards*, vol. 31, no 3, p. 623-643.

Bird, D., A. Pannard, Y. Prairie et P. Chevalier. 2009. Changements climatiques au Québec méridional: Conséquences des changements climatiques sur le comportement et la prolifération des cyanobactéries au Québec, Institut national de santé publique du Québec.

Biron, P. M., T. Buffin-Bélanger, S. Demers et T. Olsen. 2013. Assessing human and natural impacts on the hydrogeomorphological trajectory of a non equilibrium river system. European Geosciences Union General Assembly, 7 au 12 avril 2013. Vienne, Autriche.

Biron, P. M., G. Choné, T. Buffin-Bélanger, S. Demers et T. Olsen. sous presse. «Improvement of streams hydrogeomorphological assessment using LiDAR DEMs». *Earth Surface Processes and Landforms*.

Bisson, J.L., et F. Roberge. 1983. Prévisions des apports naturels: expérience d'Hydro-Québec. Atelier sur les prévisions de débit, Toronto.

Bourdillon, R., S. Ricard, D. Roussel, R. Turcotte et J.F. Cyr. 2011. Impacts des changements climatiques sur le régime hydrique québécois. Rapport de l'état des connaissances. Québec, Division de l'hydrologie et de l'hydraulique du Centre d'expertise hydrique du Québec: 137 p.

Bourgault, M.A., M. Larocque et M. Roy. soumis. «Simulation of aquifer-petland-river interactions under climate change». *Hydrology Research*.

Brierley, G.J., et K.A. Fryiers. 2005. *Geomorphology and River Management - Applications of the River Styles Framework*. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 398 p.

Brouillet, L., F. Coursol, S.J. Meades, M. Favreau, M. Anions, P. Bélisle et P. Desmet. 2010. VASCAN, la Base de données des plantes vasculaires du Canada En ligne. <<http://data.canadensys.net/vascan/>>.

Brunke, M., et T. Gonser. 1997. «The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater». *Freshwater Biology*, vol. 37, no 1, p. 1-33.

Bullock, A., et M. Acreman. 2003. «The role of wetlands in the hydrological cycle». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 7, no 3, p. 358-389.

Butturini, A., S. Bernal, S. Sabater et F. Sabater. 2002. «The influence of riparian-hyporheic zone on the hydrological responses in an intermittent stream». *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol. 6, no 3, p. 515-526.

Cabezas, A., M. Gonzalez-Sanchís, B. Gallardo et F. A. Comín. 2011. «Using continuous surface water level and temperature data to characterize hydrological connectivity in riparian wetlands». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 183, no 1-4, p. 485-500.

CEHQ. 2012. Atlas 2012 illustrant les impacts des changements climatiques sur le régime hydrique des tributaires du fleuve Saint-Laurent à l'horizon 2050: 109 p.

----- . 2013a. «Fiche signalétique de la station 1-030425». En ligne. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/fiche_station.asp?NoStation=030425>. Consulté le 20 février 2013.

----- . 2013b. «Fiche signalétique de la station 2-030314». En ligne. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/depot/historique_donnees/fichier/030314_Q.txt>. Consulté le 20 février 2013.

----- . 2013c. «Fiche signalétique de la station 3-021601». En ligne. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/fiche_station.asp?NoStation=021601>. Consulté le 19 février 2013.

Choné, G. 2013. 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. Mémoire de maîtrise, M. Sc. Géographie, urbanisme et environnement. Université Concordia, Montréal: 113 p.

Cloutier, C.A., T. Buffin-Bélanger et M. Larocque. en prép. «On the quantification of groundwater floodwave propagation and groundwater flooding in a gravelly floodplain».

COGEBY. 2010. Portrait du bassin versant de la rivière Yamaska, version 2007, mise à jour, juin 2010. Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Yamaska. Conseil de gestion du bassin versant de la Yamaska: 227 p.

Cole, C. A., R.P. Brooks et D.H. Wardrop. 1997. «Wetland hydrology as a function of hydrogeomorphic (HGM) subclass». *Wetlands*, vol. 17, no 4, p. 456-467.

Cook, P. G., C. Wood, T. White, C. T. Simmons, T. Fass et P. Brunner. 2008. «Groundwater inflow to a shallow, poorly-mixed wetland estimated from a mass balance of radon». *Journal of Hydrology*, vol. 354, no 1-4, p. 213-226.

CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis. 2005. Cost-benefit analysis of Room for Rivers. Part 1: Flood protection.

Cronin, C.M. 1977. «Late-Wisconsin marine environments of the Champlain Valley (New York, Quebec)». *Quaternary Research*, vol. 7, p. 238-253.

Datry, T., M. J. Dole-Olivier, P. Marmonier, C. Claret, J. F. Perrin, M. Lafont et P. Breil. 2008a. «La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau». *Ingénieries-EAT*, no 54.

Datry, T., M.R. Scarsbrook, S.T. Larned et G. Fenwick. 2008b. «Lateral and longitudinal patterns within the stygoscape of an alluvial river corridor». *Fundamental and Applied Limnology*, vol. 171, p. 335-347.

David, P.P, et J. Lebuis. 1985. «Glacial maximum and deglaciation of western Gaspé, Québec, Canada». In *Late Pleistocene History of Northeastern New England and adjacent Québec, Special Paper 197*, H.W. Borns, p. 85-109: Geological Society of America.

Demers, S., et T. Buffin-Bélanger. 2011. «Segmentation morfo-sédimentaire de la rivière Neigette (Québec) selon la sensibilité aux ajustements morphologiques». *Géographe canadien*, vol. 55, p. 318-333.

Demers, S., J. Dubé, T. Olsen, T. Buffin-Bélanger et F. Morneau. 2009. Cartographie hydrogéomorphologique pour l'évaluation des aléas fluviaux dans la vallée de la rivière Cap-Chat et de la rivière Verte. Rapport remis au Ministère de la sécurité publique: 70 p.

Dennis, J.G. 1964. The geology of the Enosburg Area, Vermont. Vermont Geological Survey Bulletin No. 23. Montpelier, VT, Vermont Development Department.

Dennison, M. S., et J. F. Berry. 1993. *Wetlands: Guide to science, law, and technology*. William Andrew Publishing.

Dionne, J.C., et D. Coll. 1995. «Le niveau marin relatif dans la région de Matane (Québec), de la déglaciation à nos jours». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 49, p. 363-380.

Dubé-Loubert, H., M. Parent et A. Brazeau. 2011. Initiative cartographique Quaternaire dans le cadre de la caractérisation régionale des aquifères pour les bassins contigus des rivières Richelieu, Yamaska et de la Baie Missisquoi. GeoHydro - Août 2011. Québec, Québec.

Dubois, M., J.F. Martel, C. D'Auteuil, G.P. Prichonnet et M. Laithier. 2011. Le portrait du bassin versant de la baie Missisquoi. Document 3 du Plan directeur de l'eau. Organisme de bassin versant de la baie Missisquoi: 180 p.

Dufour, S., et H. Piégay. 2009. «From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits». *River Research and Applications*, vol. 25, no 5, p. 568-581.

Environnement Canada. 2013a. Normales climatiques 1971-2000 - 1-Philipsburg En ligne. <http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?stnID=5431&prov=&lang=f&dCode=1&dispBack=1&StationName=Philipsburg&SearchType=Contains&province=ALL&provBut=&month1=0&month2=12>. Consulté le 20 février 2013.

----- 2013b. Normales climatiques 1971-2000 - 2-Brome En ligne. <http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?stnID=5325&prov=&lang=f&dCode=1&dispBack=1&StationName=brome&SearchType=Contains&province=ALL&provBut=&month1=0&month2=12>. Consulté le 20 février 2013.

------. 2013c. Normales climatiques 1971-2000 - 3-Farnham En ligne. <http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?stnID=5358&prov=&lang=f&dCode=4&dispBack=1&StationName=farnham&SearchType=Contains&province=ALL&provBut=&month1=0&month2=12>. Consulté le 20 février 2013.

------. 2013d. Normales climatiques 1971-2000 - 4-St-René-de-Matane En ligne. <http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?stnID=5870&prov=&lang=f&dCode=5&dispBack=1&StationName=st-ren%E9-de-matane&SearchType=Contains&province=ALL&provBut=&month1=0&month2=12>. Consulté le 20 février 2013.

Eyquem, J., C. Desjarlais et P. M. Biron. 2013. Analyse coûts-avantages. Rapport final Ouranos.

FADQ. 2012. Statistiques Assurance récolte 2012. Financière agricole du Québec En ligne. <http://www.fadq.qc.ca/statistiques_et_taux/statistiques/assurance_recolte/statistiques_annuelles.html>.

Fortin, V. 2000. Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application. Rapport de recherche. Varennes, Institut de recherche d'Hydro-Québec: 68 p.

Fortin, L.-G., Turcotte, R., Pugin, S., Cyr, J.-F., Picard, F. 2007. « Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-François et Aylmer au sud du Québec». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, p. 934-945.

Fossey, M., A. N. Rousseau, S. Savary et A. Royer. 2012. Modeling the hydrology of wetlands and their response to climate change: application to the St. Lawrence Lowlands, Canada. Affiche présentée au Fall meeting of the American Geophysical Union. Décembre 2012. San Francisco, CA.

Fryirs, K.A., et G.J. Brierley. 2013. *Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 345 p.

Gariépy, L. 2008. «Une réaction en chaîne dévastatrice». *Résilience*, vol. 3, no 1, p. 11-12.

Ghermandi, A., J. C. J. M. Van Den Bergh, L. M. Brander, H. L. F. De Groot et P. A. L. D. Nunes. 2010. «Values of natural and human-made wetlands: A meta-analysis». *Water Resources Research*, vol. 46, no 12.

Groupe AGÉCO. 2012. Valeur des terres agricoles dans les régions du Québec - Édition 2012 En ligne. <http://www.groupeageco.ca/fr/pdf/stat/vale_terre12.pdf>.

Hammer, Ø, D. A. T. Harper et P. D. Ryan. 2001. «Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis». *Palaeontologia Electronica*, vol. 4, no 1.

Hancock, P. J., A. J. Boulton et W. F. Humphreys. 2005. «Aquifers and hyporheic zones: Towards an ecological understanding of groundwater». *Hydrogeology Journal*, vol. 13, no 1, p. 98-111.

Harvey, J. W., et K. E. Bencala. 1993. «The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments». *Water Resources Research*, vol. 29, no 1, p. 89-98.

Hayashi, M., et G. Van Der Kamp. 2009. «Progress in scientific studies of groundwater in the hydrologic cycle in Canada, 2003-2007». *Canadian Water Resources Journal*, vol. 34, no 2, p. 177-186.

Hayashi, M., et D. O. Rosenberry. 2002. «Effects of Ground Water Exchange on the Hydrology and Ecology of Surface Water». *Ground Water*, vol. 40, no 3, p. 309-316.

He, J., J.-P. Reverêt, F. Moffette, J.-P. Boyer et J. Dupras. 2013. Utilisation d'une méta-analyse pour le transfert de bénéfices: Étude de cas des milieux humides des bassins versants des rivières Yamaska et Bécancour. Rapport remis à Ouranos dans le cadre du projet « Outils d'analyses hydrologique, économique et spatiale des services écologiques procurés par les milieux humides des basses-terres du Saint-Laurent: adaptation aux CC », Écosystème et Biodiversité et Changements climatiques, PACC-26: 28 p.

Hegman, W., D. Wang et C. Borer. 1999. Estimation of Lake Champlain basinwide nonpoint source phosphorus export. Lake Champlain Basin Program Technical Report No 31.

Hooke, J. 2003. «River meander behaviour and instability: a framework for analysis». *Transactions of the Institute of British Geographers*, vol. 28, no 2, p. 238-253.

Huard, D., et D. Chaumont. 2011. Extrêmes de précipitations en climat futur sur les régions agricoles du Québec. Montréal, Ouranos: 65 p.

Isaak, D. J., S. Wollrab, D. Horan et G. Chandler. 2012. «Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest U.S. from 1980-2009 and implications for salmonid fishes». *Climatic Change*, vol. 113, no 2, p. 499-524.

ISQ. 2012. «Profil des régions et des MRC - Brome-Missisquoi». Institut de la statistique du Québec. En ligne. <http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/profils/region_16/region_16_00.htm>.

----- . 2013. Estimation de la population des MRC et des territoires équivalents (découpage géographique au 1er janvier 2013). Institut de la statistique du Québec En ligne. <http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/demographie/dons_regnl/regional/mrc_total.htm>.

Jarret, R.D., et J.F. Jr. England. 2002. «Reliability of paleostage indicators for paleoflood studies». In *Ancient floods, modern hazards: principles and applications of paleoflood hydrology*, P.K. House, R.H. Webb, V.R. Baker et D.R. Levish, p. 91-109.

Katosky, A., et F. Marical. 2011. Évaluation économique des services rendus par les zones humides - Complémentarité des méthodes de monétarisation. Commissariat Général du Développement Durable: 46 p En ligne. <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ED50.pdf>>.

Kilpatrick, F.A., et H.H. Barnes. 1964. Channel geometry of Piedmont streams as related to frequency of floods. U.S. Geological Survey Professional Paper 422-E: 10 p.

Kline, M., et B. Cahoon. 2010. «Protecting river corridors in Vermont». *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 46, no 2, p. 227-236.

Kline, M., et K. Dolan. 2008. River corridor protection guide. Fluvial geomorphic-based methodology to reduce flood hazards and protect water quality. Waterbury, VT, Vermont Agency of Natural Resources: 23 p.

Krause, S., A. Bronstert et E. Zehe. 2007. «Groundwater-surface water interactions in North German lowland floodplain - Implications for river discharge dynamics and riparian water balance». *Journal of Hydrology*, vol. 347, no 3-4, p. 404-417.

Laforce, S. 2008. Cartographie des zones inondables dans un contexte de changements climatiques: cas de la rivière du Nord à Lachute. M. Sc. École de Technologie supérieure, Montréal: 318 p.

Laforce, S., M. C. Simard, R. Leconte et F. Brissette. 2011. «Climate change and floodplain delineation in two southern quebec river basins». *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 47, no 4, p. 785-799.

Lane, S. N., V. Tayefi, S. C. Reid, D. Yu et R. J. Hardy. 2007. «Interactions between sediment delivery, channel change, climate change and flood risk in a temperate upland environment». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, no 3, p. 429-446.

Lavigne, M. A., M. Nastev et R. Lefebvre. 2010. «Numerical simulation of groundwater flow in the Chateaugay River Aquifers». *Canadian Water Resources Journal*, vol. 35, no 4, p. 469-486.

Le Pharillon. 2008. «Québec souligne le premier anniversaire des inondations de Rivière-au-Renard». *Le Pharillon*, le mercredi 13 août 2008.

Lebuis, J. 1973a. Géologie du Quaternaire sur la région de Matane - Amqui, comtés de Matane et de Matapédia. Rapport géologie préliminaire DP-216. Québec, Ministère des Richesses naturelles: 18 p.

Lebuis, J., et P.P David. 1977. «La stratigraphie et les événements du Quaternaire de la partie occidentale de la Gaspésie, Québec». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 31, p. 275-296.

Lefebvre, K., F. Barbecot, B. Ghaleb, M. Larocque et S. Gagné. 2013. «Full range determination of ^{222}Rn at the watershed scale». *Applied Radiation and Isotopes*.

Levish, D.R. 2002. «Paleohydrologic bounds: non-exceedance information for flood hazard assessment». In *Ancient floods, modern hazards: principles and applications of paleoflood hydrology*, P.K. House, R.H. Webb et V.R. Levish, p. 175-190.

Magdaleno, F., et J. A. Fernández-Yuste. 2011. «Meander dynamics in a changing river corridor». *Geomorphology*, vol. 130, no 3-4, p. 197-207.

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.

MAPAQ. 2002. Utilisation du sol: classification Landsat 30 mètres de résolution. des Pêches et de l'Alimentation du Québec Ministère de l'Agriculture.

Marchand, J.P., T. Buffin-Bélanger et B. Héту. en prép.

Masson, M., G. Garry et J.L. Ballais. 1996. Cartographie des zones inondables: approche hydrogéomorphologique. Ministère de l'Équipement et ministère de l'Environnement. Paris La Défense, Les éditions Villes et Territoires: 100 p.

MDDEP. 1987. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, c. Q-2, r. 17.3 dans le cadre de la Loi sur la qualité de l'environnement (L.R.Q., c. Q-2, a. 2.1). Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs. Québec, Publications du Québec.

------. 2005. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Québec: 12 p En ligne. <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/rives/politique.pdf>>.

------. 2006. Identification et délimitation des écosystèmes aquatiques, humides et riverains. Guide d'analyse des projets d'intervention dans les écosystèmes aquatiques, humides et riverains assujettis à l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement. Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs. Québec: 15 p.

------. 2011. Cartographie des milieux humides potentiels. Structure physique des données, Gouvernement du Québec: 10 p.

------. 2012. Cartographie détaillée des milieux humides des Basses terres du Saint-Laurent et de la plaine du lac Saint-Jean - Structure physique des données. Projet de collaboration MDDEP et Canards Illimités Québec, Gouvernement du Québec.

Mearns, L. O., R. Arritt, S. Biner, M. S. Bukovsky, S. McGinnis, S. Sain, D. Caya, J. Correia Jr, D. Flory, W. Gutowski, E. S. Takle, R. Jones, R. Leung, W. Moufouma-Okia, L. McDaniel, A. M. B. Nunes, Y. Qian, J. Roads, L. Sloan et M. Snyder. 2012. «The north american regional climate change assessment program overview of phase I results». *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, no 9, p. 1337-1362.

Mehrtens, C.M., et R.J. Dorsey. 1987. Stratigraphy and bedrock geology of the Northwestern portion of the St. Albans quadrangle and the adjacent Highgate Center quadrangle, Vermont. Vermont Geological Survey Special Bulletin No 9: 28 p.

MENV. 1989. Cartographie des zones inondables, rivière Matane, à Matane. Rapport MH-89-07. Ministère de l'Environnement - Direction du milieu hydrique: 15 p.

----- . 2004. Programme de détermination des cotes de crues de récurrence de 20 ans et de 100 ans (PDCC), rivière Matane, municipalité de Saint-René-de-Matane. Rapport PDCC 01-003. Ministère de l'Environnement - Centre d'expertise hydrique du Québec - Service de la connaissance et de l'expertise hydrique: 26 p.

Michalkova, M., H. PieGay, G. M. Kondolf et S. E. Greco. 2011. «Lateral erosion of the Sacramento River, California (1942-1999), and responses of channel and floodplain lake to human influences». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 36, no 2, p. 257-272.

Mitsch, W. J., et J. G. Gosselink. 2007. *Wetlands*, 4e éd. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Moisan, C. 2011. Végétation des milieux humides de la rivière de la Roche. Rapport soumis à Marie Larocque, dans le cadre du projet Espace de liberté. Institut de recherche en biologie végétale (IRBV): 19 p.

Morley, T. R., A. S. Reeve et A. J. K. Calhoun. 2011. «The Role of Headwater Wetlands in Altering Streamflow and Chemistry in a Maine, USA Catchment1». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 47, no 2, p. 337-349.

Mpelasoka, F. S., et F. H. S. Chiew. 2009. «Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, no 5, p. 1168-1183.

MRC de Matane. 2009. Gestion intégrée de l'eau - Bassin versant de la rivière Matane. En ligne. <http://www.mrcdematane.qc.ca/services_gestion_eau.html>.

Music, B., et D. Caya. 2007. «Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River Basin a simulated by the Canadian regional climate model (CRCM)». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, no 5, p. 969-988.

Nanson, G.C., et J.C. Croke. 1992. «A genetic classification of floodplains». *Geomorphology*, vol. 4, p. 459-486.

Nash, J.E., et J.V. Sutcliffe. 1970. «River flow forecasting through conceptual models». *Journal of Hydrology*, vol. 10, no 3, p. 282-290.

Nijssen, B., G. M. O'Donnell, A. F. Hamlet et D. P. Lettenmaier. 2001. «Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change». *Climatic Change*, vol. 50, no 1-2, p. 143-175.

Ollerenshaw, N.C. 1967. Cuoq-Langis area, Matane and Matapédia counties. Geological Report 121. Department of Natural Resources. Québec.

Ollero, A. 2010. «Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain». *Geomorphology*, vol. 117, no 3-4, p. 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.

Pagneux, E., G. Gisladottir et A. Snorrason. 2010. «Inundation extent as a key parameter for assessing the magnitude and return period of flooding events in southern Iceland». *Hydrological Sciences Journal*, vol. 55, p. 704-716.

Palmer, M. A., D. P. Lettenmaier, N.L. Poff, S.L. Postel, B. Richter et R. Warner. 2009. «Climate change and river ecosystems: protection and adaptation options». *Environmental management*, vol. 44, no 6, p. 1053-1068.

Palmer, M. A., C. A. Reidy Liermann, C. Nilsson, M. Flörke, J. Alcamo, P. S. Lake et N. Bond. 2008. «Climate change and the world's river basins: Anticipating management options». *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 6, no 2, p. 81-89.

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

Parker, C., N.J. Clifford et C.R. Thorne. 2011. «Understanding the influence of slope on the threshold of coarse grain motion: revisiting critical stream power». *Geomorphology*, vol. 126, p. 51-65.

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 and Management*, vol. 13, no 5, p. 433-448.

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*, vol. 21, no 7, p. 773-789.

Prichonnet, G.P. 1984. Dépôts quaternaires de la région de Granby, Québec. Commission géologique du Canada.

Rapp, C.F., et T.B. Abbe. 2003. A framework for delineating channel migration zones. Ecology Publication #03-06-027. Olympia, WA, Washington State Department of Ecology and Department of Transportation: 66 p.

Rousseau, Y. 2010. Assessment of management strategies for a lowland straightened agricultural stream. Mémoire de maîtrise, M. Sc. Géographie. Montréal, Université Concordia: 167 p.

Scheidegger, A.E. 1973. «Hydrogeomorphology». *Journal of Hydrology*, vol. 20, no 193-215.

Schmidt, R., et D. Batker. 2012. Nature's value in the McKenzie watershed: a rapid ecosystem service evaluation . Earth Economics and Eugene Water and Electric Board. Tacoma, WA.

Simard, M. C. 2008. «Caractérisation des impacts des changements climatiques sur les plaines inondables du bassin versant de la rivière Châteauguay». Montréal, École de technologie supérieure, 110 p.

Stewart, D.P. 1974. *Geology for Environmental Planning in the Milton-St. Albans Region, Vermont*. Vermont Geological Survey Environmental Geology No 5. Montpelier, VT, Water Resources Department.

Stewart, D.P., et P. MacClintock. 1969. *The surficial geology and Pleistocene history of Vermont*. Vermont Geological Survey Bulletin No. 31.

Tognetti, S.S., B. Aylward et G.F. Mendoza. 2005. «Markets for watershed services». In *Encyclopaedia of Hydrological Sciences*, M. Anderson. UK: John Wiley & Sons.

Uchida, T., Y. Asano, N. Ohte et T. Mizuyama. 2003. «Seepage area and rate of bedrock groundwater discharge at a granitic unchanneled hillslope». *Water Resources Research*, vol. 39, no 1, p. 1018.

UQCN. 2005. *La gestion du territoire et des activités agricoles dans le cadre de l'approche par bassin versant - Bassin versant de la baie Mississquoi*. Rapport présenté en mars 2005 au ministère de l'Environnement du Québec. Union québécoise pour la conservation de la nature: 24 p.

VANR. 2010. *A Guide to River Corridor Easements*. Department of Environmental Conservation Vermont Agency of Natural Resources: 31 p. En ligne. <http://www.vtwaterquality.org/rivers/docs/rv_RiverCorridorEasementGuide.pdf>.

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». *Hydrological Processes*, vol. 25, no 10, p. 1558-1573.

Vinet, F. 2010. *Le risque inondation - Diagnostic et gestion*. Coll. «Sciences du risque et du danger»: Tec & Doc Lavoisier, 328 p.

Warwick, J., et A. R. Hill. 1988. «Nitrate depletion in the riparian zone of a small woodland stream». *Hydrobiologia*, vol. 157, no 3, p. 231-240.

Wasklewicz, T. A., S. Anderson et P. S. Liu. 2004. «Geomorphic context of channel locational probabilities along the Lower Mississippi River, USA». *Geomorphology*, vol. 63, no 3-4, p. 145-158.

Winter, Thomas C. 1999. «Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems». *Hydrogeology Journal*, vol. 7, no 1, p. 28-45.

Woessner, William W. 2005. «Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrogeologic thought». *Ground Water*, vol. 38, no 3, p. 423-429.

Wohl, E., et D.J. Merritt. 2007. «What is a natural river?». *Geography Compass*, vol. 1, no 4, p. 871-900.

Wolman, M.G. 1971. «Evaluating alternative techniques of flood plain mapping». *Water Resources Research*, vol. 7, no 6, p. 1383-1392.

Wroblicky, Gregory J., Michael E. Campana, H. Maurice Valett et Clifford N. Dahm. 1998. «Seasonal variation in surface-subsurface water exchange and lateral hyporheic area of two stream-aquifer systems». *Water Resources Research*, vol. 34, no 3, p. 317-328.