

**Étude hydrogéomorphologique d'un cours d'eau
influencé par des barrages de castor (*Castor canadensis*)
et analyses des contraintes migratoires pour le saumon
atlantique (*Salmo salar*) dans la rivière Ouelle**



ÉQUIPE DE RÉALISATION

Superviseur :	Maxime Boivin, Ph. D. géographie Hydrogéomorphologue UQAC
Chargé de projet :	Johan Bérubé, M.Sc. géographie hydrogéomorphologue Université du Québec à Chicoutimi
Rédaction et analyse	Johan Bérubé, M.Sc. géographie hydrogéomorphologue Maxime Boivin, Ph. D. géographie hydrogéomorphologue
Aide sur le terrain	Véronique Furois, Chargée de projets OBAKIR Maxime Boivin, Ph. D. géographie Hydrogéomorphologue UQAC
Cartographie et figures :	Johan Bérubé, M.Sc. géographie hydrogéomorphologue UQAC
Révision de fond et partenaire local :	Véronique Furois, Chargée de projets OBAKIR

Supports financiers :

- **Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR)**
- **Fondation de la Faune du Québec (FFQ)**
- **La Fondation pour la conservation du saumon atlantique (FCSA)**
- **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)**
- **Laboratoire d'expertise et de recherche en géographie appliquée - LERGA (UQAC)**

Référence à citer :

Bérubé, Johan et Boivin, Maxime. 2021. Étude hydrogéomorphologique d'un cours d'eau influencé par des barrages de castor (*Castor canadensis*) et analyses des contraintes migratoires pour le saumon atlantique (*Salmo salar*) dans la rivière Ouelle. Rapport de recherche présenté à l'Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR). Laboratoire d'expertise et de recherche en géographie appliquée. LERGA-UQAC. 83 pages et annexes.

Page de couverture : Vue oblique de la portion amont d'un barrage de Castor sur la Grande Rivière, tributaire de la rivière Ouelle. Automne 2021.

Table des matières

I	INTRODUCTION	1
a.	<i>Objectif général et objectifs spécifiques</i>	2
II	CADRE THÉORIQUE	3
a.	<i>L'hydrogéomorphologie et la trajectoire hydrogéomorphologique</i>	3
b.	<i>La dynamique des barrages de castor et son interaction avec l'hydrogéomorphologie</i>	8
i.	<i>Caractéristiques des barrages de castor</i>	9
ii.	<i>Conditions d'implantation</i>	10
iii.	<i>Impact de la dynamique des barrages de castor sur l'hydrogéomorphologie</i>	13
c.	<i>Le castor, ses effets sur la diversité morphologique, sur les habitats lotiques et sa cohabitation avec le saumon atlantique</i>	16
i.	<i>Effets sur la diversité morphologique et les habitats lotiques</i>	17
i.	<i>Les enjeux de gestion et sa cohabitation avec le saumon atlantique</i>	20
III	CADRE MÉTHODOLOGIQUE	24
a.	<i>Contexte géographique et présentation du corridor fluvial à l'étude</i>	24
a.	<i>Caractérisation et segmentation fluviale</i>	27
b.	<i>Analyses de la trajectoire hydrogéomorphologique et hydrologique</i>	29
i.	<i>Suivi et analyse de la trajectoire HGM</i>	29
ii.	<i>Analyse de la trajectoire hydrologique de la rivière Ouelle et ses tributaires majeures</i>	31
c.	<i>Dynamique de barrage de castor et de leurs impacts sur l'hydrogéomorphologie</i>	33
IV	RÉSULTATS	34
a.	<i>Caractérisation et segmentation fluviale</i>	34
b.	<i>Analyses de la trajectoire HGM et hydrologique</i>	37
i.	<i>Suivi et analyse de la trajectoire HGM</i>	38
i.	<i>Analyse de la trajectoire hydrologique</i>	39
c.	<i>Analyses des quatre sites de barrages de castor</i>	44
V	DISCUSSION	55
a.	<i>Trajectoire hydrogéomorphologique et hydrologique leur interaction avec la dynamique de barrage</i>	55
b.	<i>Trajectoire hydrologique, la dynamique des barrages et leur effet sur la libre circulation du saumon atlantique</i>	59
i.	<i>Connectivité hydrologique et impacts potentiels des lacs endigués</i>	60
ii.	<i>Influence des barrages de castor sur l'habitat et la migration du saumon</i>	62
c.	<i>Enjeux de gestion, interventions et recommandations proposées</i>	66

<i>i.</i>	<i>Gestion des barrages de castor et du régime hydrologique</i>	67
<i>ii.</i>	<i>Suivi et acquisition de données sur les barrages de castor et le comportement du saumon</i>	69
VI	CONCLUSION	75
VII	Bibliographie	78
	ANNEXES	84
	Annexe 1 : Glossaire géomorphologique (inspiré de Boivin et al., 2019)	85
	Annexe 2 : Photos terrain	89
	Annexe 3 : Photographies aériennes et figures complémentaires	95

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schématisation des composantes de la dynamique fluviale et des différentes interactions (adaptée de Leeder [1983] et Boivin et al., 2019)	4
Figure 2. Schématisation du continuum de la dynamique hydrosédimentaire observé à l'échelle du bassin versant (adaptée de Brierley et Fryirs. 2005)	5
Figure 3. Classification des styles fluviaux selon Church (1992), adaptée de Church (2006)	6
Figure 4. Schématisation de la trajectoire hydrogéomorphologique (adaptée de Dufour et Piégay, 2009). Les connaissances acquises sur les variables de contrôles permettraient d'anticiper deux scénarios de réponses potentielles dans un futur plus ou moins rapproché.	8
Figure 5. Schéma conceptuel montrant l'influence de l'implantation de barrages de castors sur les conditions biophysiques d'un segment de rivière. Les lettres A à D illustrent les différents types d'environnements fluviaux fréquemment observés de l'amont vers l'aval tandis que les deux rangés (1 et 2) montrent les effets avant-après.	17
Figure 6. Schéma conceptuel illustrant l'influence de la dynamique de barrage sur le niveau de la nappe phréatique et le stockage d'eau dans un aquifère libre dans un environnement fluvial (A) avant et (B) après la mise en place d'un barrage (adaptée de Hafen et Macfarlane, 2016).	19
Figure 7. Exemple d'évolution dans le temps d'un tronçon de chenal incisé ayant été aménagé par le castor. La dynamique de barrage, au travers de la succession de construction, croissance et destruction de ses structures, a accéléré les processus d'évolution du chenal. Les processus d'élargissement du lit mineur par l'érosion des berges (a,b et c), d'aggradation du lit (d, e et f) et de reconnexion avec la plaine alluviale (e et f). Il est important de noter que le chenal ne se reconnectera pas nécessairement avec l'ancienne plaine alluviale, mais reconstruira son propre complexe alluvial (tirée de Pollock <i>et al.</i> , 2017).	21
Figure 8. Localisation du corridor fluvial à l'étude à l'échelle du (A) Québec, de (B) l'Est-du-Québec et du (C) bassin versant de la rivière Ouelle	25
Figure 9. Présentation du contexte géographique du corridor fluvial à l'étude. Les encadrés montrent les principaux plans d'eau du bassin versant, leurs superficies et les principaux barrages.	28
Figure 10. Distribution longitudinale des points kilométriques à partir de l'estuaire de la rivière Ouelle (A) et segmentation du corridor fluvial (B). Les barrages de castors observés en 2016 et 2020 dans le segment D sont représentés par des étoiles.	34
Figure 11. Distribution longitudinale du type et de l'état des berges dans la portion nord (A) et sud (B) du segment de méandres stables (segment D) et de son secteur de plaine modelée par le castor situé à l'amont du corridor à l'étude.	36
Figure 12. Distribution longitudinale du type et de l'état des berges dans les segments de la plaine côtière (A), de la transition fluviale et sinueux semi-alluviale (B) présents dans le corridor fluvial de la rivière Ouelle.	37
Figure 13. Évolution historique du lit mineur entre 1963 et 2019 entre les PK 25 et PK39	40
Figure 14. Présentation des séries temporelles du débit spécifique(a) minimal et maximal (b) standardisé par la moyenne annuelle ainsi que le débit journalier de la rivière Ouelle pour la période 1921 à 2020. Les crues de grandes magnitudes ont été identifiées par les flèches.	42
Figure 15. Présentations des (a) conditions hydrométéorologiques, du niveau d'eau relatif de l'Étang de la Décharge en fonction des (b) débits des trois principaux tributaires et de la rivière Ouelle pour la période du 1 ^{er} juillet 2020 au 31 octobre 2020.	43
Figure 16. Distribution longitudinale des barrages de castor caractérisés à l'automne 2020.	45

Figure 17. Distribution spatiale des barrages de castor 1 à 4 le long du profil en long répertoriés en 2020. La ligne bleue pointillée représente l'altitude de la surface de l'eau au moment des levés topographiques tandis que les lignes pleines illustrent l'altitude du lit de la rivière La Grande.	46
Figure 18. Présentation des deux barrages du site du barrage 1. Les photos A et D montrent le barrage du chenal nord (chenal de droite) tandis que les photos B, C et D montrent le barrage du chenal sud (chenal de gauche).	47
Figure 19. Présentation des deux barrages successifs en palier du site du barrage 2. Les photos A, B et C montrent le barrage en amont tandis que la photo D montre le petit barrage en construction à l'aval.	48
Figure 20. Présentation de l'imposant barrage du site de barrage 3. La photo A illustre la fosse profonde en amont du barrage tandis que les photos B et C montrent la portion aval. La photo D montre bien le substrat limoneux avec matière organique qui s'accumule au fond de la fosse en amont.	48
Figure 21. Présentation du site du barrage 4. Les photos A et C montrent respectivement le barrage du site 4 ainsi que la portion en amont du barrage (vue vers l'amont) tandis que la photo B montre le barrage avec une vue vers l'aval. La photo D montre présente le substrat graveleux avec les dépôts de sable et de limons par-dessus le gravier.	50
Figure 22. Photographie oblique par drone illustrant l'influence de l'activité du castor sur la plaine alluviale du site du barrage 1.	50
Figure 23. Photographie oblique par drone illustrant l'influence de l'activité du castor sur la plaine alluviale du site du barrage 2.	51
Figure 24. Photographie oblique par drone illustrant l'influence de l'activité du castor sur la plaine alluviale du site du barrage 3.	51
Figure 25. Photographie oblique par drone illustrant l'influence de l'activité du castor sur la plaine alluviale du site du barrage 4.	52
Figure 26. Comparaison des débits standardisés maximaux pour les bassins versants de la rivière Ouelle (A), Trois-Pistoles (B) et Rimouski (C) entre 1921 et 2020.	58
Figure 27. Comparaison des débits standardisés minimaux pour les bassins versants de la rivière Ouelle (A), Trois-Pistoles (B) et Rimouski (C) entre 1921 et 2020.	58
Figure 28. Modélisation des rivières Ouelle et La Grande (A) des débits moyens, (B) des étiages estivaux et (C) des crues estivales et automnales pour l'horizon 2050 par le CEHQ.	62
Figure 29. Photographies présentant trois différents stades de conditions hydrologiques du barrage 3 observés à l'automne 2020 sur La Grande Rivière. Dans l'ordre : conditions hydrologiques à (A) niveau modéré ($8,3 \text{ m}^3 / \text{s}$), (B) à niveau élevé ($11,2 \text{ m}^3 / \text{s}$) ainsi qu'au lendemain (décrue) d'une crue majeure ($25,3 \text{ m}^3 / \text{s}$).	65
Figure 30. Profil en long du barrage 3 de La Grande Rivière présentant le lit du cours d'eau (trait noir), le niveau d'eau à débit modéré (trait pointillé bleu, $Q_{LG} = 8,3 \text{ m}^3 / \text{s}$) ainsi qu'au lendemain lors de la crue du 19-10-2020 ($Q_{LG} = 25,3 \text{ m}^3 / \text{s}$). Les valeurs de hauteur de chute ont été calculées par la différence entre les niveaux d'eau en amont et aval.	66
Figure 31. Exemple de passe migratoire au niveau d'un barrage de castor (Beaver Institute- https://www.beaverinstitute.org/)	70

Liste des tableaux

Tableau 1. Présentation des plans d'eau endigués et des caractéristiques des barrages localisés dans la portion amont du bassin versant.	26
Tableau 2. Présentation de la variabilité intra-annuelle des précipitations totales moyennes à la station météorologique de La Pocatière (stations no. 7054095 et 7054096) entre 1913 à 2020. Les précipitations solides et liquides ont été regroupées sous les précipitations totales.	27
Tableau 3. Caractéristiques morphodynamiques de chacun des segments présents dans le corridor fluvial à l'étude.	35
Tableau 4. Présentation des caractéristiques des quatre barrages de castor et de l'environnement fluvial immédiat de chacun des sites.	49

RÉSUMÉ

La problématique de la libre circulation du saumon de la rivière Ouelle concerne les conditions hydrologiques et la présence de barrages de castor dans le secteur amont de La Grande Rivière. Les objectifs de l'étude ont consisté à analyser les trajectoires HGM et hydrologique de La Grande Rivière afin d'en évaluer les interactions avec la dynamique des barrages de castor et de tête, ainsi que l'impact sur la libre circulation du saumon atlantique.

La trajectoire HGM illustre une tendance à la stabilité généralisée sur l'ensemble du corridor fluvial à l'étude qui s'explique partiellement par les conditions hydroclimatiques et la résilience de la portion colonisée par le castor en amont de La Grande Rivière. Les tendances hydroclimatologiques historiques entre 1921 et 2020 montrent une variabilité et des cycles sur des périodes de 10-20 ans dans les précipitations totales standardisées, une augmentation des débits spécifiques maximaux pour la période 1968-2020 et une anomalie négative dans les débits spécifiques minimaux pour la période 1987-2020. Néanmoins, les données de précipitations totales ne semblent pas corrélées directement avec les débits de la rivière Ouelle. Ce manque de corrélation peut s'expliquer par la présence de barrages de rétention sur les lac-réservoirs dans la portion amont. Ces derniers drainent une superficie totale de 203,6 km², 24,0% de la superficie totale du bassin versant de la rivière Ouelle. Les barrages de rétention sur les lacs de tête affectent également la réponse hydrologique des tributaires de la rivière Ouelle. Cela se reflète par la différence des délais de réaction et des amplitudes dans les débits des tributaires en fonction de la quantité de précipitations tombées. Ces différences s'expliquent par la taille des barrages et de l'aire de drainage de chacun des lacs endigués qui affectent les seuils de réaction des exutoires. Les tendances hydroclimatologiques illustrant une diminution des débits moyens et minimaux en été (étiages) ainsi qu'une augmentation des crues estivales et automnales concordent avec les prévisions du CEHQ pour l'horizon 2050.

La portion amont de La Grande Rivière est pourvue d'un secteur dont la plaine a été modélisée historiquement par le castor et où l'activité du castor est toujours présente. Cette portion possède cinq barrages qui s'étendent sur environ 5 km du segment. L'impact de ces structures sur la migration anadrome du saumon est moindre en raison des faibles dimensions et de l'occurrence élevée de crues pendant la période de montaison. Le régime hydrologique influencé par la présence de barrages de rétention dans plusieurs des lacs de tête semble davantage affecter le comportement migratoire en raison de la tendance à l'augmentation des périodes avec débits d'étiage, de la durée et de leur sévérité. Les conditions de débits élevées sont cruciales et nécessaires à la fraie du saumon, car elles envoient le signal de montaison aux saumons, favorisent le passage dans les tronçons à faibles profondeurs (segment de transition fluvial et le secteur de la cavée) et ceux possédant des barrages de castor. Par conséquent, les interventions proposées devraient favoriser les conditions nécessaires au maintien des liens hydrologiques entre les habitats présents tout au long du parcours migratoire. Pour ce faire, des modifications devraient être apportées aux barrages de rétention d'eau dans les portions amont de deux sous bassins versants afin de pouvoir utiliser les volumes d'eau stockés pour le rétablissement de liens hydrologiques.

I INTRODUCTION

Les activités de pêche au saumon (*Salmo salar*) sur la rivière Ouelle ont connu des hauts et des bas au fil des dernières décennies. La rivière est ainsi passée par plusieurs problématiques affectant la population de saumons. En effet, les activités d'exploitation forestière et la drave intensives ont mené à la disparition de l'espèce dans la rivière au début du 20^e siècle (Furois, 2016). En 1961, la rivière Ouelle a étéensemencée une première fois et a retrouvé son titre officiel de rivière à saumon. Depuis ce temps, la population ne cesse de subir des pressions d'origine naturelles et/ou anthropiques tout au long du parcours migratoire de l'espèce, soit de son lieu d'hivernage en haute mer (p.ex. pêche excessive, effet des changements climatiques sur la qualité du milieu aquatique) jusqu'à son site de reproduction en rivière (p.ex. braconnage intensif, augmentation de la température de l'eau, dégradation des habitats et de la qualité de l'environnement). Enfin, les ensemencements ont été perpétués jusqu'en 2000 afin de maintenir un seuil de population adéquat frayant dans la rivière Ouelle (Furois, 2016). Cela a permis de maintenir les activités de pêche pendant presque deux décennies sans toutefois régler plusieurs des problématiques connues à ce jour.

Les gestionnaires de la rivière Ouelle, ses utilisateurs et l'Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-de-Loup (OBKIR) ont également observé une augmentation de la température de l'eau (Furois, 2018), de la fréquence et de l'intensité des étiages estivales ainsi que la dégradation de la qualité de plusieurs habitats clés utilisés lors de la migration anadrome (p.ex. refuges thermiques, fosses) (Furois, 2016; 2018). Par conséquent, trois questions affectant la montaison du saumon et la connectivité hydrologique demeurent en suspens: (1) est-ce que le phénomène d'aggradation du lit dans la portion aval qui mène au comblement de fosses ainsi qu'à la coupure de connectivité lors d'étiage sévère affecte la montaison?; (2) est-ce que les barrages au niveau des lacs de tête affectent le régime hydrologique jusqu'au point de causer une coupure de connectivité lors d'étiage?; et (3) est-ce que la présence de barrages de castor (*Castor canadensis*) dans La Grande Rivière, un tributaire important, nuit à la montaison du saumon vers son site de reproduction.

a. Objectif général et objectifs spécifiques

Ces questions ont ainsi incité les gestionnaires (FFQ, MFFP), l'OBAKIR et ses partenaires (FCSA, FQSA) à entreprendre les démarches de valorisation, d'aménagement et de restauration des habitats du saumon atlantique. L'objectif général de ces démarches est d'améliorer et de restaurer l'habitat du saumon atlantique en augmentant la productivité faunique et la qualité des habitats (1), tout en protégeant, ainsi qu'en améliorant la biodiversité du milieu (2).

L'étude **hydrogéomorphologique (HGM)** de La Grande Rivière et l'analyse des contraintes migratoires du saumon atlantique présenté ici contribuent à ces démarches en apportant les connaissances nécessaires et des solutions potentielles face aux problématiques de libre circulation de l'espèce. Pour ce faire, trois objectifs spécifiques sont nécessaires à la compréhension des multiples interactions entre la dynamique fluviale, le comportement migratoire du saumon (*salmo salar*) et sa cohabitation avec le castor du Canada (*Castor canadensis*) :

- **Objectif 1** : Analyser la **trajectoire hydrogéomorphologique (HGM)** de la rivière Ouelle et La Grande Rivière;
- **Objectif 2** : Analyser la **trajectoire hydrologique** et évaluer l'impact sur la connectivité hydrologique du parcours migratoire;
- **Objectif 3** : Analyser l'impact des barrages de castor sur l'hydrogéomorphologie et la libre circulation du saumon.

Le rapport d'étude est divisé en cinq chapitres permettant de mener à terme les différents objectifs de l'étude. Tout d'abord, les chapitres II et III sont dédiés, respectivement, au cadre théorique couvrant l'ensemble des connaissances nécessaires afin de comprendre les notions et les résultats de l'étude, ainsi que la méthodologie utilisée. Ensuite, les résultats de chacun des objectifs de recherche sont présentés dans le chapitre III et discutés dans le chapitre IV. Enfin, les recommandations ainsi que des pistes de solutions sont proposées dans le chapitre V et la conclusion dans le chapitre VI.

II CADRE THÉORIQUE

Les cours d'eau sont des entités dynamiques évoluant constamment dans le temps et l'espace afin d'atteindre un certain état d'équilibre (Leopold et Maddock, 1953; Bracken et Wainwright, 2006). L'état d'équilibre n'est jamais réellement atteint en raison de la fréquence à laquelle les cours d'eau sont soumis aux processus morphodynamiques typiques de la dynamique fluviale (p.ex. migration latérale, incision et aggradation du lit) ainsi qu'aux perturbations (c.-à-d. anthropiques ou naturelles). Par conséquent, l'évolution dans le temps et l'espace du cours d'eau est directement liée aux variations dans la fréquence et l'intensité de ces processus à l'échelle du bassin versant. Par exemple, suite à la linéarisation d'un segment en milieu agricole en amont, un cours d'eau peut sembler très dynamique, instable et s'éroder dans un même tronçon à l'aval pendant une période de 20 ans. Toutefois, ce même cours d'eau peut sembler en état d'alternance et demeurer relativement stable sur une période de plus de 100 ans. Le concept de trajectoire hydrogéomorphologique (HGM) permet d'observer et de ressortir les tendances évolutives et les changements dans l'état d'équilibre d'un cours d'eau sur une période de temps. Ce concept s'applique à l'aide d'une approche hydrogéomorphologique, plus analytique des composantes de l'environnement fluvial.

a. L'hydrogéomorphologie et la trajectoire hydrogéomorphologique

L'hydrogéomorphologie se définit par l'étude des processus, des formes et des rétroactions inhérentes à la dynamique fluviale et de leur évolution à différentes échelles spatiales et temporelles. Cela inclut ainsi l'évolution dans le temps et l'espace des composantes fondamentales de la dynamique fluviale, soit la morphologie du cours d'eau (c.-à-d. les formes), le transport sédimentaire et la structure de l'écoulement (c.-à-d. les conditions hydrauliques et hydrologiques) (Figure 1). Les interactions possibles entre ces composantes sont la clé pour comprendre l'évolution d'un cours d'eau. Par exemple, la hausse des débits couplée à l'augmentation des conditions hydrauliques (structure de l'écoulement) provoque la mise en transport de sédiments emmagasinés au niveau du lit et des berges. Ces processus érosifs et de transport des sédiments apportent une modification au niveau des formes du lit (morphologie) présentes dans le cours d'eau. Les sédiments peuvent alors se déposer en aval à la suite d'une diminution des vitesses d'écoulement pouvant éventuellement résulter en la formation d'un nouveau banc d'accumulation, un changement de direction de l'écoulement vers une berge

meuble, ou bien cela peut contribuer au rehaussement en altitude du lit de la rivière (processus d'**aggradation**).

La création et la modification des formes du lit influencent en retour la structure de l'écoulement en altérant la résistance à l'écoulement, modifiant la pente et provoquant ainsi une augmentation ou réduction des vitesses d'écoulement. Ainsi, l'ensemble de ces trois variables clés influencent la dynamique et la trajectoire d'un système fluvial par des interactions bidirectionnelles (structure de l'écoulement et transport de sédiment, ainsi que pour la morphologie et le transport de sédiments) et unidirectionnelles (morphologie et structure de l'écoulement). Les modifications au niveau morphologique ne peuvent être réalisées uniquement par la structure de l'écoulement, car ces changements sont engendrés par le transport sédimentaire. Finalement, l'ensemble de ces trois composantes vont aussi avoir des interactions avec la mise en place, l'évolution et la destruction de barrages de castor (Figure 1). Ces structures présentes dans les cours d'eau altèrent la dynamique fluviale en modifiant la structure de l'écoulement (p.ex. réduction des vitesses d'écoulement, augmentation de la profondeur d'écoulement), le transport des sédiments (par ex. : sédimentation dans la zone de refoulement) et avec la morphologie (p.ex. formation de séquences seuil-mouille en palier). Dans ce contexte, il est donc essentiel d'inclure ces trois composantes dans une analyse de la dynamique des barrages de castor afin d'établir un diagnostic hydrogéomorphologique complet et d'analyser les modifications potentielles liées à la présence de ce mammifère dans un cours d'eau.

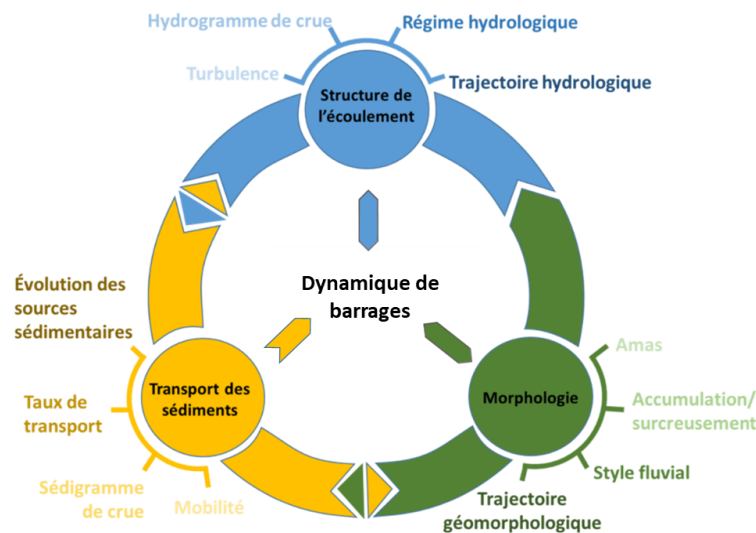


Figure 1. Schématisation des composantes de la dynamique fluviale et des différentes interactions (adaptée de Leeder [1983] et Boivin et al., 2019)

Afin de mieux saisir l'évolution d'un corridor fluvial, la variabilité dans les composantes de la dynamique fluviale doit être considérée sous la forme d'un continuum appliqué à l'échelle du bassin versant. La Figure 2 schématise la variabilité longitudinale dans la dynamique hydrosédimentaire en divisant le système fluvial en trois zones associées aux configurations géométriques d'une vallée fluviale (Schumm, 1977). Ces trois zones comportent différentes caractéristiques morphodynamiques influençant le transport des sédiments de leur source jusqu'à leur évacuation du système. Dans la portion amont, les écoulements sont plus puissants (c.-à-d. puissance spécifique plus élevée) en raison des fortes pentes et de leur faible largeur, ce qui permet la mise en transport de sédiments plus grossiers. Les processus favorisant l'érosion du lit, des berges ainsi que les phénomènes de versant (p.ex. glissement de terrain, coulée de boue, etc.) font de cette section la principale source en sédiments d'un système fluvial. La zone médiane s'avère la zone de transport où les sédiments y sont entreposés temporairement au niveau des bancs d'accumulation et de la plaine alluviale. Cette dernière est fréquemment remaniée par le transport sédimentaire, la migration latérale du chenal principal qui provoque l'érosion et la construction d'une plaine alluviale au fil des crues. La portion aval constitue l'exutoire du système fluvial où l'accumulation y est prédominante en raison de la perte de compétence de l'écoulement. L'accumulation importante de sédiments à cet endroit permet la formation d'un secteur à plusieurs chenaux communément nommée delta.

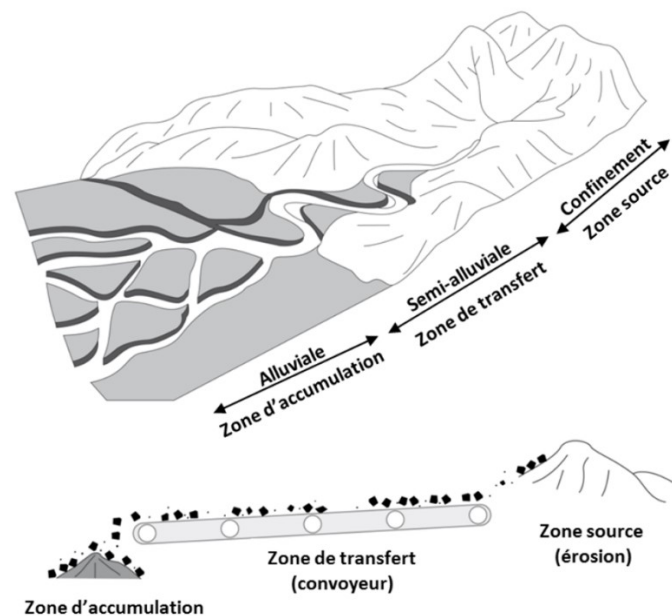


Figure 2. Schématisation du continuum de la dynamique hydrosédimentaire observé à l'échelle du bassin versant (adaptée de Brierley et Fryirs, 2005)

L'assemblage des processus et des caractéristiques morphologiques du corridor fluvial permet également la classification de tronçons de rivière en différents styles fluviaux. La classification de Church (1992) permet d'associer chacun de ses tronçons à des processus morphodynamiques dominant la dynamique fluviale selon plusieurs caractéristiques telles que la pente du chenal, la taille granulométrique, le type de transport et la **puissance spécifique**. La puissance spécifique représente la valeur d'énergie potentielle appliquée par unité de surface (voir équation 1). Elle s'avère une variable discriminante permettant de différencier grossièrement les différents segments et les styles fluviaux tout au long du corridor fluvial (Bernot *et al.*, 1996; Schmitt *et al.*, 2000, Demers et Buffin-Bélangier, 2011). L'identification du style fluvial à partir de l'ensemble des caractéristiques morphodynamiques permet de simplifier la réalité et de comprendre la dynamique fluviale et l'évolution du tronçon à l'échelle locale et du bassin versant (Figure 3).

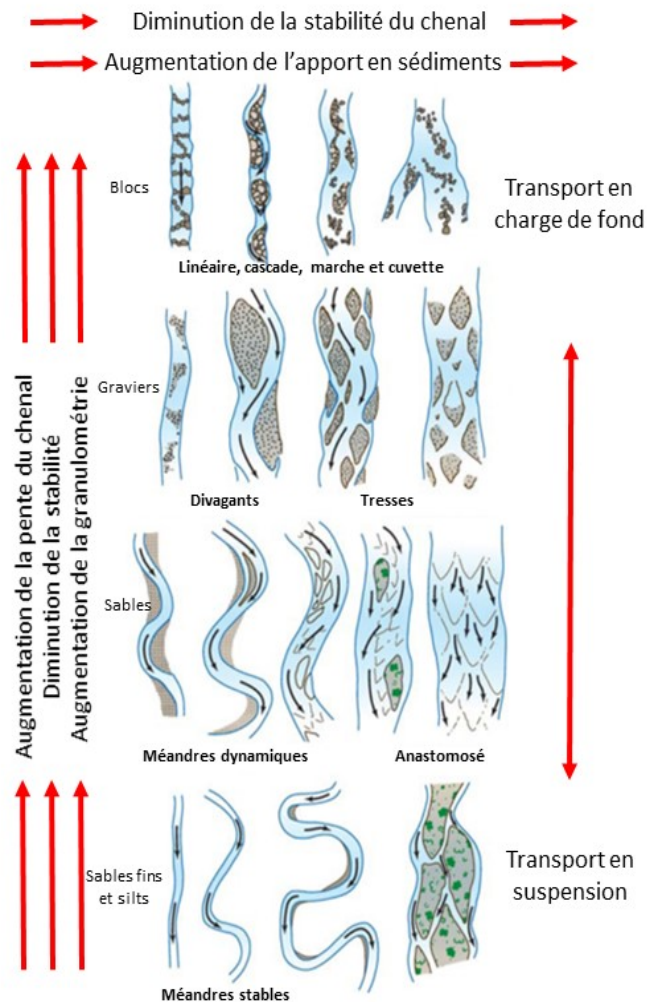


Figure 3. Classification des styles fluviaux selon Church (1992), adaptée de Church (2006)

Le concept de trajectoire hydrogéomorphologique (HGM) permet de ressortir les tendances et les perturbations (naturelles ou anthropiques) dans l'évolution d'un cours d'eau sur une période de temps (Brierley *et al.*, 2008; Dufour et Piégay, 2009). L'analyse de la trajectoire HGM s'effectue à partir de la compréhension de la dynamique fluviale passée et actuelle, de l'évolution de cette dernière dans le temps, et ce, à multiples échelles spatiales (c.-à-d. tronçon, corridor, bassin versant) (Figure 4). Par exemple, la rupture d'un complexe de barrages de castor dans un tronçon sinueux en amont pourrait engendrer un ajustement du système fluvial à l'aval. Cet exemple d'évènement perturbateur pourrait avoir créé des taux de recul considérables au niveau des berges en aval, apporter une grande quantité de sédiments à la rivière, modifier les pentes du lit (c.-à-d. incision ou aggradation) et la rugosité (p.ex. augmentation généralisée de la taille granulométrique). Le système fluvial pourrait, par la suite, s'ajuster progressivement à cet apport en réactivant un ancien chenal abandonné, en créant un (c.-à-d. avulsion) ou des nouveaux chenaux d'écoulement (c.-à- c. changement de style fluvial) pour éventuellement revenir à un style sinueux simple. L'analyse de la trajectoire permet également d'évaluer la sensibilité du cours d'eau face aux perturbations, d'anticiper l'évolution future et de proposer un diagnostic hydrogéomorphologique. Dans l'exemple ci-haut, les connaissances sur la dynamique fluviale acquises (variables de contrôles) à différentes échelles ainsi qu'à différentes époques permettront de proposer deux scénarios, soit la destruction ou la conservation des barrages, en fonction de la vulnérabilité et du risque présent dans la portion aval des barrages.

Enfin, le réajustement face aux perturbations peut être progressif ou s'effectuer suite à une série d'ajustements morphodynamiques. Dans le cas échéant, l'ampleur des ajustements peuvent toutefois s'amenuiser dans le temps, en réponse au retour vers son état antérieur d'équilibre dynamique. Dans le cas d'un réajustement progressif, les ajustements peuvent s'avérer subtils et s'échelonner sur une plus longue période de temps.

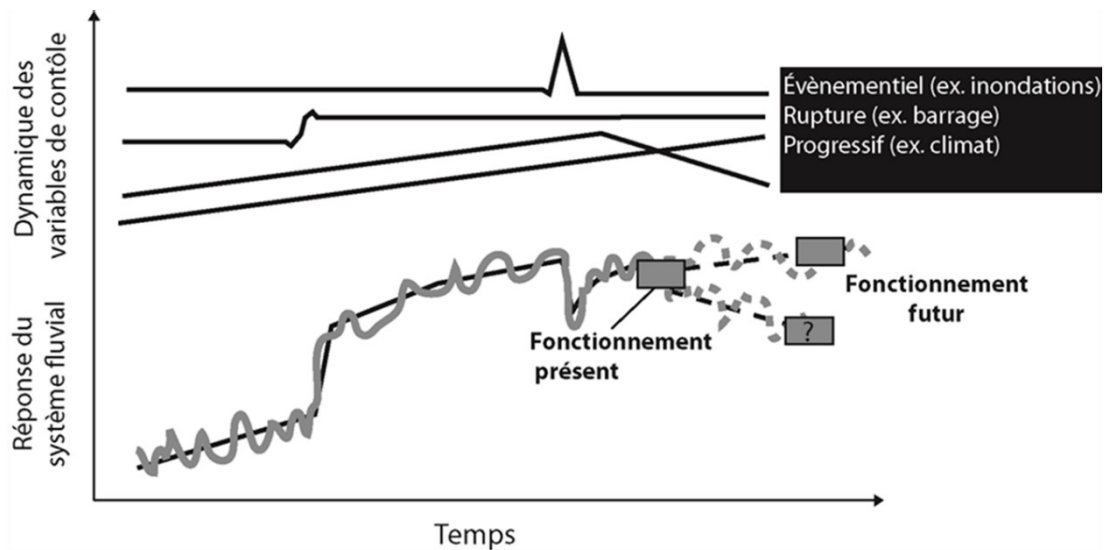


Figure 4. Schématisation de la trajectoire hydrogéomorphologique (adaptée de Dufour et Piégay, 2009). Les connaissances acquises sur les variables de contrôles permettraient d’anticiper deux scénarios de réponses potentielles dans un futur plus ou moins rapproché.

b. La dynamique des barrages de castor et son interaction avec l’hydrogéomorphologie

Les castors construisent des structures de rétention d’eau temporaires dans les cours d’eau. Ces barrages sont mis en place afin de rehausser le niveau de l’eau. Les niveaux d’eau élevés permettent à cette espèce semi-aquatique; (1) de plonger et se sauver de prédateurs; (2) d’assurer que l’entrée de sa hutte demeure sous l’eau; (3) d’agrandir la surface mouillée et son territoire d’alimentation; (4) faciliter le transport de tronc et de branches d’arbre; (5) et de maintenir une profondeur assez élevée pour avoir assez d’espaces sous la glace pour les déplacements hivernaux (Pollock *et al.*, 2017).

Les barrages de castor sont également connus pour avoir un impact considérable sur les environnements fluviaux et ripariens. Néanmoins, la relation de ces structures de rétention naturelles avec l’hydrogéomorphologie n’est pas unilatérale. Cela s’explique par la nature muable des aménagements, de leur évolution dans le temps et l’espace (c.-à-d. construction, entretien, agrandissement et destruction), de la variation du niveau d’influence des barrages sur la dynamique fluviale et des conditions géomorphologiques préférentielles pour l’implantation de barrages. La dynamique des barrages peut ainsi se définir par l’interrelation entre le comportement, les paramètres écosystémiques (p.ex. rôles écosystémiques, matériaux de

construction et nourriture), les barrages de castor avec l'hydrogéomorphologie, ainsi que l'évolution de ces relations dans le temps et l'espace.

i. *Caractéristiques des barrages de castor*

La taille et le nombre de barrages et le volume d'eau retenu dans un segment de rivière dépendent fortement du temps d'occupation par la colonie présente, la topographie, le type de substrat, la profondeur d'écoulement et la végétation riparienne déjà en place (Gurnell, 1998; Touihri *et al.*, 2018). Lorsque le refoulement provoque le débordement et la réactivation de chenaux de débordement ou secondaires, des petits barrages de correction peuvent être ajoutés au complexe sur ces chenaux ou sur la plaine alluviale (Baker et Hill, 2003). L'ajout de barrages sur un même territoire est fréquemment observé avec la croissance de la taille de la colonie (Cotton, 1990; Cunningham *et al.*, 2006).

Les barrages sont construits à l'aide du matériel présent sur les rives ou sur le lit de la rivière. Les techniques de construction et les différents matériaux influencent la résistance, la longévité et la perméabilité de la structure. Les matériaux employés les plus communs qui ont été observés dans la littérature sont : (1) les troncs et les branches qui sont tissés au travers des barrages; (2) les blocs, les galets et le gravier qui constitue l'assise et ajoute du poids à la structure; et (3) les feuilles, la terre et la vase qui est utilisée afin d'imperméabiliser le barrage (Pollock *et al.*, 2017; Touihri *et al.*, 2018). Müller et Watling (2016) ont ainsi classifié deux grands types de barrages selon les matériaux présents sur le territoire. Le premier consiste en des barrages en bois qui sont majoritairement composés de bois et de pierres à la base. Ce type de barrage a généralement une forme triangulaire avec un ratio hauteur-largeur de 2,9 (Watling 2014 dans Müller et Watling, 2016). Le second type est généralement composé (2) de pierres lorsque les matériaux ligneux sont insuffisants à proximité. La technique de construction consiste à entrelacer des couches de pierres et de branches ressemblant étrangement aux méthodes de construction des murs de soutènement employé par les ingénieurs (Jung et Staniforth, 2010).

Plusieurs auteurs ont ressorti les caractéristiques et dimensions communément observées dans la littérature : (1) la longueur du segment affecté fluctue entre 1 et 850 m (Geostrategies, 2007 dans Müller et Watling, 2016); (2) la hauteur varie entre 0,3 et 5 m; et (3) la largeur du chenal obstrué peut atteindre 46 m (Pollock *et al.*, 2003). Cependant, la plupart des barrages sont

observés dans des cours d'eau de 10 m de largeur ou moins (Naiman *et al.*, 1988 dans Müller et Watling, 2016).

Le manque de matériel pour la construction de barrages restreint l'implantation de colonies et la construction de barrages sur un territoire. Ce manque de ressources peut également survenir suite à plusieurs années d'exploitation d'un même territoire par une même colonie. Certaines conditions sont défavorables à la mise en place de barrages telles qu'une pente trop forte, une profondeur élevée préexistante (Müller et Watling, 2016; Touihri *et al.*, 2018) et de grandes variations de débits qui ont un impact sur les niveaux d'eau (Slough et Sadleir, 1977 dans Touihri, 2018).

ii. *Conditions d'implantation*

Les castors ont été le sujet d'une multitude d'études qui ont mené à l'avancement et à la compréhension de son comportement et ses fonctions écosystémiques en Amérique du Nord (Touihri *et al.*, 2018). Malgré les connaissances apportées par ces modèles de classification et les connaissances sur la qualité des habitats, l'absence d'un consensus scientifique persiste quant aux caractéristiques et variables à considérer concernant les conditions d'implantation du castor. L'information confuse rend l'identification des conditions propices à la colonisation ainsi qu'à la mise en place de barrages imprécise. Considérant cela et les objectifs de l'étude, les caractéristiques et les conditions d'implantation des barrages observées dans la littérature seront uniquement présentées. La description de la dynamique des barrages de castor et leurs influences sur la dynamique HGM seront par la suite abordées.

Tout d'abord, les castors aménagent des barrages dans les cours d'eau afin de contrôler la profondeur et, jusqu'à un certain degré, pour stabiliser le niveau d'eau. Afin d'y parvenir, certains paramètres hydrogéomorphologiques semblent être prisés par l'animal afin d'y construire leurs barrages. Selon Naiman *et al.* (1986), la construction de barrages semble être prédominante sur les cours d'eau dont l'ordre de Strahler est de niveau 4 ou moins. La hiérarchisation de Strahler (1957) définit l'ordre hiérarchique d'un cours d'eau dans son réseau hydrographique, allant d'un cours d'eau de tête de bassin de niveau 1 et augmentant à chaque confluence dans le réseau hydrographique. Les auteurs mentionnent également que les cours d'eau d'ordre 5 ou plus sont davantage sujets à la destruction rapide des barrages construits en raison de la magnitude des crues et des niveaux d'eau plus élevés.

La pente du lit est un facteur de grande importance au choix du site d'implantation de barrages de castor selon plusieurs auteurs (Howard et Larson, 1985; Remar, 2013 dans Touihri *et al.*, 2018). Toutefois, les valeurs de pente semblent varier entre 1 et 10% dans la littérature (Cotton, 1990; Touihri *et al.*, 2018) selon la variabilité de la topographie régionale (Jakes *et al.*, 2007) et la présence de ponceaux (Tremblay, 2010). Certaines études ont déterminé une pente optimale du chenal à moins de 3% (Suzuki et McComb, 1998; Jakes *et al.*, 2007), d'autres moins de 6% (Müller et Watling, 2016) et qui ne dépasse généralement pas 4% (Northcott, 1964 dans Touihri *et al.*, 2018). Cependant, il est possible d'observer des barrages de castors dans des environnements dont les pentes excèdent cette valeur (Retzer *et al.*, 1956 dans Müller et Watling, 2016). En effet, au Québec, Cotton (1990) a observé une corrélation positive entre la densité de colonies et la densité de cours d'eau avec des pentes entre 2 et 6% dans la réserve faunique Papineau-Labelle. Enfin, Jakes *et al.* (2007) ont illustré une forte corrélation entre la pente et la variabilité de la topographie régionale. Les conclusions de Barnes et Mallik (1997) abordent également dans ce sens où les pentes généralement faibles (<1,5%) observées dans un environnement deltaïque plat ne s'avèrent pas un facteur déterminant à l'implantation de barrages de castor.

Certains paramètres morphométriques sont recherchés par le castor. En premier lieu, la relation entre la localisation de barrages et la largeur de la plaine alluviale a été analysée. Cette dernière s'avère un facteur déterminant à l'implantation du castor selon Suzuki et McComb (1998). Les auteurs ont observé tous les barrages au niveau d'une plaine de 25 m de largeur tandis qu'aucun n'a été observé en deçà de 10 m de largeur. Cette relation s'explique par le fait que les faibles largeurs de plaine alluviale sont souvent associées aux environnements de forte pente (Jakes *et al.*, 2007), dont les dépôts poreux et le drainage excessif des berges ne favorisent pas l'implantation d'espèces végétales que le castor préfère (Northcott, 1964 dans Touihri *et al.*, 2018). En second lieu, la largeur du chenal s'avère l'une des caractéristiques de l'habitat les plus considérées par ce dernier. Toutefois, elle exerce à la fois un effet positif et négatif dans le choix d'un site d'implantation du barrage selon la littérature. Certaines études (Beir et Barrette, 1987; Howard et Larson, 1985 dans Touihri *et al.*, 2018) ont effectivement montré une relation positive avec cette caractéristique morphologique et la qualité de l'habitat. Cela a permis de l'utiliser en tant que variable prédictive de site d'implantation de barrage ainsi que dans le calcul de la densité maximal de colonies. D'autre part, l'augmentation de la largeur a été associée à une diminution de la fréquence de barrages (Suzuki et McComb, 1998).

En dernier lieu, la profondeur du chenal (ou profondeur d'écoulement) est également recherchée par l'animal pour des raisons de protection contre la prédation (p.ex. submersion de l'entrée de la hutte, fuite, etc.). Néanmoins, peu d'études (Beier et Barrett, 1987; Dieter et McCabe, 1989 dans Touihri *et al.*, 2018) ont démontré une relation significative entre ce paramètre et le choix du site d'implantation de barrage. Barnes et Malik (1997) ont qualifié l'aire hydraulique (ou l'aire transversale) d'importante, influencée directement par la profondeur et la largeur du chenal, au niveau de la localisation des barrages sur un cours d'eau du nord de l'Ontario. L'absence d'une préférence pour des valeurs élevées de largeur, de profondeur ou d'aire hydraulique pourrait s'expliquer par le fait que ces structures ne sont pas assez résistantes pour supporter l'augmentation de la pression hydrostatique engendrée par les crues (Suzuki et McComb, 1998).

La taille du bassin versant influence la qualité et la localisation des sites d'implantation de barrage en fonction de la position le long du continuum fluvial tel que présenté à la Figure 2. Quelques auteurs ont démontré que l'aire de drainage est le facteur déterminant dans l'implantation de barrage dans la zone source en amont de cours d'eau en Ontario (Barnes et Mallik, 1997) ainsi qu'en Caroline du Sud (Jakes *et al.*, 2007). Dans la plaine côtière de Caroline du Sud, ces mêmes auteurs ont également observé que les castors ont tendance à préférer les bassins versants de taille moyenne (c.-à-d. 10 à 50 km²) et à s'installer dans les zones d'accumulation à l'aval. D'ailleurs, cela concorde avec la relation fonctionnelle qui existe entre la taille d'un bassin versant et la largeur du chenal ainsi que la préférence du castor pour les chenaux de faibles largeurs. Les études montrent que les préférences associées à la taille d'un bassin versant sont liées aux variations des variables de contrôles tels que les débits qui provoquent, d'une part, un apport faible en eau menant à l'intermittence du régime hydrologique et, d'autre part, des crues d'amplitude élevée menant à la destruction des infrastructures.

Enfin, malgré certaines tendances observées dans les paramètres morphologiques prisés pour le choix d'un site de construction de barrages, seule la pente du lit semble être constante dans la liste des variables clés de l'espèce. Les colonies et les barrages de castor ont été observés dans une multitude d'environnements dont les paramètres HGM diffèrent. D'ailleurs, Touihri *et al.*, (2018) ont examiné 12 études modélisant l'habitat du castor en Amérique du Nord et ont identifié trois catégories de variables clés pour l'habitat du castor dont leurs influences varient considérablement d'un environnement à l'autre : 1) les caractéristiques géomorphologiques qui ont été présentées dans la présente section (largeur de la plaine, du chenal, la pente, la taille du

bassin versant et l'ordre de Strahler); 2) la nature de la variable de réponse (densité ou nombre potentiel de colonies et de barrages); et 3) l'échelle à laquelle les études ont été conduites qui ont été réalisées majoritairement à petite échelle (c.-à-d. échelle locale) dans ce cas-ci. Cela pourrait également s'expliquer en partie par plusieurs facteurs biologiques et sociocomportementaux de l'espèce, tels que la capacité à coloniser différents environnements (Dieter et McCrabe, 1989; Cramer, 2012; Pollock *et al.*, 2017), la densité des colonies sur le territoire (Pollock *et al.*, 2017), la présence et la densité d'espèces végétales prisées pour la construction de barrage (Barnes et Mallik, 1997) et le comportement opportuniste de l'animal.

iii. Impact de la dynamique des barrages de castor sur l'hydrogéomorphologie

Les barrages sont connus pour affecter la température de l'eau, les processus biogéochimiques, l'hydrologie, les conditions hydrauliques, la géomorphologie des cours d'eau et les zones ripariennes (Stout *et al.*, 2016; Müller et Watling, 2016; Pollock *et al.*, 2017). Leur influence sur la dynamique fluviale, telle qu'illustrée à la Figure 1, est ainsi considérable. Les impacts se ressentent majoritairement sur les conditions hydrauliques locales (structure de l'écoulement), le transport sédimentaire et la morphologie du lit.

La structure de l'écoulement

En effet, le refoulement créé par l'augmentation de la rugosité du lit (c.-à-d. une entrave à l'écoulement) forme des zones de faibles courants, augmente la profondeur d'écoulement et la largeur mouillée. Ces lieux peu dynamiques favorisent le dépôt des sédiments fins par la réduction de la compétence de l'écoulement, l'aggradation du lit et constituent des lieux de stockage temporaires de sédiments.

Ce stockage diminue le transit sédimentaire vers l'aval, ce qui peut occasionner des modifications à long terme telles que l'incision du lit ou la réduction de la taille des bancs d'accumulation en aval de ces barrages. Les processus d'accumulation modifient en retour la pente du lit dans la zone de refoulement et, par conséquent, les vitesses d'écoulement sur l'ensemble du segment en amont et aval du barrage. La présence de barrages est généralement suivie par un seuil ou un palier subséquent. Les paliers consistent à la succession d'une fosse créée par le refoulement (voir annexe 2, photos 4 et 5) et par la présence d'un autre barrage. Ce type de configuration modifie le profil en long, affectant ainsi les conditions hydrauliques et la pente du lit à l'aval des

segments, voire des sections entières d'un corridor fluvial. En plus d'augmenter le volume d'eau emmagasiné et la superficie de l'aire d'alimentation de l'animal, la succession de barrages permet de dissiper efficacement l'énergie des ondes de crue et d'assurer l'intégrité du complexe lorsqu'un barrage cède (Butler et Malanson, 2005; Pollock *et al.*, 2017). Cet exemple de rétroaction sur la dynamique fluviale et sédimentaire n'est qu'un exemple de la mise en place d'un barrage à un endroit et un temps donné dans un segment de rivière.

La construction d'un barrage dans nos climats tempérés froids avec dynamique glacielle se réalise entre le printemps et la fin de l'automne, soit juste après la débâcle et jusqu'à la formation du couvert de glace. La durée de la construction varie sur une période de temps en fonction de la taille de la colonie, de la disponibilité des matériaux ligneux et du régime hydrologique (Pollock *et al.*, 2017). L'animal initie généralement la construction en localisant des sites afin de tirer profit du substrat (p.ex. blocs ou galets de grande taille) (1), de structures déjà en place (p.ex. anciens barrages, infrastructures, bois en rivière) (2) et en poussant les sédiments, les roches et les débris afin de former une crête perpendiculaire à l'écoulement (3). Ensuite, du matériel, tel que des branches, des feuilles, des herbacés, de la vase, de la terre et des roches, est ajouté sur la face amont de la crête afin de rehausser la structure, d'augmenter sa rigidité et son imperméabilité (voir annexe 2, photo 6). Enfin, des branches sont placées perpendiculairement du côté aval du barrage afin d'augmenter la rigidité ainsi qu'aider à prévenir l'érosion du lit à l'aval du barrage en dissipant l'énergie de l'écoulement (Pollock *et al.*, 2017).

Pendant la construction, l'influence des structures sur la dynamique fluviale augmente progressivement en fonction de la proportion de l'aire hydraulique obstruée (c.-à-d. rétrécissement de la largeur d'écoulement, entretien et colmatage du barrage) et de leur taille (voir annexe 2, photo 3). Au fil du temps, ces structures seront entretenues (p.ex. réparations, colmatage et ajouts de matériel), multipliées (p.ex. ajout de barrage en amont, à l'aval ou sur des chenaux secondaires), rehaussées et élargies (p.ex. augmentation de la taille en fonction des variations du régime hydrologique) jusqu'à leur éventuelle destruction selon les conditions hydroclimatiques. Cela explique en partie pourquoi la dynamique de barrage, tel qu'expliqué précédemment, varie dans le temps et l'espace.

Les barrages sont généralement des structures éphémères dont la durabilité varie selon l'entretien et l'utilisation de l'aire d'alimentation par la colonie. Lorsque le barrage cède, le segment revient à sa dynamique fluviale préexistante en raison de l'évacuation des sédiments

(c.-à-d. modification de la pente), du retour aux conditions hydrauliques (c.-à-d. augmentation des vitesses d'écoulement) et hydrologiques antérieures (c.-à-d. réduction de la profondeur d'écoulement). Ces effets peuvent se faire ressentir sur une distance amont-aval de plus ou moins 600 m (Stout *et al.*, 2016). Le cycle de réajustement de la dynamique fluviale recommence ainsi jusqu'à l'implantation d'une nouvelle colonie (Levine et Meyer, 2014).

La succession de réajustements suite à un évènement lié à la dynamique de barrage (c.-à-d. construction, agrandissement, rehaussement et destruction) doit être considérée dans l'analyse de la trajectoire HGM. Considérant que les conditions d'implantation du castor dans un tronçon de rivière sont généralement similaires à celles observées suite à l'aménagement de barrages (c.-à-d. réduction des vitesses d'écoulement et de la pente), on peut présumer que la destruction de barrage provoque une séquence de perturbation-réajustement plus importante. Il est toutefois important de noter que des réajustements progressifs dans la trajectoire HGM d'une rivière peuvent être subtils et s'échelonner sur une longue période de temps et ce, jusqu'à atteindre un état d'équilibre dynamique.

L'ampleur du réajustement et des impacts d'un barrage sur **l'état d'équilibre** d'un cours d'eau est principalement liée à la proportion du chenal obstrué, aux dimensions, à la porosité et, par conséquent, au volume retenu d'eau ainsi qu'à la stabilité du barrage et des berges. Toutefois, les barrages les plus volumineux ne sont pas systématiquement les plus stables en raison du seuil de résistance de la structure face aux forces externes (p.ex. gravité, pression hydrostatique). Par conséquent, l'augmentation des dimensions et de la porosité influence davantage la dynamique fluviale, mais réduit potentiellement la pérennité de l'ouvrage de rétention naturelle. Quelques auteurs ont toutefois mentionné la présence d'ouvrages aux dimensions anormalement élevées, telles qu'une hauteur pouvant atteindre 5m ou 750 de largeur (Müller et Watling, 2016), ou une longévité extraordinaire pouvant atteindre 150 ans (Johnston, 2015 dans Müller et Watling, 2016). Ces structures surdimensionnées s'expliquent en partie par des variables de contrôle (p.ex. régime hydrologique, utilisation du territoire, configuration et taille de bassin versant) ne favorisant pas une réponse hydrologique excédant le seuil de résistance de la structure.

c. Le castor, ses effets sur la diversité morphologique, sur les habitats lotiques et sa cohabitation avec le saumon atlantique

Certains gestionnaires et citoyens qui cohabitent avec cet animal ont une perception négative en raison de son habilité à modifier son environnement existant. Pourtant, le castor du Canada (*Castor canadensis*) est une espèce clé de nos paysages contemporains en raison des modifications considérables sur leur environnement et de leur rôle écosystémique. En effet, ces espèces côtoient les systèmes fluviaux de l'Amérique du Nord depuis plus de 15 000 ans (dernière glaciation). Par conséquent, les systèmes fluviaux, les écosystèmes aquatiques, riverains et les espèces qui y habitent ont évolué et cohabité avec les modifications occasionnées par ce mammifère avant les interventions par l'humain (Rybczynski, 2007; Kemp *et al.*, 2012; Müller et Watling, 2016). D'ailleurs, cette cohabitation qui perdure depuis la dernière déglaciation explique pourquoi la présence du castor favorise plusieurs espèces de salmonidés indigènes (p.ex. saumon atlantique, omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*)) aux dépens des espèces introduites (p.ex. achigan, carpe) en raison de leur habileté à remonter en amont des tronçons endigués par des barrages (Lokteff *et al.*, 2013). Les sédiments accumulés par les barrages ont ainsi façonné la plaine alluviale et ses milieux humides dans nos vallées tandis que les étangs et les barrages (actifs ou abandonnés) ont diversifié les formes présentes dans les systèmes fluviaux (Cunningham *et al.*, 2006; Burchsted *et al.*, 2010; Westbrook *et al.*, 2011; Müller et Watling, 2016).

Le castor présent sur le continent américain est l'une des deux sous-espèces existantes qui, autrefois, a été populaire pour sa fourrure jusqu'au point de disparaître à plusieurs endroits en raison de sa surexploitation pendant plusieurs centaines d'années. La situation s'est généralement améliorée à l'aide de programmes de réintroduction. Au Québec, Lafond *et al.* (2003) ont d'ailleurs observé une augmentation généralisée de la densité des colonies à la suite d'une forte réduction de la pression de trappe entre 1987 et 1989. Lors de ce suivi de deux ans, l'efficacité de ce programme de conservation a été montrée avec une augmentation de 5,4 à 7,4 colonies par 10 km² en Abitibi-Témiscamingue. Aujourd'hui, il se retrouve un peu partout dans nos environnements fluviaux pourvus de végétation ligneuse dans la province. Cela s'explique partiellement par le fait que les inondations causées par le refoulement des barrages lui permettent d'occuper différents environnements naturels et anthropiques (Baker et Hill, 2003 dans Touihri *et al.*, 2018).

i. Effets sur la diversité morphologique et les habitats lotiques

L'influence du castor sur la diversité morphologique entraîne conjointement la création d'une multitude d'habitats riverains et lotiques hétérogènes (Müller et Watling, 2016; Pollock *et al.*, 2017; Touihri *et al.*, 2018) qui s'avèrent complémentaires à ceux préexistants (Schlosser, 1995).

L'amélioration de la qualité de l'habitat par le castor peut s'observer par plusieurs phénomènes touchant l'ensemble des conditions biophysiques. Le schéma conceptuel présenté à la Figure 5 montre l'influence de l'implantation de barrages de castors sur les conditions biophysiques d'un segment de rivière en fonction de sa position longitudinale. Les effets bénéfiques observés pour les écosystèmes consistent en l'augmentation du gradient d'échanges vertical, de l'entreposage et du temps de résidence des nutriments (C, N, P), de l'eau et de sédiments. En contrepartie, les barrages réduisent la connectivité longitudinale entre les portions amont et aval.

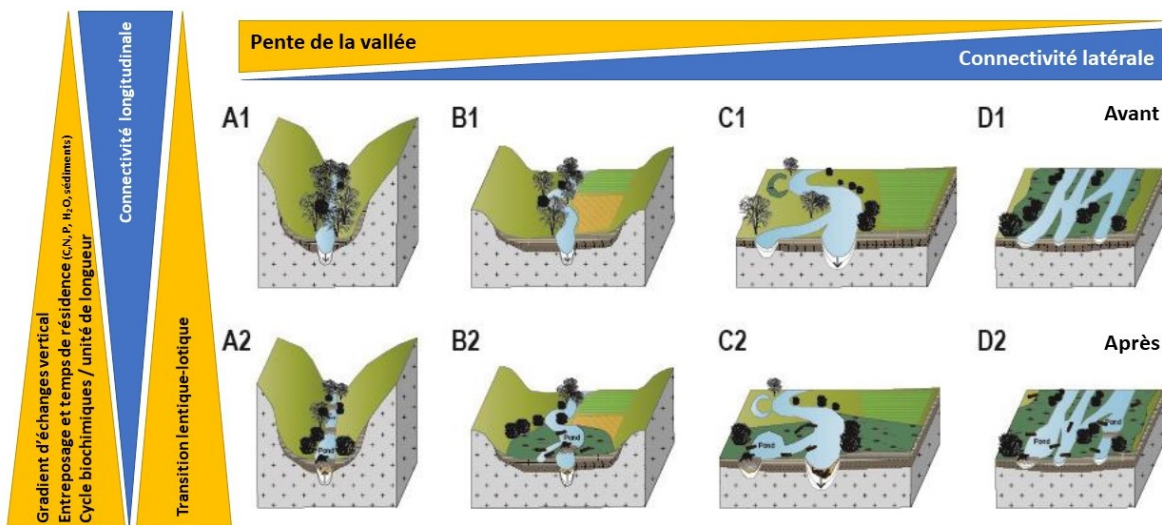


Figure 5. Schéma conceptuel montrant l'influence de l'implantation de barrages de castors sur les conditions biophysiques d'un segment de rivière. Les lettres A à D illustrent les différents types d'environnements fluviaux fréquemment observés de l'amont vers l'aval tandis que les deux rangés (1 et 2) montrent les effets avant-après (adaptée de Larsen *et al.*, 2020)

L'augmentation du niveau de l'eau en rivière favorise également le stockage d'eau souterraine sous forme d'aquifère, l'augmentation du niveau de la nappe phréatique et, par conséquent, les échanges **hyporhéiques** (Figure 6). Lorsque la porosité des dépôts permet à l'eau de circuler suffisamment, les échanges de chaleur avec l'eau froide de la nappe phréatique diminuent la température de l'eau dans le chenal (Westbrook *et al.*, 2006; Pollock *et al.*, 2017). Pendant l'hiver,

l'effet inverse survient, c'est-à-dire que l'eau plus chaude de la nappe phréatique réchauffe celle des étangs de castor (Chesney *et al.*, 2010).

De plus, la réduction des vitesses d'écoulement, le rehaussement du niveau de l'eau et les modifications morphologiques font de ces lieux des refuges hydrologiques (durant les crues, la migration anadrome et les longues périodes d'étiage par exemple) et thermiques (durant les chaudes périodes d'étiages estivales par exemple) en plus d'offrir des lieux d'hivernage pour la faune ichthyenne. L'accumulation de sédiments couplée aux faibles vitesses d'écoulement favorisent l'implantation et la croissance de macrophytes, d'algues ainsi que la colonisation par les macroinvertébrés, les organismes benthiques et les poissons (Boivin *et al.*, 2019). Les effets de refoulements, de rehaussement de la nappe phréatique et du niveau de l'eau favorisent le développement de milieux humides riverains et les dépôts de débordement sont reconnus pour favoriser le développement de la végétation **riparienne** (Francis *et al.*, 2008). Celle-ci vient par la suite agir comme écran protecteur contre la chaleur du soleil et, par conséquent, contribue à tempérer l'eau lors des périodes chaudes d'été (Harmon *et al.*, 1986; Nagayama *et al.*, 2012; Pollock *et al.*, 2017).

La modification du régime hydrologique et des conditions hydrauliques par le castor améliore également la qualité de l'habitat en créant des refuges hydrologiques (c.-à-d. lors de crues, de périodes d'étiages hivernales ou estivales) ou thermiques (c.-à-d. lors de périodes d'étiages prolongées en été) (Stout *et al.*, 2016; Pollock *et al.*, 2017). Cette géodiversité de formes est particulièrement appréciée des espèces migratrices dans les environnements fluviaux dont la quantité de fosses est limitée (Harig et Fausch, 2002 dans Stout *et al.*, 2016).

La chaîne trophique dans l'écosystème bénéficie également des modifications engendrées par la présence de barrages. La sédimentation et l'accumulation de matière organique couplées au faible dynamisme de la colonne d'eau favorisent la colonisation du benthos par des organismes benthiques et autres invertébrés, le développement de biofilms et la croissance d'algues. Enfin, les conditions biophysiques favorables à l'implantation de végétation, d'invertébrés et de microorganismes ont nécessairement des répercussions sur les niveaux supérieurs de la chaîne trophique en augmentant leur disponibilité et l'abondance. De plus, les refuges hydrologiques qu'ils constituent favorisent également les échanges trophiques ainsi que l'utilisation de ses habitats à différents stades du cycle de vie du saumon par exemple (Opperman *et al.* 2006).

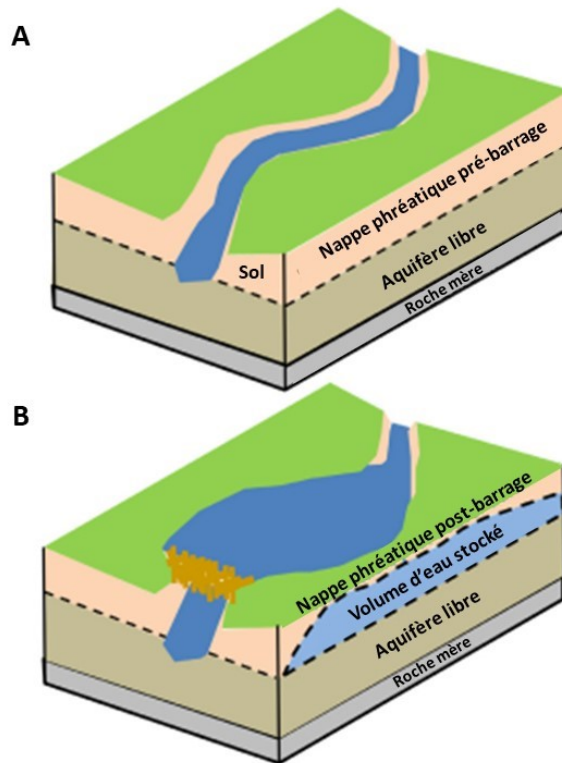


Figure 6. Schéma conceptuel illustrant l'influence de la dynamique de barrage sur le niveau de la nappe phréatique et le stockage d'eau dans un aquifère libre dans un environnement fluvial (A) avant et (B) après la mise en place d'un barrage (adaptée de Hafen et Macfarlane, 2016).

Les effets bénéfiques apportés par les modifications hydrogéomorphologiques des barrages ont inspiré considérablement la façon dont certains aménagements sont pensés et conçus aujourd'hui. Cela a mené à l'utilisation de cette espèce en tant qu'agent de restauration. Plusieurs problématiques d'incision, d'érosion et d'intermittences observées majoritairement sur les petits cours d'eau en milieu aride ont été prévenues ou corrigées par la réintroduction de castor (Nash, 2015; Müller et Watling, 2016; Figure 7). Dans certains cas, la présence du castor peut être indésirable en raison de la vulnérabilité d'infrastructures à proximité du site de restauration. Par conséquent, plusieurs auteurs se sont intéressés à répliquer les effets de ces structures à une amplitude donnée et aux conséquences contrôlées (Nash, 2015; Pollock *et al.*, 2017). Ces répliques de barrages de castor (*artificial beaver dams* ou *beaver dam analogs*) sont mises en place dans le but d'obtenir les effets bénéfiques sur l'hydrogéomorphologie et l'augmentation de la qualité de l'habitat dans un tronçon de rivière sans avoir les conséquences de l'implantation de cette espèce (p.ex. rehaussement des barrages, inondation et augmentation constante de l'aire d'alimentation)(Figure 7). Les résultats ont été plutôt concluants dans la majorité des cas (Nash, 2015; Wheaton *et al.*, 2019). Le castor a également été réintroduit dans le but de

diversifier les habitats et d'améliorer la qualité de l'habitat des salmonidés (Kemp *et al.*, 2012; Pollock *et al.*, 2012; Pollock *et al.*, 2014; Biron, 2017).

i. Les enjeux de gestion et sa cohabitation avec le saumon atlantique

Un des enjeux de gestion fortement associé au castor est le passage migratoire d'espèces de salmonidés dans les rivières telles que le saumon atlantique (*Salmo salar*). En général, la perception liée à la présence de barrages et de digues de castors est souvent négative en raison de l'effet de barrière potentiel pour la libre circulation des salmonidés. Toutefois, un recensement des écrits sur les effets du castor sur la faune ichthyenne montre que, sur un total de 51 articles, 78,4% des impacts négatifs répertoriés étaient de nature spéculative (Kemp *et al.*, 2012). D'autre part, un consensus à l'échelle mondiale provenant de la littérature scientifique montre que les impacts les plus communs des castors sur les salmonidés sont davantage positifs que négatifs. En effet, de nombreuses analyses quantitatives ont montré que les barrages favorisent la survie et la croissance des juvéniles, augmentant le nombre et la taille des individus (Kemp *et al.*, 2012; Lokteff *et al.*, 2013; Pollock *et al.*, 2014).

Les impacts négatifs des barrages associés à la migration du saumon consistent à la potentielle barrière qui limite la distribution amont des salmonidés vers les zones de fraie (Mitchell et Cunjak, 2007 dans Kemp *et al.*, 2012) ainsi que l'arrêt complet de la migration lors des périodes d'étiage (Pollock *et al.*, 2017). Malgré cet enjeu de gestion, il en demeure que peu de données existent concernant le contexte HGM (p.ex. pentes, profondeur d'écoulement, régime hydrologique), le comportement du saumon le long du parcours migratoire (p.ex. observations comportementales, télémétrie, décompte) et les contraintes migratoires (p.ex. conditions hydrométéorologiques, hauteur du barrage, présence de passage et caractéristiques des barrages, distance migratoire, nombre d'obstacles).

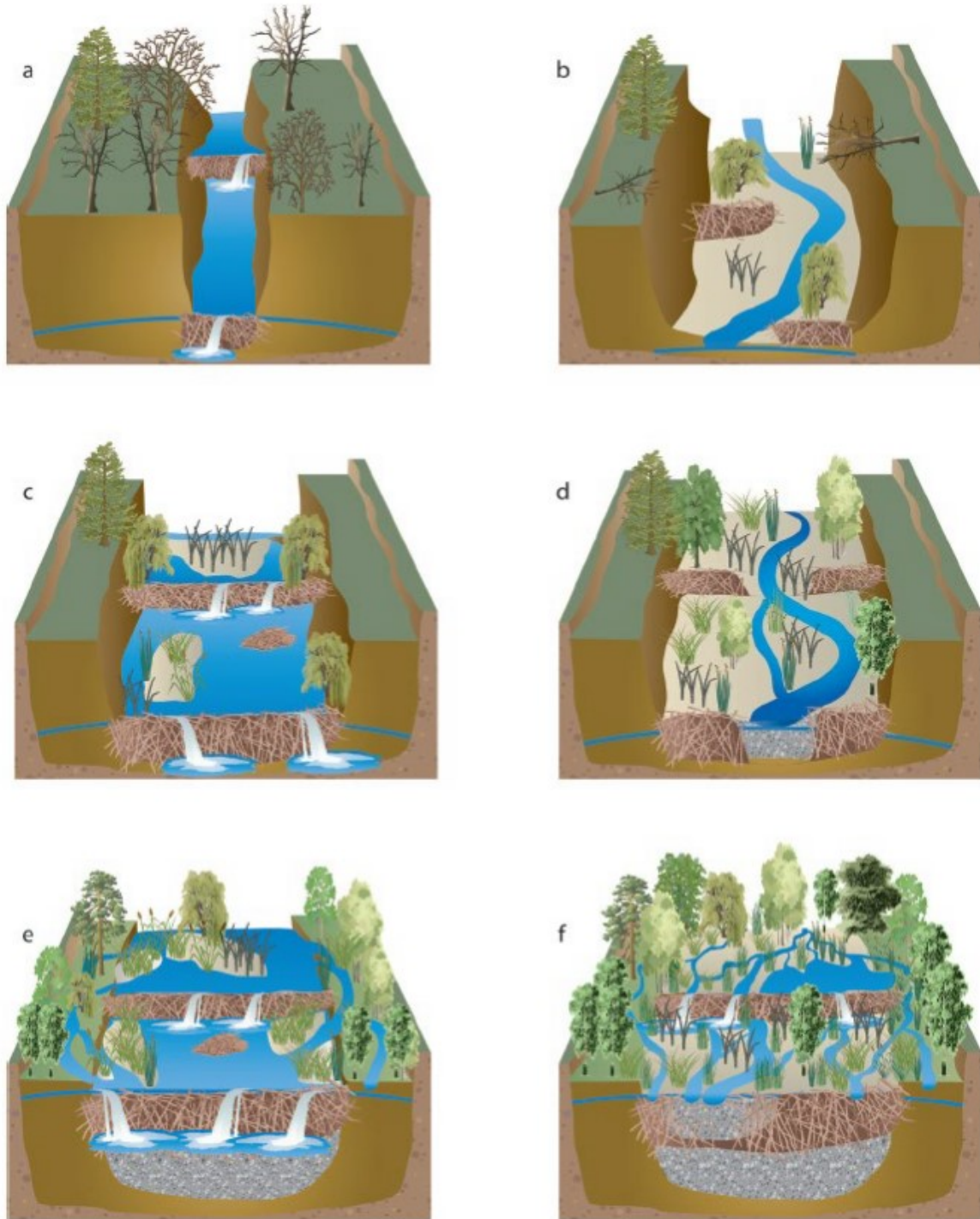


Figure 7. Exemple d'évolution dans le temps d'un tronçon de chenal incisé ayant été aménagé par le castor. La dynamique de barrage, au travers de la succession de construction, croissance et destruction de ses structures, a accéléré les processus d'évolution du chenal. Les processus d'élargissement du lit mineur par l'érosion des berges (a,b et c), d'aggradation du lit (d, e et f) et de reconnexion avec la plaine alluviale (e et f). Il est important de noter que le chenal ne se reconnectera pas nécessairement avec l'ancienne plaine alluviale, mais reconstruira son propre complexe alluvial (tirée de Pollock *et al.*, 2017).

Pollock *et al.* (2017) qualifient de temporaires ces obstacles à la migration pour les saumons adultes en raison des variations des conditions hydrométéorologiques. En effet, l'occurrence de crue pendant la période migratoire est fréquente et lorsque les débits augmentent graduellement, ces structures semi-perméables sont de plus en plus faciles à passer pour les adultes et les juvéniles en déplacement en raison de l'apparition de passage au travers de barrages. Malgré le manque de données probantes sur le phénomène, plusieurs observations suggèrent que les saumons adultes et les juvéniles préfèrent généralement remonter à la nage le long des écoulements de part et d'autre ainsi qu'au travers des barrages au lieu de sauter par-dessus l'obstacle (Pollock *et al.*, 2017).

Les hausses de débits sont ainsi cruciales pour la montaison des salmonidés en raison de la réduction de la pente hydraulique, de la création de passages de part et d'autre ou au sein du barrage ainsi que par la destruction partielle ou complète de la structure. Les opportunités et la création de passages évoluent toutefois avec la construction, l'entretien, le rehaussement, l'abandon et par la diversité des débits (Pollock *et al.*, 2017). D'ailleurs, Müller et Watling (2016) ont mentionné l'efficacité des barrages de 1 m et plus pour restreindre le passage migratoire par la faune ichtyenne lors de conditions hydrologiques moyennes. Selon les auteurs, le passage est possible uniquement lors des hauts niveaux d'eau ou lorsque le barrage cède partiellement ou complètement pour des structures de cette envergure. Par conséquent, la taille maximale d'un barrage pour devenir un obstacle infranchissable varie selon le régime hydrologique et la dynamique de barrage. D'ailleurs, certains auteurs (Bryant, 1983 dans Müller et Watling, 2016) ont observé la présence de saumons juvéniles en amont de barrage de plus de 2m de hauteur.

Enfin, la présence de cette espèce dans les rivières apporte ainsi son lot de soucis et de défis aux gestionnaires de cours d'eau. Cela s'avère plus particulièrement crucial lorsque ces derniers ont à établir un équilibre entre les risques (p.ex. inondations et occlusion de ponceaux), la gestion de la ressource (p.ex. population de saumons, pêche et activités récréatives) et les services écosystémiques livrés par le comportement du castor. Pour ce faire, il importe d'intégrer une approche holistique des environnements qui inclue la dynamique des barrages en rivière et la dynamique HGM afin d'orienter la prise de décision vers des actions plus harmonieuses et durables. La conciliation entre la conservation de la ressource, de la diversité morphologique, des habitats, toutes affectées par la présence de barrages de castor, et des enjeux de sécurité civile demeure un sujet difficile à clarifier en raison du caractère unique de chaque rivière et des

différentes problématiques rencontrées. La notion d'équilibre et de trajectoire HGM dans la gestion et l'analyse des dynamiques des barrages et fluviale demeure toutefois primordiale dans le processus décisionnel sur la gestion du castor. Les résultats de cette étude permettront de dresser un portrait exhaustif de la situation et de proposer des interventions durables, si nécessaire, qui considèrent à la fois les enjeux de gestion (p.ex. démantèlement complet, partiel ou pose de passe migratoire) et qui sont en harmonie avec le système fluvial et ses écosystèmes.

III CADRE MÉTHODOLOGIQUE

La compréhension de la dynamique des barrages de castor et de son impact sur la migration anadrome du Saumon atlantique nécessite l'analyse ainsi qu'une description exhaustive d'une multitude de processus et de caractéristiques écotopographiques de l'environnement fluvial du secteur à l'étude. La méthodologie préconisée implique ainsi la caractérisation et la segmentation fluviale du secteur à l'étude, l'évaluation de la trajectoire géomorphologique et hydrologique, l'analyse de la dynamique des barrages de castor et de la connectivité amont-aval des habitats.

Afin de réaliser les objectifs de l'étude, des travaux sur le terrain et des analyses spatiales ont été nécessaires. En ce qui a trait au volet terrain, deux campagnes de terrain ont été réalisées à l'été et à l'automne 2020.

a. Contexte géographique et présentation du corridor fluvial à l'étude

La rivière Ouelle est localisée dans l'est du Québec, mais plus spécifiquement dans les régions administratives de Chaudière-Appalaches et du Bas-Saint-Laurent (Figure 8). La rivière s'écoule sur plus de 75 km et son bassin versant draine un territoire d'une superficie de 846,7 km². Le réseau hydrographique se caractérise par une portion en treillis, caractéristique des environnements montagnards, dans le secteur amont des hautes-terres appalachiennes, et dendritique dans le secteur aval de la basse-plaine côtière. Le bassin versant est majoritairement forestier, agricole et urbain. La superficie des zones urbaines est plutôt faible comparativement à la superficie du territoire exploité par l'agriculture et la sylviculture. Le bassin versant se subdivise en deux sous-bassins (c.-à-d. rivières Ouelle et la Grande Rivière) qui possèdent d'importants plans d'eau dans sa portion amont qui sont endigués par des barrages de rétention (Tableau 1; Figure 9). Le secteur amont du bassin versant de La Grande Rivière est également connu être endigué par des barrages de castors au niveau de la rivière, en plus des barrages de rétention dans plusieurs de ses lacs de tête.

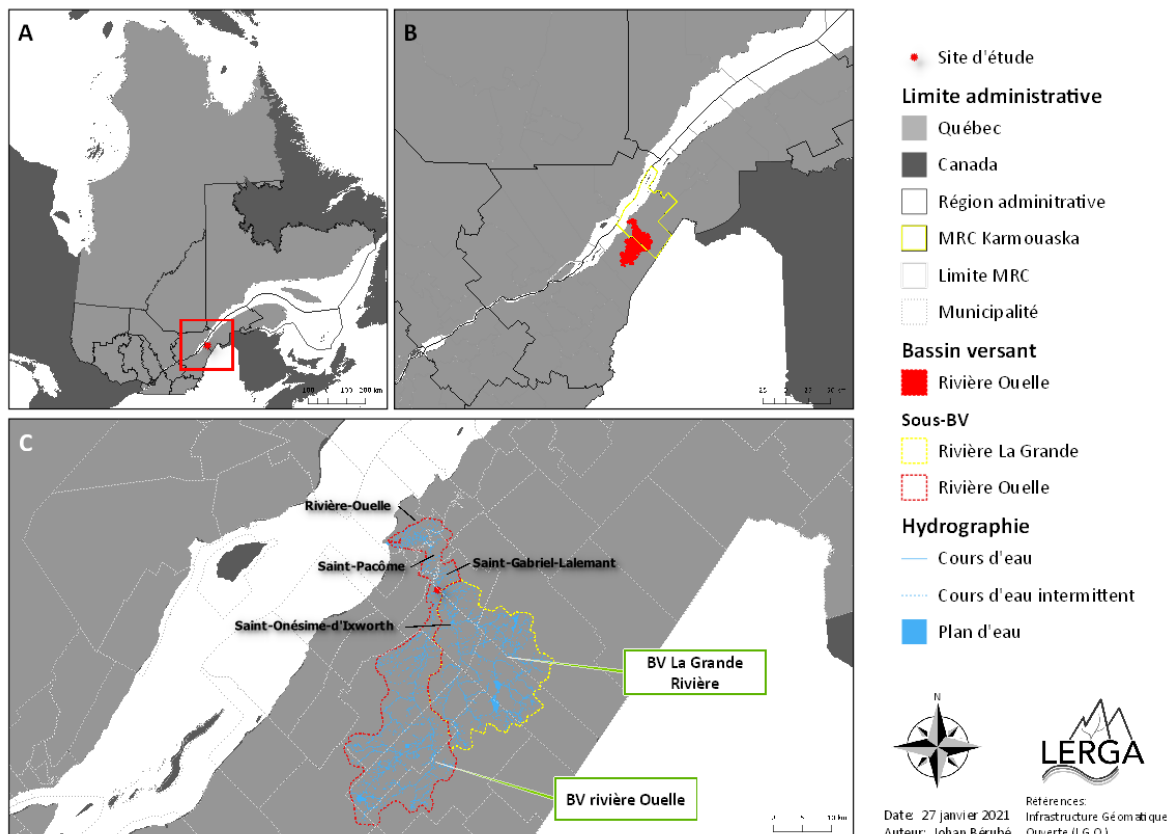


Figure 8. Localisation du corridor fluvial à l'étude à l'échelle du (A) Québec, de (B) l'Est-du-Québec et du (C) bassin versant de la rivière Ouelle

Les précipitations modérées, la température annuelle moyenne au-dessus du point de congélation (4,3 °C) ainsi que d'importantes variations interannuelles des températures caractérisent les conditions météorologiques de la région. Le Tableau 2 illustre la variabilité intra-annuelle des conditions météorologiques enregistrées à la station météorologique de La Pocatière (stations no. 7054095 et 7054096) entre 1913 et 2020 (Environnement Canada, 2021). L'écart-type moyen de 11,0°C et les grands écarts de température mensuelle moyenne, pouvant passer de -11,3°C en janvier jusqu'à 19,2°C en juillet, illustrent les grandes variations de température tout au long de l'année. Les mois de juin à septembre s'avèrent ceux dont les précipitations totales cumulées sont généralement les plus élevées avec des valeurs variant entre 85,4 mm et 90,6 mm. Les précipitations totales varient toutefois d'une année à l'autre comme démontré par les valeurs d'écart-types mensuelles élevées entre 29,0 mm et 46,2 mm.

Tableau 1. Présentation des plans d'eau endigués et des caractéristiques des barrages localisés dans la portion amont du bassin versant.

Sous bassin-versant	Superficie - km ² (%)	Plan d'eau endigué	Année de construction	Type	Capacité de retenue (m ³)	Superficie de drainage - km ² (%)	Superficie relative totale (%)
La Grande Rivière	394,1 (46,5)	Étang de la décharge	1980	Petit barrage	60 280	5,8 (0,7)	45,1
		Lac du Président	1960	Petit barrage	73 830	5,0 (0,6)	
		Étang de l'écluse	ND*	Forte contenance	843 000	87,6 (10,3)	
		Petit-Lac-Sainte-Anne	1915	Forte contenance	6 754 800	68,0 (17,3)	
		Lac Chaudière	2015	Forte contenance	1 606 000	11,5 (2,9)	
Rivière Ouelle	452,6 (53,5)	Lac Noir	1987	Forte contenance	692 100	6,7 (1,5)	7,2
		Lac Therrien	1960	Forte contenance	1 713 600	25,7 (5,7)	
Total		846,7			11 743 610	210,3	24,8

Les variations dans les conditions météorologiques influencent directement le régime hydrologique et la trajectoire hydrologique au sein du bassin versant. L'accumulation de neige au sol, la fonte du couvert nival et les précipitations liquides affectent la réponse hydrologique du bassin versant. Cela se traduit généralement par l'occurrence d'une crue printanière et automnale (c.-à-d. régime nivo-pluvial), dont l'amplitude est plus élevée à la fonte du couvert de neige. L'hydrogramme de crue de la Figure 14d montre la variation temporelle des débits spécifiques entre 1921 et 2020. Les débits spécifiques maximaux et minimaux standardisés (Figure 14b et Figure 14Erreur ! Source du renvoi introuvable.c) ont permis d'identifier et de quantifier l'intensité des différents étiages et crues. Quelques événements hydrologiques se démarquent par leur amplitude supérieure à 2 écarts-types. Tel est le cas de la crue automnale de 1927 (340 m s⁻¹) et des crues printanières de 1979 (360 m s⁻¹), 1983 (353 m s⁻¹) et 2008 (332 m s⁻¹). Le record historique s'avère celui du 1^{er} avril 1987 où la rivière a atteint un débit de 427 m s⁻¹. Toutefois, une crue de grande amplitude qui est survenue en août 1981 pourrait être supérieure. Cet événement aurait causé la destruction de la station hydrométrique sur la rivière Ouelle, ce qui explique l'absence de données entre 1981 et 1982.

Tableau 2. Présentation de la variabilité intra-annuelle des précipitations totales moyennes à la station météorologique de La Pocatière (stations no. 7054095 et 7054096) entre 1913 à 2020. Les précipitations solides et liquides ont été regroupées sous les précipitations totales.

Mois	Précipitation totale (mm)		Température (°C)					
	Somme cumulée moyenne	Écart-type	Max moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Min moyenne	Écart-type
Janvier	71,4	34,7	-6,7	2,4	-11,3	2,4	-15,8	2,7
Février	65,5	36,0	-5,4	2,4	-10,2	2,5	-14,9	2,8
Mars	66,6	29,6	0,1	1,9	-4,5	2,1	-9,1	2,5
Avril	70,2	36,3	7,4	1,7	2,8	1,4	-1,8	1,4
Mai	76,5	36,1	15,8	2,1	10,0	1,5	4,2	1,2
Juin	85,4	38,1	21,4	1,3	15,6	1,2	9,7	1,4
Juillet	90,6	41,2	24,4	1,4	19,2	5,9	12,9	1,5
Août	85,5	46,2	23,2	1,4	17,5	1,2	11,8	1,6
Septembre	86,5	37,9	18,3	1,6	13,0	1,3	7,5	1,5
Octobre	81,0	38,0	11,3	1,7	6,9	1,3	2,5	1,3
Novembre	73,4	34,9	3,7	1,9	0,1	1,9	-3,4	2,1
Décembre	76,7	38,2	-3,8	2,6	-7,8	2,7	-11,7	2,9
Moyenne annuelle	929,2	8,3	9,1	11,5	4,3	11,0	-0,7	10,4

Cette étude a été conduite dans la portion du corridor fluvial connu pour être utilisé par le saumon atlantique pendant sa migration anadrome. Le parcours migratoire de cette espèce correspond aux segments qui s'étendent de l'embouchure de la rivière Ouelle jusqu'au secteur amont de La Grande Rivière sur environ 48 km de distance (Figure 10).

a. Caractérisation et segmentation fluviale

La segmentation du corridor fluvial a consisté à diviser ce dernier en unités morphodynamiques, c'est-à-dire des tronçons possédant des caractéristiques géomorphologiques, hydrauliques et biologiques similaires, selon une méthode adaptée de Demers et Buffin-Bélanger (2011). La caractérisation du lit mineur, des berges et de la plaine alluviale présents dans les différents segments s'est réalisée par l'analyse de photographies aériennes, d'orthophotographies, de l'imagerie satellitaire et celle réalisée par drone.

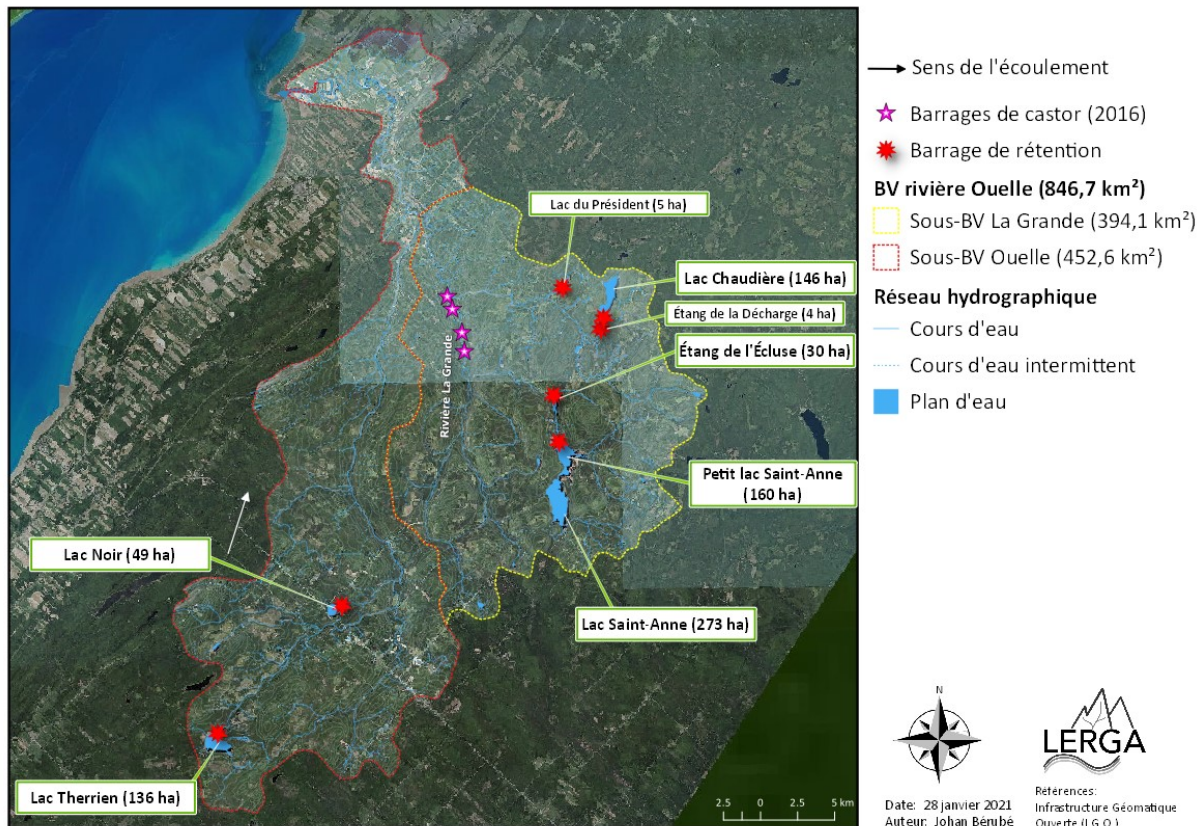


Figure 9. Présentation du contexte géographique du corridor fluvial à l'étude. Les encadrés montrent les principaux plans d'eau du bassin versant, leurs superficies et les principaux barrages.

Tout d'abord, la caractérisation des berges, du lit de la rivière et de la plaine alluviale a été faite sur un tronçon total de 20,7 km (Figure 9). Les données obtenues par interprétation concernent le type de berge (p.ex. meuble, rocheuse, anthropique), l'état de la berge (p.ex. érosion, stable, accumulation), le style fluvial ainsi que l'évaluation de la granulométrie présente dans le chenal. La validation terrain de ces données dans le secteur de La Grande Rivière a été réalisée lors de la campagne en septembre 2020. Cette dernière a également permis de réaliser des levés topographiques du lit et des berges dans ce même secteur. Les levés topographiques ont été effectués à l'aide d'un DGPS base-radio (Leica GS14 ±8-15mm de précision). Le traitement de ces données d'altitudes a permis d'obtenir le profil en long du chenal dans plusieurs sites caractérisés par la présence de barrages.

Les valeurs d'altitudes du lit ont été positionnées le long d'un profil. Cela a permis d'extraire les valeurs de pentes du lit de la rivière. Les pentes moyennes ont été calculées pour l'ensemble des quatre sites. Par la suite, les données topographiques de la Base de données topographique du

Québec (BDTQ) ont été utilisées afin de lier les différents sites dans un même profil longitudinal couvrant le secteur de La Grande Rivière.

Les caractéristiques de l'environnement fluvial ressorties ont permis de segmenter le corridor fluvial à l'étude en unités morphodynamiques. La compréhension de la dynamique fluviale propre à chacun de ces segments contribuera à l'analyse de la trajectoire géomorphologique.

b. Analyses de la trajectoire hydrogéomorphologique et hydrologique

i. Suivi et analyse de la trajectoire HGM

La trajectoire hydrogéomorphologique a été analysée à partir de deux approches différentes, soit l'approche historique (suivi historique) et l'approche hydrogéomorphologique (évolution de la dynamique fluviale). Ces deux approches sont à la fois distinctes et complémentaires.

Afin de déterminer l'évolution historique et hydrogéomorphologique du corridor fluvial à l'étude, plusieurs fenêtres temporelles ont été élaborées à partir de séquences historiques provenant de photographies, d'orthophotographies aériennes et d'imageries satellitaires. Les documents historiques acquis incluent des photographies aériennes de 1963, 1978, 1991 et les orthophotographies de 2001 qui ont été acquises à la géomathèque du Québec. Ensuite, l'orthophotographie 2015 et l'imagerie *Landsat* ont été acquises respectivement par l'entremise de l'Infrastructure Géomatique Ouverte (IGO) du gouvernement du Québec et de *Google Earth*. Les images par drone de 2020 ont été obtenues par la réalisation de cinq vols réalisés en septembre 2020. À ces vols s'ajoutent 5 vols réalisés avec une caméra infrarouge thermique (DJI Zenmuse XT) afin de relever les températures de surfaces des sites de barrages de castor. Les mosaïques ont ensuite été construites pour chacun des quatre sites qui correspondent aux endroits où des barrages de castor ont été localisés. Enfin, l'ensemble des images utilisées ont été géoréférencées, ou leur position a été corrigée, à l'aide d'un logiciel SIG (c.-à-d. ArcMap et QGIS).

D'une part, l'approche historique consiste à caractériser l'évolution des différents segments du corridor fluvial à l'étude à partir d'images aériennes historiques (1963 à 2020). Cela consiste *a priori* d'identifier les changements du territoire (p.ex. utilisation du sol, construction d'infrastructures, etc.), les perturbations, les réajustements, les indices témoignant du dynamisme fluvial (p.ex. bancs accumulation) et d'en évaluer l'état d'équilibre pour chacune des

époques. L'analyse des différentes séquences temporelles permet par la suite de décrire l'évolution des différents segments de rivière dans le temps, de déterminer le style fluvial et les formes dominantes et de ressortir les événements marquants tels que les avulsions, la migration latérale, la formation d'embâcles ou le transport d'importante quantité de bois en rivière. Ensuite, il est possible de déterminer quels ajustements sont en cours afin de les projeter dans le futur.

D'autre part, l'approche hydrogéomorphologique consiste à mesurer, quantifier et analyser plusieurs paramètres de la dynamique fluviale afin d'en comprendre ses tendances évolutives. Pour chacune des images, les limites du lit mineur et des bancs d'accumulation ont été tracées. Cela a permis de quantifier certains indices du dynamisme tels que les taux de migration latérale du lit mineur, les superficies des bancs d'accumulation, la largeur du cours d'eau et l'indice de sinuosité. Le calcul des taux de recul et des superficies érodées a permis par la suite de quantifier l'évolution du lit mineur pour chacune des séquences temporelles.

Les caractéristiques analysées sur le terrain comprennent la granulométrie, la pente, la vitesse d'écoulement, le débit plein bord relatif et la puissance spécifique. Cette dernière a été calculée pour chacun des sites de barrages de castor présent sur La Grande Rivière. La puissance spécifique a été obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$\omega = \frac{\rho g Q_{pb} S}{w} \quad (1)$$

où ρ est la densité de l'eau (1000 kg m^{-3}), g est l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m s}^{-2}$), Q_{pb} est le débit plein bord ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) et S est la pente du lit (m m^{-1}) au niveau du tronçon. Le produit de ces variables est ensuite divisé par la largeur (w) du lit mineur (c.à-d. largeur plein bord) afin d'obtenir la puissance spécifique (ω). Cette caractéristique hydraulique exprime la capacité de l'écoulement à provoquer le transport des sédiments, modifier les formes du lit à l'échelle locale et engendrer le transport de bois en rivière. Plusieurs observations et relevés terrain permettent d'analyser la dynamique hydrosédimentaire responsable de l'évolution de l'environnement fluvial. Cela inclut les données associées à la caractérisation des berges et du lit mineur (p.ex. type et état des berges, granulométrie, etc.). Ces particularités spécifiques à chaque tronçon exercent une influence sur la trajectoire géomorphologique au travers de facteurs tels que la cohésion des berges, la rugosité de l'écoulement et la pente.

Enfin, l'approche hydrogéomorphologique, lorsqu'utilisée conjointement avec l'analyse historique, permet de comprendre et d'anticiper l'évolution du système fluvial à court-moyen terme en fonction des caractéristiques de la dynamique fluviale et des observations faites sur le terrain. Cependant, l'évolution du système fluvial dépend de variables de contrôles qui affectent le régime hydrologique comme l'utilisation du sol et les débits.

ii. Analyse de la trajectoire hydrologique de la rivière Ouelle et ses tributaires majeures

L'ensemble du contexte historique et évolutif du lit mineur est associé en grande partie aux différents processus fluviaux inhérents aux variables de contrôles à l'intérieur du bassin versant. Parmi ces variables, certaines sont dynamiques dans le temps et l'espace (c.-à-d. utilisation du sol, débits) et, par conséquent, peuvent être analysées à court, moyen et long terme.

En premier lieu, les caractéristiques affectant l'hydrologie ont été acquises sur l'ensemble du bassin versant. Pour ce faire, le recensement et la localisation des ouvrages de rétention (nom, type de barrage, année de construction) sur le territoire ainsi que les caractéristiques des lacs endigués (superficie du plan d'eau, capacité volumétrique de stockage, aire de drainage) ont été compilés. Ces caractéristiques ont ensuite été mises en relation avec les caractéristiques des sous bassins versants. Le réseau hydrographique a également été caractérisé et hiérarchisé en utilisant l'ordre de Strahler (Strahler, 1957).

En second lieu, des stations de débits temporaires ont été installées sur trois des plus grands tributaires de la Ouelle dont les débits sont influencés par la présence d'ouvrage de rétention (c.-à-d. rivières Chaude, Sainte-Anne et La Grande). La mise en place de stations consiste à installer des senseurs de pression (*Hobo Water Level Data Logger* par Onset®) dans l'eau à chacun des tributaires couplés à un senseur atmosphérique. Les variations du niveau de l'eau ont ensuite été obtenues pour les mois de juillet à octobre 2020. Les variations relatives du niveau d'eau sont obtenues en soustrayant la série temporelle des valeurs de pressions de l'eau à la série de valeurs atmosphériques.

Afin d'obtenir la correspondance entre les valeurs du niveau de l'eau et de débits, il est nécessaire de construire une courbe de tarage qui établit la relation entre ces deux variables. La prise de données de débits est ainsi requise à différents niveaux afin d'obtenir une relation fidèle aux variations de débits. Les valeurs de débit ponctuelles ont été obtenues par le produit de l'aire

hydraulique et de la vitesse d'écoulement moyenne de la section transversale ($m s^{-1}$) telle que présentée dans l'équation suivante :

$$Q = A \times V \quad (2)$$

Où Q représente le débit ($m^3 s^{-1}$), A l'aire hydraulique (m^2) et V les vitesses d'écoulement ($m s^{-1}$). Les vitesses d'écoulement ont été mesurées à l'aide d'un courantomètre à hélice *Flow Probe* ($\pm 0,1 m s^{-1}$). Les variations du niveau relatif de l'Étang de la Décharge ont également été mesurées dans le temps à l'aide de ce même type de senseurs.

En troisième lieu, la série temporelle des conditions météorologiques pour la période 1921 à 2020 a été acquise à partir des stations météorologiques 7054095 (de 1921 à 1996) et 7054096 (de 1996 à 2020) d'Environnement Canada (Environnement Canada, 2021) localisées toutes deux à La Pocatière. La série temporelle des données hydrologiques de la rivière Ouelle (stations 022701, 022702, 022703 et 022704) pour cette même période a été obtenue à partir des données du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ). Les analyses des séries temporelles de données hydrométéorologiques ont consisté à identifier dans le temps les évènements plus sévères afin de faire ressortir les tendances hydroclimatiques et de les mettre en relation avec la construction d'ouvrage de rétention dans la portion amont. L'identification de ces évènements a été réalisée en calculant la différence entre les débits spécifiques (ou les précipitations totales) et la moyenne annuelle historique standardisée par l'écart-type annuel historique telle qu'illustrée par la formule suivante :

$$Q_{Sp} = \frac{(Q - Q_x)}{\sigma} \quad (3)$$

Où Q_{Sp} représente le débit spécifique standardisé, Q la valeur du débit spécifique (min ou max), Q_x la valeur moyenne du débit spécifique (min ou max) et σ représente l'écart-type. Il est important de noter que les variables de débits spécifiques ont été remplacées par celles des précipitations totales dans l'analyse des conditions météorologiques. De plus, l'utilisation des valeurs de débits spécifiques a été utilisée en raison de l'origine des données qui proviennent de plusieurs stations hydrométriques localisées à des positions longitudinales différentes dans le bassin versant. Par conséquent, les débits spécifiques qui s'obtiennent en divisant les valeurs de débits par l'aire de drainage permettent de comparer des valeurs de débits entre différentes stations hydrométriques sans les biais engendrés par une variation de l'aire de drainage.

En dernier lieu, les résultats des analyses hydrométéorologiques ont pu être comparés aux prévisions modélisées par le CEHQ pour l'horizon 2050 afin de confirmer certaines tendances hydroclimatologiques ainsi que de déterminer la trajectoire hydrologique du bassin versant de la rivière Ouelle

c. Dynamique de barrage de castor et de leurs impacts sur l'hydrogéomorphologie

La caractérisation de la dynamique des barrages de castor sur La Grande Rivière a consisté à décrire les sites où il y a présence de barrages de castor et d'analyser les barrages et leur interaction avec la dynamique fluviale. Pour ce faire, la caractérisation des barrages localisés au niveau des quatre sites a été réalisée pendant la campagne de terrain en septembre 2020. L'information concernant la configuration (barrage simple, multi chenaux ou en palier), les conditions hydrauliques (vitesse, profondeur et perméabilité), les dimensions de la structure (hauteur moyenne, de la chute, épaisseur moyenne et largeur du barrage; voir annexe 2, photo 1 et 7), la granulométrie présente au niveau du lit (amont et aval) ainsi que la composition relative des matériaux composant les barrages a été prélevée. Parmi ses paramètres relevés, les vitesses d'écoulement ont été mesurées à l'aval du barrage uniquement (voir annexe 2, photo 2) étant donné les vitesses homogènes et faibles en amont de ces barrages. Finalement, la hauteur de chute mesurée correspond à la différence de hauteur entre la surface de l'eau à l'amont et l'aval du barrage.

Des caméras de chasse ont ensuite été installées dans le but d'obtenir une séquence de photos prises par intervalle d'environ 30 minutes. Ces séquences temporelles ont permis d'acquérir de l'information sur l'interaction entre les conditions hydrauliques et hydrologiques selon les fluctuations de débits dans le temps.

L'analyse de l'information recueillie sur la dynamique de barrage a permis de comparer à la fois les différents sites en fonction des différents paramètres, de leur configuration et leur localisation ainsi que leur effet sur la dynamique fluviale et la libre circulation du saumon.

IV RÉSULTATS

a. Caractérisation et segmentation fluviale

La caractérisation HGM et l'analyse des variables morphodynamiques ont permis de segmenter le corridor fluvial de la Rivière Ouelle et la Grande Rivière en quatre unités morphodynamiques. L'ensemble des unités possède un chenal généralement sinueux, méandrique et parfois divagant, dont l'amplitude augmente considérablement avec la réduction des pentes à l'approche de l'embouchure de la rivière Ouelle (Figure 10). Cette rivière graveleuse s'écoule généralement dans des dépôts glaciaires et fluviatiles anciens dans sa portion amont et des dépôts marins typiques des environnements estuariens de la plaine côtière du Bas-Saint-Laurent dans sa portion aval.

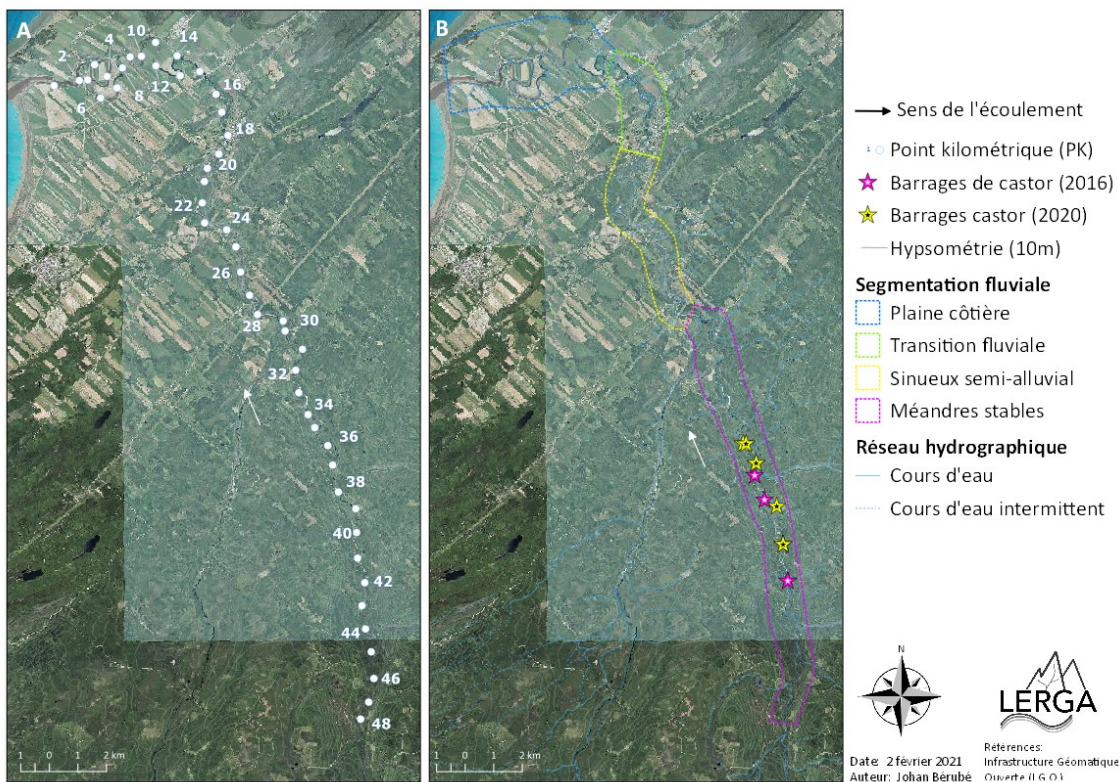


Figure 10. Distribution longitudinale des points kilométriques à partir de l'estuaire de la rivière Ouelle (A) et segmentation du corridor fluvial (B). Les barrages de castors observés en 2016 et 2020 dans le segment D sont représentés par des étoiles.

Le Tableau 3 présente les caractéristiques morphodynamiques des trois segments présents à l'intérieur du corridor fluvial de la rivière Ouelle (segments A à C) et de celui de La Grande Rivière

(segment D). La portion amont du parcours migratoire se situe dans La Grande Rivière (segment D). La portion amont de ce segment correspond à un environnement typique des plaines modelées par le castor, c'est-à-dire un fond de vallée hérité de l'activité du castor sur le territoire depuis plusieurs décennies (Figure 11). Ce type de plaine alluviale modelée par le castor se caractérise par une largeur de plaine généralement élevée (> 200m), un style fluvial sinueux, parfois divagant, avec méandres stables. La pente et, par conséquent, la puissance spécifique sont faibles (moyenne de 28 w/m², voir Tableau 4). Les berges sont généralement composées de sédiments fins (100% des 38,7 km de berges sont meubles) et sont stables (100%) dans ce segment (D). La présence de marécages riverains et d'anciens chenaux inondés peut également être observée (Figure 11,).

Le segment C (figure 12b) est la portion amont du corridor fluvial à l'étude localisé dans la rivière Ouelle. Ce segment se caractérise par des pentes et une puissance spécifique plus élevées (+- 398 w/m²), un chenal encaissé ainsi qu'une plaine alluviale étroite (c.-à-d. 40 à 50m de largeur). Les berges y sont majoritairement stables (85,9%), malgré les berges généralement meubles (92,2%) et les pentes plus élevées. La présence de berges rocheuses (7,8%) et d'une cascade à forte pente peut également être observée dans le secteur de la cavée (PK 21).

Tableau 3. Caractéristiques morphodynamiques de chacun des segments présents dans le corridor fluvial à l'étude.

Segment / rivière	Style fluvial	Pente du lit selon les courbes hypso. du BDTQ (m m ⁻¹)	Puissance spécif. (w) estimée à partir des résultats de Demers et al. (2014) (W / m ²)	Largeur de la plaine (m)	Berges						Nb de barrage de castor observé en 2020		
					Type km (%)			État km (%)					
					Rocheuse	Meuble	Anthropique	Érosion	Stable	Accumulation			
A	Plaine côtière	Rivière Ouelle	Méandre	0,0018	7,9	>500	0,0 (0,0)	2,8 (92,5)	2,3 (7,5)	2,8 (9,1)	27,5 (90,0)	0,3 (0,9)	0
B	Transition fluviale		Sinueux - divagant	0,0045	39,5	>50	0,0 (0,0)	7,9 (94,8)	0,4 (5,2)	0,1 (1,5)	7,9 (94,6)	0,3 (3,9)	0
C	Sinueux semi-alluvial		Sinueux	0,011	251,2	40-50	1,3 (7,8)	14,8 (92,2)	0,0 (0,0)	1,7 (10,8)	13,8 (85,9)	0,5 (3,3)	0
D	Méandres stables	La Grande Rivière	Sinueux à méandres	0,0031	Non-disponible	>200	0,0 (0,0)	38,7 (100,0)	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)	38,7 (100,0)	0,0 (0,0)	5

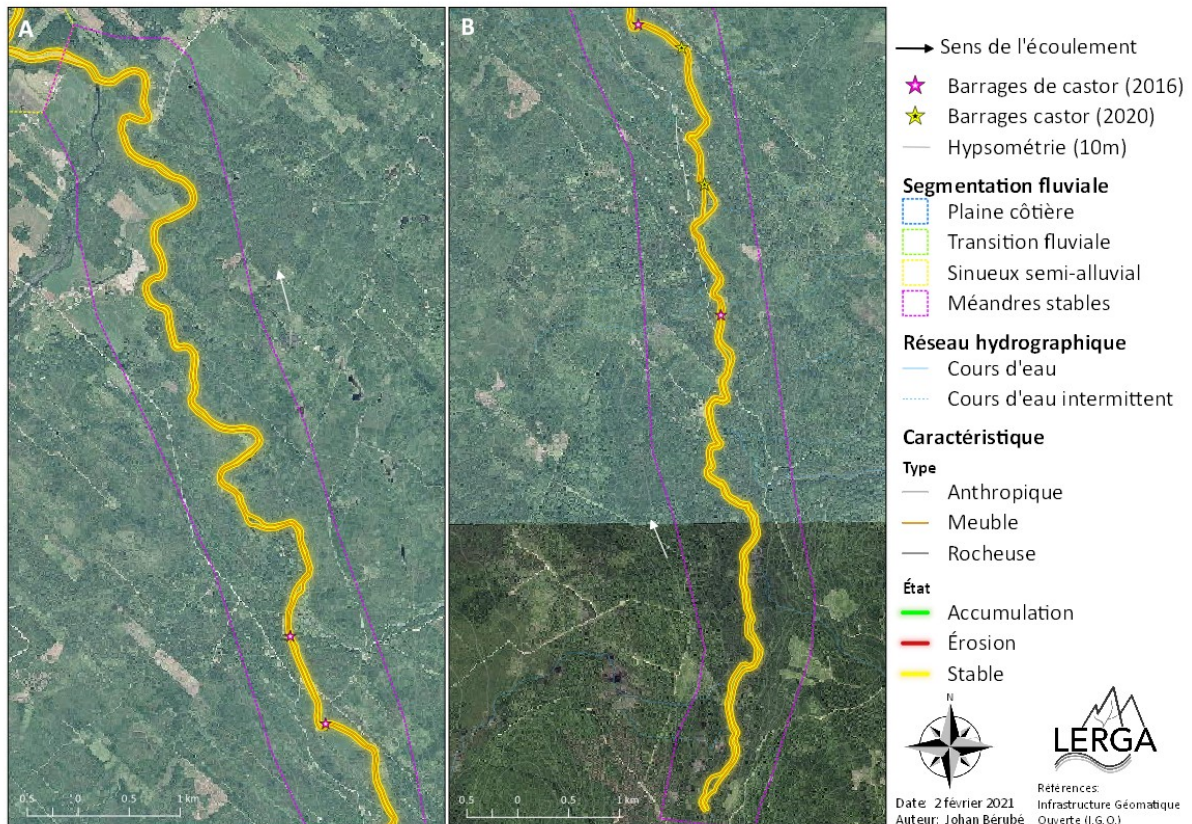


Figure 11. Distribution longitudinale du type et de l'état des berges dans la portion nord (A) et sud (B) du segment de méandres stables (segment D) et de son secteur de plaine modelée par le castor situé à l'amont du corridor à l'étude.

Le segment B se caractérise par la transition fluviale de la rivière Ouelle, passant ainsi d'un style sinueux à celui plus divagant, dans sa portion urbaine, vers un segment à méandres en aval (Figure 12b). Le changement de style fluvial est occasionné par la réduction rapide des valeurs de pente observée à la hauteur du village de Saint-Pacôme (PK15 à PK19). Ce segment possède des berges généralement meubles (94,8%), stables (94,6%) ainsi que des berges anthropisées (5,2%) où l'on peut observer des enrochements, des levées artificielles et autres ouvrages de stabilisation. Finalement, le segment A est la portion de la rivière Ouelle localisée au niveau de la plaine côtière du fleuve Saint-Laurent (Figure 12a). Ce segment se caractérise par des conditions hydrauliques fortement influencées par les marées, par la présence de méandres dont l'amplitude est élevée (indice de sinuosité $\geq 2,9$) ainsi que par une plaine alluviale très large (>500 m). Les berges observées sont majoritairement meubles (92,5%), parfois anthropisées (7,5%) et majoritairement stables (90,0%).

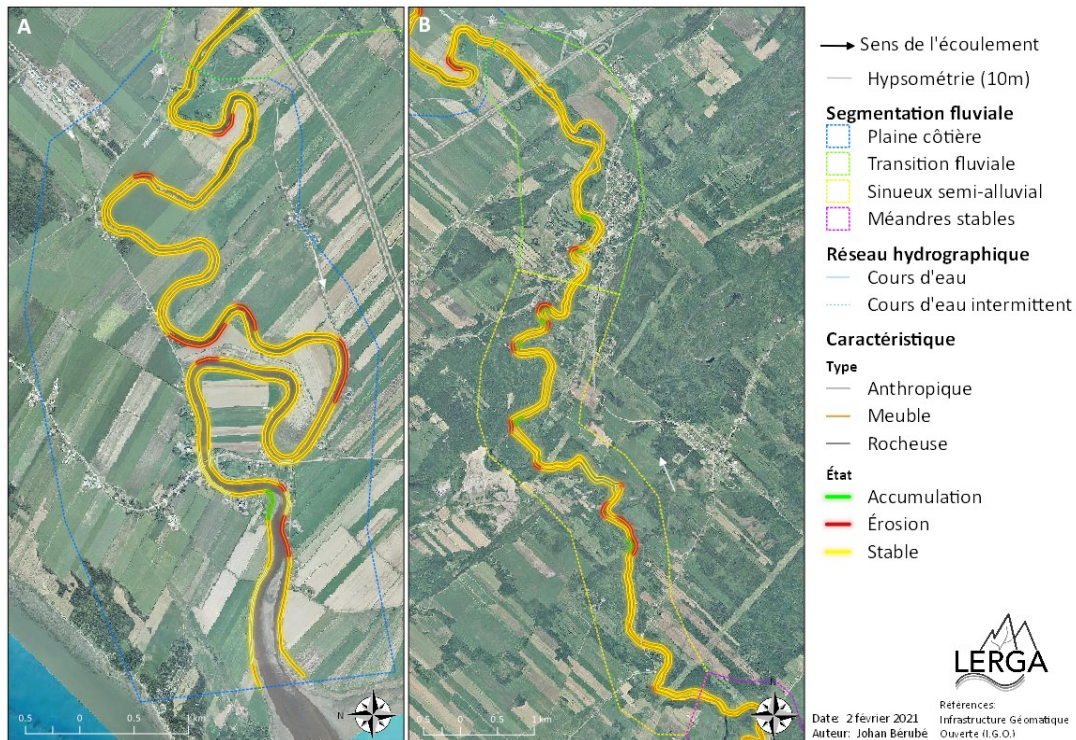


Figure 12. Distribution longitudinale du type et de l'état des berges dans les segments de la plaine côtière (A), de la transition fluviale et sinueux semi-alluviale (B) présents dans le corridor fluvial de la rivière Ouelle.

Enfin, les différents segments ont été délimités en fonction de plusieurs caractères qui les rendent distincts. Ces différences au niveau des caractéristiques morphodynamiques leur procurent une sensibilité ainsi qu'une résilience unique à chacun face aux événements perturbateurs naturels (p.ex. variations au niveau des débits, des taux d'érosion, de la production en bois) et anthropiques (p.ex. linéarisation, drave, travaux de stabilisation) survenus dans le passé.

b. Analyses de la trajectoire HGM et hydrologique

Le caractère évolutif des systèmes fluviaux témoigne conjointement du dynamisme des cours d'eau, de leur sensibilité face aux perturbations et de leur capacité à se réajuster (ou résilience). L'analyse de la trajectoire HGM et hydrologique permet de retracer, d'identifier et de localiser des tendances hydroclimatiques, des événements perturbateurs ou des réajustements du système fluvial et de ses variables de contrôles (c.-à-d. conditions hydrométéorologiques, utilisation du sol, etc.) à l'échelle du bassin versant afin de comprendre et d'anticiper son évolution.

i. Suivi et analyse de la trajectoire HGM

L'approche historique a permis de caractériser l'évolution du territoire, de l'environnement fluvial et du lit mineur sur environ 12 km du corridor à l'étude (PK25 à PK36) et ce, de 1963 jusqu'à 2019 (voir photographies aériennes à l'annexe 3). Cette étape a permis, pour chacune des époques, de caractériser sommairement la dynamique fluviale au travers de différentes caractéristiques (p.ex. présence de signes d'érosion et d'accumulation, de banc d'accumulation et de convexité) ou paramètres morphodynamiques (c.-à-d. style fluvial, largeur du chenal, superficie des bancs d'accumulation, indice de sinuosité, taux d'érosion), afin d'identifier et de localiser les perturbations et les ajustements morphologiques survenus.

Tout d'abord, aucune modification majeure quant à l'utilisation du territoire à l'intérieur du bassin versant n'a été observée au fil du temps. Le territoire est majoritairement forestier dans sa portion amont tandis que la portion aval est davantage agricole et urbaine. De plus, aucun signe d'intervention majeure ou d'aménagement dans le cours d'eau n'a été observé, à l'exception de la construction et la réfection de barrages de différentes envergures sur les lacs de tête entre 1915 et 2015 (Tableau 1). Les activités de la drave jusqu'au début des années 1950 peuvent expliquer en partie certaines évolutions du système de la Ouelle dans le temps. L'analyse de la trajectoire permet de faire ressortir les dynamiques propres aux différents segments, et ce depuis les années 1960 pour la trajectoire HGM et 1921 pour la trajectoire hydrologique. D'une part, plusieurs signes témoignent d'un certain dynamisme typique aux environnements fluviaux sinueux et meubles dans la portion amont du segment C. Ces signes consistent à la présence de berges meubles, de bancs d'accumulation et de convexité dénudés de végétation. Pour le segment D, d'autres signes témoignent de la stabilité du corridor fluvial dans ce tributaire de la rivière Ouelle. Ces signes de stabilité consistent à la présence d'étangs, de marécages riverains et de bras morts (ancien bras de cours d'eau) formant une forme de prairie de castor dans la plaine alluviale de La Grande Rivière. L'activité contemporaine du castor et son effet sur la modification de la plaine alluviale semblent davantage actifs dans le secteur aval de La Grande Rivière. Toutefois, l'effet de l'animal sur la plaine alluviale peut être observé sur le segment D en entier.

Ensuite, la Figure 13 confirme la stabilité quasi générale en présentant l'évolution de la géométrie planimétrique du lit mineur de 1963 à 2019 entre les PK 25 et PK 37 des segments C et D. Les encadrés en pointillé rouge illustrent les modifications les plus importantes du tracé fluvial qui

ont été observées dans l'analyse. Malgré la présence d'indices de dynamisme dans sa portion amont, le segment C s'avère plutôt stable dans le temps à l'exception du tronçon directement en amont de la cavée (PK 24 et 25). Le tracé fluvial, les caractéristiques et les paramètres morphométriques sont demeurés stables dans la portion de La Grande Rivière, soit au niveau du segment D. Toutefois, quelques modifications peuvent être observées au niveau des tronçons actuellement affectés par la dynamique des barrages de castors (secteur colonisé actuellement par le castor). Ces changements dans la géométrie planimétrique du lit mineur s'expliquent principalement par les processus liés à la présence de barrages de castor. En effet, la dynamique des barrages de castor engendre des fluctuations du niveau d'eau en fonction du cycle de construction et destruction des barrages. Par conséquent, cette fluctuation modifie la largeur du lit mineur et la réactivation des chenaux de débordement. L'inondation de la plaine causée par l'effet de refoulement peut être observée majoritairement dans la portion amont, soit dans le secteur actuellement colonisé par le castor (Figure 13).

Enfin, l'évolution historique du lit mineur illustre qu'il a été plutôt stable dans le temps malgré les indicateurs de dynamisme dans le segment sinueux semi-alluvial (segment C) dans la rivière Ouelle. La plaine alluviale héritée par la présence du castor montre également une certaine stabilité du tracé fluvial de La Grande Rivière. Par conséquent, l'évolution des paramètres morphodynamiques tels que la largeur du chenal, la superficie des bancs d'accumulation, l'indice de sinuosité et les taux d'érosion, n'a pas été quantifiée d'une époque à l'autre en raison de l'absence de modifications majeures du lit mineur.

i. Analyse de la trajectoire hydrologique

L'ensemble du contexte historique et évolutif du lit mineur est associé à la variation des différents processus fluviaux inhérents aux variables de contrôles (débits liquides et solides) à l'intérieur d'un bassin versant. Parmi ces variables d'importances, le régime hydrologique associé aux conditions hydrométéorologiques et ses variations (Figure 14), la mise en place d'ouvrages de rétention en fonction des sous-bassins versants (Tableau 1), ainsi que les variations dans l'utilisation du sol (voir section précédente) ont été considérés dans les analyses hydrologiques à long terme (plus de 50 ans).

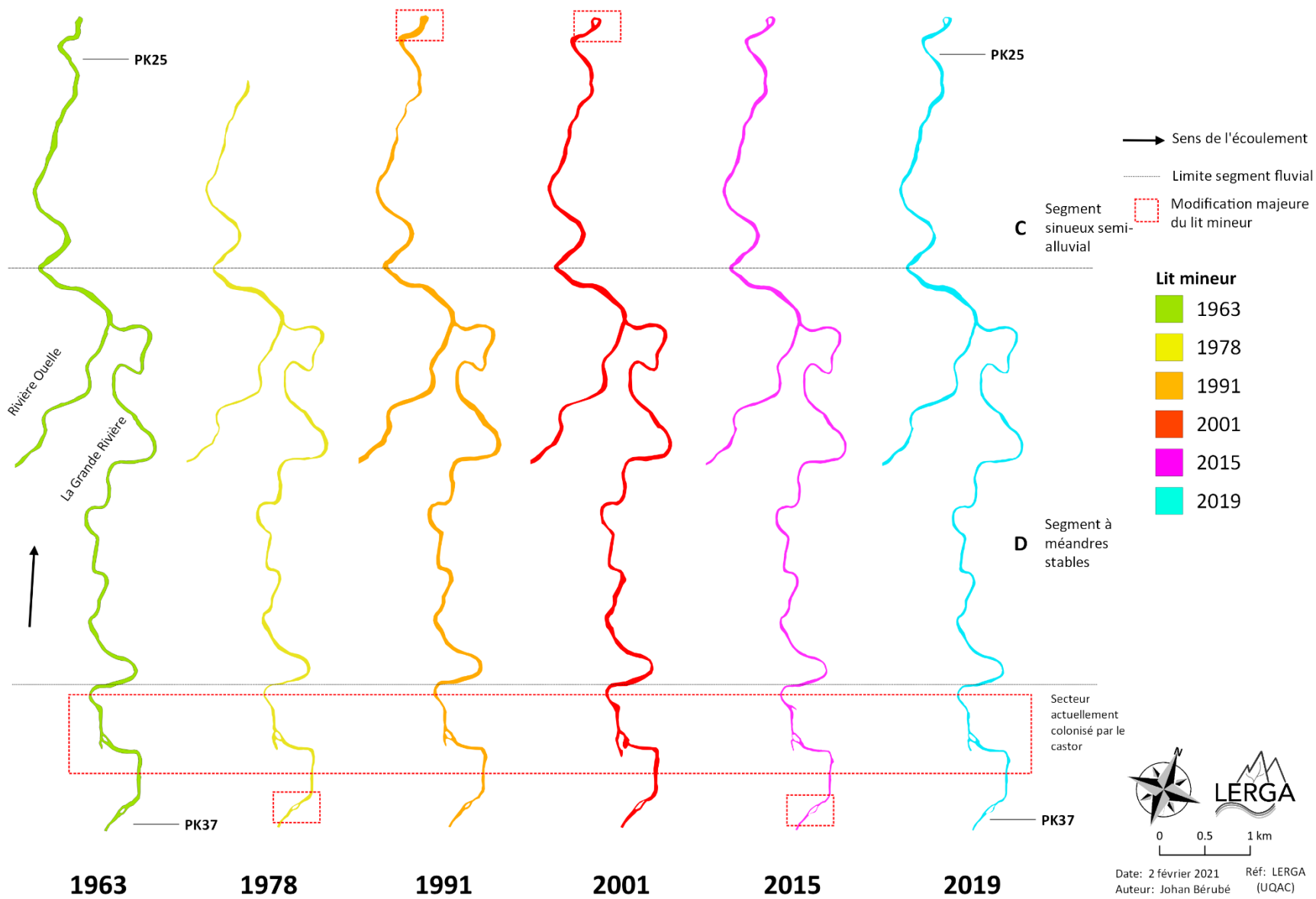


Figure 13. Évolution historique du lit mineur entre 1963 et 2019 entre les PK 25 et PK39

D'autre part, la relation entre les conditions hydrométéorologiques, les variations spatio-temporelles des débits de la rivière Ouelle, de La Grande Rivière et de deux de ses tributaires principaux (c.-à-d. rivière Chaude et Sainte-Anne) ont été analysées à court terme (moins de 1 an). La compréhension de ces variations et les tendances identifiées ont permis de décrire la trajectoire hydrologique à court, moyen et long terme du bassin versant de la rivière Ouelle.

En premier lieu, les précipitations totales enregistrées entre 1921 et 2020 varient considérablement d'une année à l'autre (Figure 14a), montrant des tendances positives ou négatives qui s'étalent sur une période variant de 10 à 20 ans. Néanmoins, aucun de ces cycles de précipitation totale ne semble corrélérer directement avec les anomalies de débits spécifiques standardisés minimaux (étiages) et maximaux (Figure 14b et Figure 14c) et ce, qu'elles soient positives ou négatives.

En second lieu, les débits spécifiques standardisés minimaux et maximaux montrent tous deux des périodes d'anomalies négatives et positives. La période 1941-1967 se caractérise par des débits de crues (débits spécifiques maximaux) et d'étiage (débits spécifiques minimaux) considérablement en deçà de la moyenne historique pour la période 1921-2020. L'augmentation des débits spécifiques est ensuite observée pour les périodes respectives de 1968-1986, pour les débits minimaux, et de 1968-2020, pour les débits maximaux. Les débits d'étiage reviennent enfin vers des valeurs standardisées négatives pour la période contemporaine de 1987 à 2020.

Malgré l'absence de corrélations entre les données de précipitation totale et les débits spécifiques maximaux et minimaux, la construction de barrages de rétention sur les lacs en amont peut affecter la fluctuation des débits d'étiage en diminuant la quantité d'eau dans les bassins versants durant les périodes estivales. En effet, sept barrages de petites et grandes tailles ont été dénombrés dans la portion amont des sous-bassins versants des rivières Ouelle (deux barrages) et La Grande Rivière (cinq barrages) (CEHQ, 2021). Les plans d'eau endigués drainent une superficie totale de 210,3 km², soit 24,8% de la superficie totale du bassin versant de la rivière Ouelle (Tableau 1). D'ailleurs, le sous bassin versant de La Grande Rivière compte à lui seul cinq barrages dans ses lacs de tête qui drainent une superficie totale de 177,9 km², soit 45,1% de l'aire de drainage.

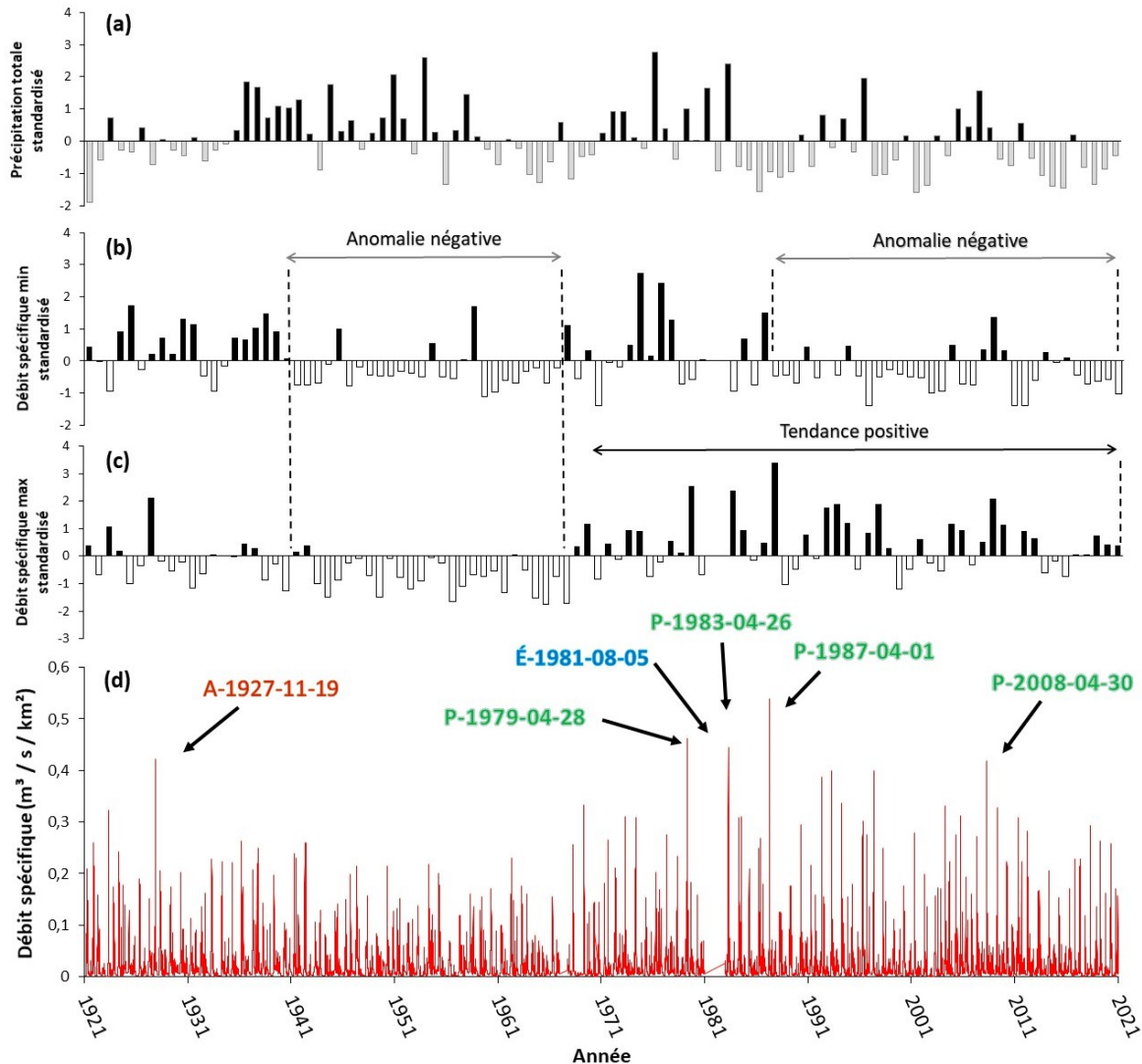


Figure 14. Présentation des séries temporelles du débit spécifique (a) minimal et maximal (b) standardisé par la moyenne annuelle ainsi que le débit journalier de la rivière Ouelle pour la période 1921 à 2020. Les crues de grandes magnitudes ont été identifiées par les flèches.

La contenance en eau des réservoirs varie entre 60 280 m³ et 6 754 800 m³. La plupart de ses barrages de rétention ont été mis en place à partir de 1960, sauf celui du Petit-Lac-Saint-Anne qui a été construit en 1915 avant la série temporelle sur les données de débits de la rivière Ouelle. Leurs impacts sur la réponse et la trajectoire hydrologique diffèrent d'un barrage à l'autre selon le type de barrage, leur aire de drainage et la position du réservoir dans son bassin versant.

Enfin, la Figure 15 met en relation les conditions hydrométéorologiques avec le niveau d'eau de l'Étang de la Décharge (Figure 15a), ainsi que les débits des trois principaux tributaires (Saint-Anne, Chaude et La Grande) et de la rivière Ouelle (Figure 15b) entre le 1er juillet et le 31 octobre

2020. Au total, cinq évènements de pluie de 25 mm et plus, concentrés entre le mois d'août et octobre, ont été identifiés. Les apports en eau affectent directement les débits de chacun des cours d'eau et le niveau relatif de l'Étang de la Décharge. Toutefois, l'impact de ces évènements diffère selon la sévérité des précipitations (quantité, intensité), le temps entre deux évènements, l'aire de drainage, les pentes des cours d'eau, la présence d'infrastructures de rétention d'eau, la hiérarchisation (ordre de Strahler) et la configuration du réseau hydrographique.

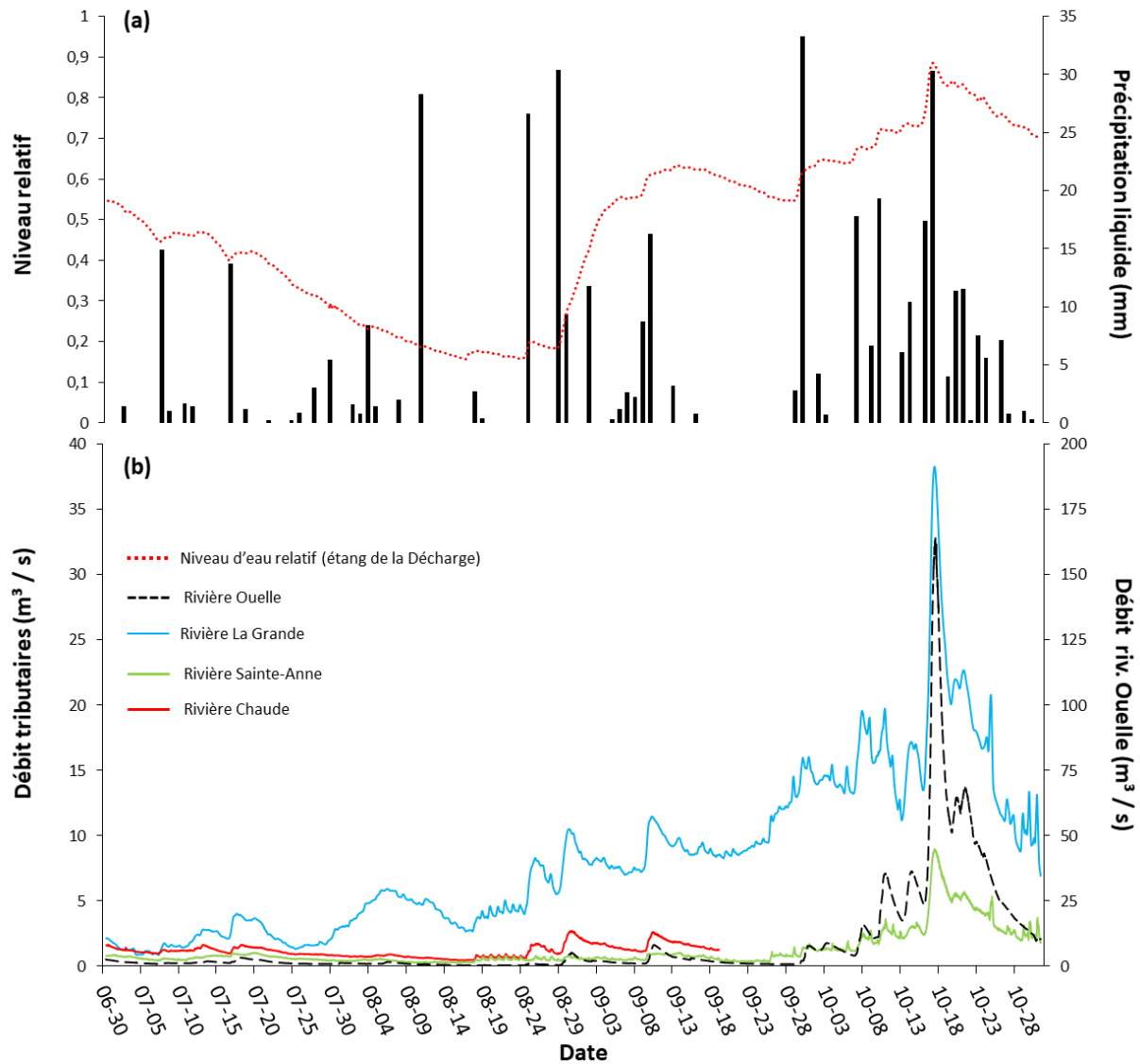


Figure 15. Présentations des (a) conditions hydrométéorologiques, du niveau d'eau relatif de l'Étang de la Décharge en fonction des (b) débits des trois principaux tributaires et de la rivière Ouelle pour la période du 1^{er} juillet 2020 au 31 octobre 2020.

La différence entre les seuils de réactions en fonction des précipitations se reflète généralement par des différences d'amplitude ou par l'absence de pics de crue pour chacun des événements de pluie. Tel est le cas de La Grande Rivière qui réagit davantage aux épisodes de pluie que la rivière Ouelle malgré leurs superficies (394.1 et 452.6 km²) et leurs ordres de Strahler similaires (cours d'eau d'ordre 5). Pour les plus petits cours d'eau, la configuration du réseau hydrographique et la présence d'ouvrages de rétention semblent affecter la réponse hydrologique des plus petits bassins versants (figure 13b). Par exemple, la réponse hydrologique de la rivière Chaude semble plus rapide que la rivière Sainte-Anne malgré son plus petit bassin versant. Cela peut s'expliquer partiellement par la présence de deux barrages de rétention (capacité de retenue de plus de 7.5 millions de m³) en amont de la rivière Sainte-Anne, comparativement à un seul sur la rivière Chaudière (retenue de 1.6 million de m³). Il est important de noter que l'absence de données de débits après le 18 septembre 2020 s'explique par le vol du capteur de pression qui a été installé au niveau de la rivière Chaude. En ce qui a trait aux fluctuations des lacs de tête, les niveaux d'eau de l'Étang de la Décharge montrent une diminution constante tout au long de l'été, malgré plusieurs événements de pluie de 15 mm et moins, jusqu'à l'occurrence de trois événements majeurs de pluie au début août. La hausse du niveau d'eau s'est par la suite perpétuée au fil des événements subséquents et est demeurée relativement élevée jusqu'à la fin du suivi.

c. Analyses des quatre sites de barrages de castor

Les barrages de castor présents dans le corridor fluvial de La Grande Rivière ont été localisés, caractérisés et mesurés tout au long du segment D afin d'analyser leurs impacts sur le parcours migratoire du saumon. En 2016, quatre sites où le castor a construit des barrages ont été identifiés et localisés le long du segment D (Furois, 2018; figure 10). La position de certains barrages en 2020 est toutefois légèrement différente de celle de 2016 (Figure 16). En effet, les barrages de castor étaient positionnés entre les PK37 et 42 en 2016, comparativement à la distribution longitudinale entre les PK36 et PK 41 en 2020. Le secteur d'activité du castor s'étendait sur environ 5 km pour ces deux périodes. La Figure 17 présente la distribution spatiale des barrages le long du profil longitudinal pour l'année 2020. La distance entre les barrages varie entre 1,2 et 1,9 km. Les profils en long plus détaillés de chacun des sites sont présentés à l'annexe 3. La configuration, les matériaux, la perméabilité et autres caractéristiques diffèrent d'un barrage à l'autre.

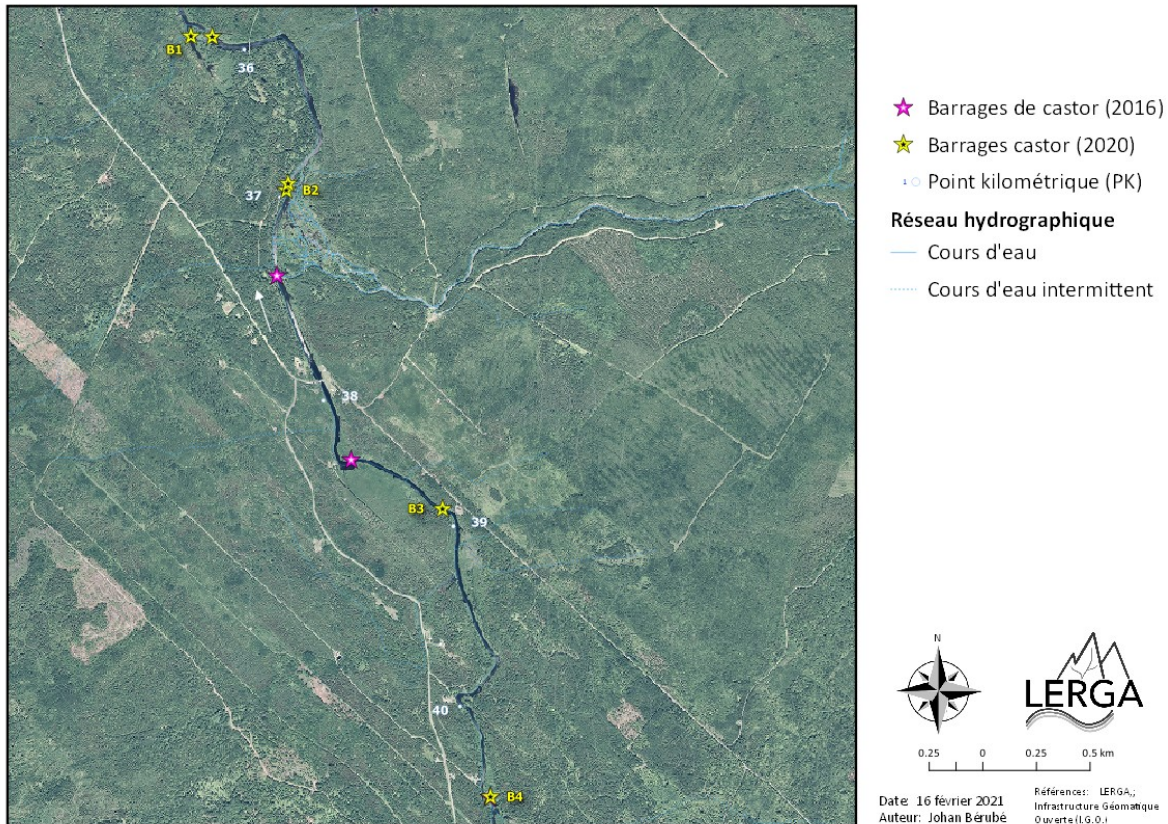


Figure 16. Distribution longitudinale des barrages de castor caractérisés à l'automne 2020.

Le **Tableau 4** résume les caractéristiques de chacun des barrages et de l'environnement fluvial immédiat des quatre sites où il y a présence de barrages. Les différences majeures observées entre les barrages s'observent au niveau de la disposition de certains barrages, soit une configuration double (chenal de gauche et droite du barrage 1 par exemple; Figure 18, photos 4 et 5 à l'annexe 2) ou en succession (barrage 2; Figure 19), ainsi qu'au niveau des dimensions mesurées. Les conditions hydrauliques et les matériaux composant les barrages sont plutôt similaires d'un site à l'autre. Les vitesses d'écoulement sont généralement faibles à l'aval des barrages, reflétant une faible perméabilité de l'infrastructure ainsi que des contraintes à l'écoulement du lit (c.-à-d. faible profondeur et forte rugosité). La puissance spécifique calculée pour chacun des sites de barrage montre de faibles puissances spécifiques variant entre 16,3 et 37,3 W / m². Cette variabilité s'explique à la fois par des valeurs de pentes variant entre 0,0027 et 0,0058 m / m². Le site du barrage 3 possède la valeur plus élevée (37,3 W m⁻²) en raison de la pente plus élevée et la faible largeur du lit mineur (Figure 20 et Figure 23).

Les barrages sont généralement constitués de branches, de troncs d'arbre de faibles diamètres, de galets et de petits blocs et de limon sur la façade amont de la structure (Figure 20d et Figure 21d). Cette similarité dans la composition des barrages est causée par l'homogénéité des matériaux disponibles au niveau du substrat et des bandes riveraines dans ce secteur. Au niveau de la dimension, les hauteurs de chute à l'étiage varient de 0,2 m (barrage 1-rive droite) à une hauteur maximale de 1,3 m pour le barrage 3 par exemple (Tableau 4). Les largeurs des barrages vont varier de 13,1 m à 37,8 m pour le barrage le plus large (barrage 1 – rive droite). Ces valeurs de dimensionnement permettent d'établir des ratios de l'épaisseur sur la hauteur qui varient de 2,2 pour le barrage 2 aval et 3,3 pour le barrage 3 (Tableau 4). Les variations dans la profondeur entre les sections amont et aval de barrage sont prédominantes dans chacun des sites. L'analyse de l'imagerie thermique ne montre toutefois pas de différences au niveau des températures de surface entre l'amont et l'aval (voir annexe 3). Cela s'explique par le fait que les barrages sont davantage imperméables dans leur partie inférieure en raison de la présence de limon tapissé sur la façade amont des barrages. Par conséquent, l'écoulement en aval provient majoritairement des débits de surface. De plus, ces faibles variations de températures de surface semblent davantage associées à la présence de végétation qui procure de l'ombre à l'intérieur du lit mineur.

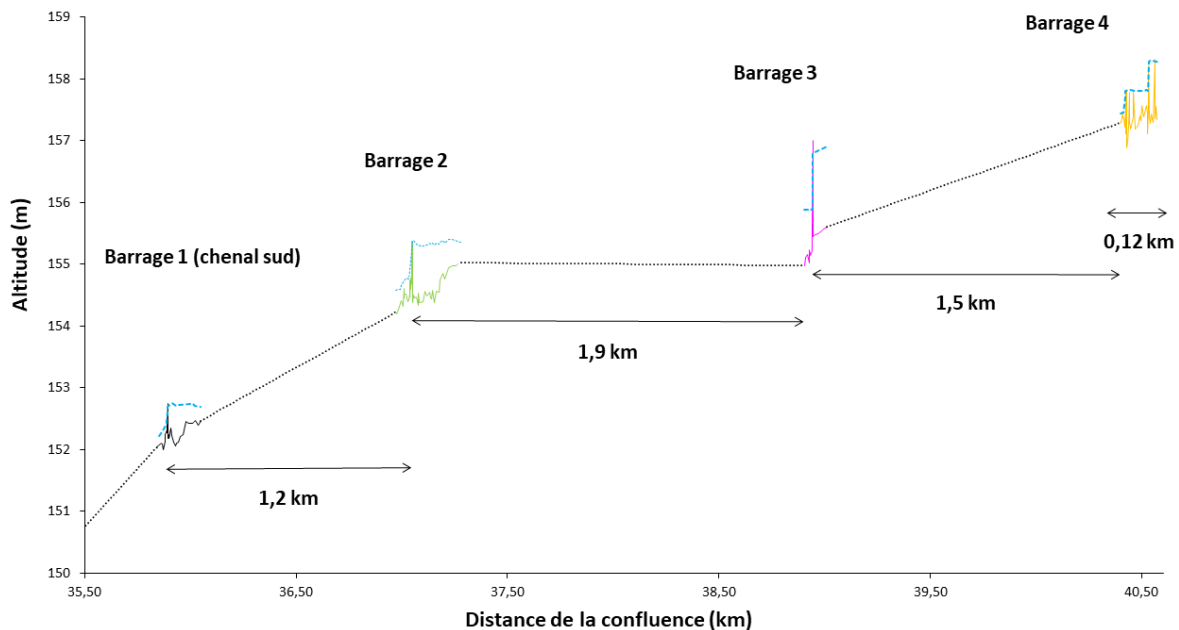


Figure 17. Distribution spatiale des barrages de castor 1 à 4 le long du profil en long répertoriés en 2020. La ligne bleue pointillée représente l'altitude de la surface de l'eau au moment des levés topographiques tandis que les lignes pleines illustrent l'altitude du lit de la rivière La Grande.

À l'échelle de la plaine alluviale, l'influence des barrages s'observe sur les formes, la dynamique hydrosédimentaire et les conditions hydrauliques de chacun des sites de barrages. Les Figure 22 à Figure 25 montrent l'impact des activités du castor sur la plaine alluviale. En modifiant les conditions hydrauliques à l'échelle locale, les zones de refoulements provoquent l'inondation au niveau de la plaine alluviale. Cela a pour effet d'augmenter la largeur du lit mineur, la profondeur et les processus de sédimentation. Les impacts se traduisent également par la création de milieux humides riverains (p.ex. modification de la végétation riparienne favorisant ainsi les espèces hydrophiles, augmentation des échanges avec la nappe phréatique, modification du drainage et des sols), la réactivation d'anciens chenaux ou la formation de chenaux secondaires. L'effet sur les conditions hydrauliques s'observe également sur la portion aval par la formation de seuils à faible profondeur. Lorsque la perméabilité est très faible, l'arrêt de l'écoulement peut survenir. Tel est le cas du chenal de gauche (sud) du site du barrage 1 où la source de l'écoulement à l'aval du barrage semblait provenir majoritairement de la percolation au travers du barrage et de la nappe phréatique (Figure 18d).



Figure 18. Présentation des deux barrages du site du barrage 1. Les photos A et D montrent le barrage du chenal nord (chenal de droite) tandis que les photos B, C et D montrent le barrage du chenal sud (chenal de gauche).



Figure 19. Présentation des deux barrages successifs en palier du site du barrage 2. Les photos A, B et C montrent le barrage en amont tandis que la photo D montre le petit barrage en construction à l'aval.



Figure 20. Présentation de l'imposant barrage du site de barrage 3. La photo A illustre la fosse profonde en amont du barrage tandis que les photos B et C montrent la portion aval. La photo D montre bien le substrat limoneux avec matière organique qui 's'accumule au fond de la fosse en amont.

Tableau 4. Présentation des caractéristiques des quatre barrages de castor et de l'environnement fluvial immédiat de chacun des sites.

Barrage		Hydraulique				Dimension					Composition relative (%)				Commentaire	
		Vitesse aval (m s ⁻¹)	Profondeur (cm)		Perméabilité relative (%)	Puissance spécifique (ω) (W m ⁻²)	Hauteur moy (cm)	Hauteur chute (Hc) (cm)	Épaisseur (m)	Largeur (m)	Ratio Hc- épaisseur	Matériel ligneux		Sédiment		
			Amont	Aval								Branche	Tronc	Fin		Grossier
Barrage 1	Rive gauche	0,0	80	7	0,0	21,4	82,0	75	2,5	13,1	0,30	50,0	15,0	30,0	5,0	Barrage dans chacun des canaux
	Rive droite	0,4	59	18	35,0	16,3	35,0	17	1,0	37,8	0,17	50,0	15,0	5,0	30,0	
Barrage 2	Amont	0,4	85	36	25,0	16,3	80,0	44	2,3	22,5	0,19	50,0	20,0	15,0	15,0	Succession amont-aval de deux barrages
	Aval	0,5	52	21	40,0	16,3	55,0	18	1,2	15,2	0,15	60,0	10,0	0,0	30,0	
Barrage 3		0,4	67	33	20,0	37,3	140,0	101	4,6	24,7	0,22	55,0	15,0	15,0	15,0	
Barrage 4		0,2	55	40	40,0	25,3	70,0	30	1,8	21,6	0,17	50,0	15,0	20,0	15,0	Deux échancrures dans le barrage



Figure 21. Présentation du site du barrage 4. Les photos A et C montrent respectivement le barrage du site 4 ainsi que la portion en amont du barrage (vue vers l'amont) tandis que la photo B montre le barrage avec une vue vers l'aval. La photo D montre présente le substrat graveleux avec les dépôts de sable et de limons par-dessus le gravier.

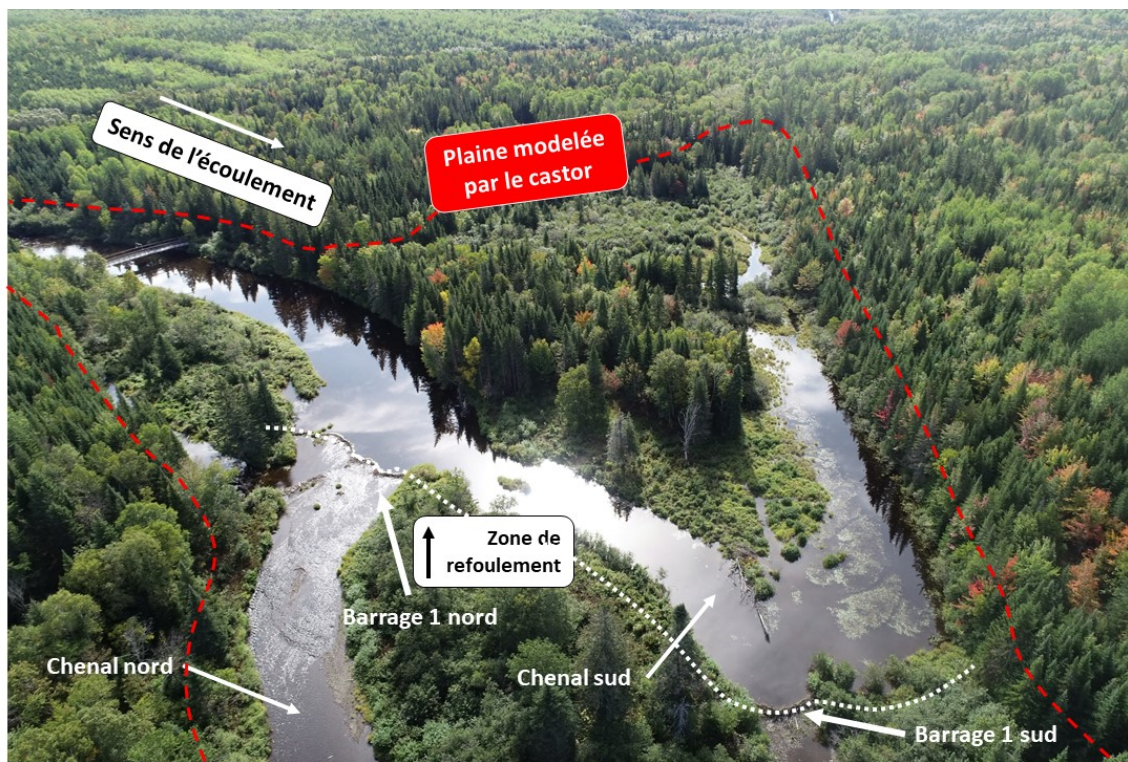


Figure 22. Photographie oblique par drone illustrant l'influence de l'activité du castor sur la plaine alluviale du site du barrage 1.

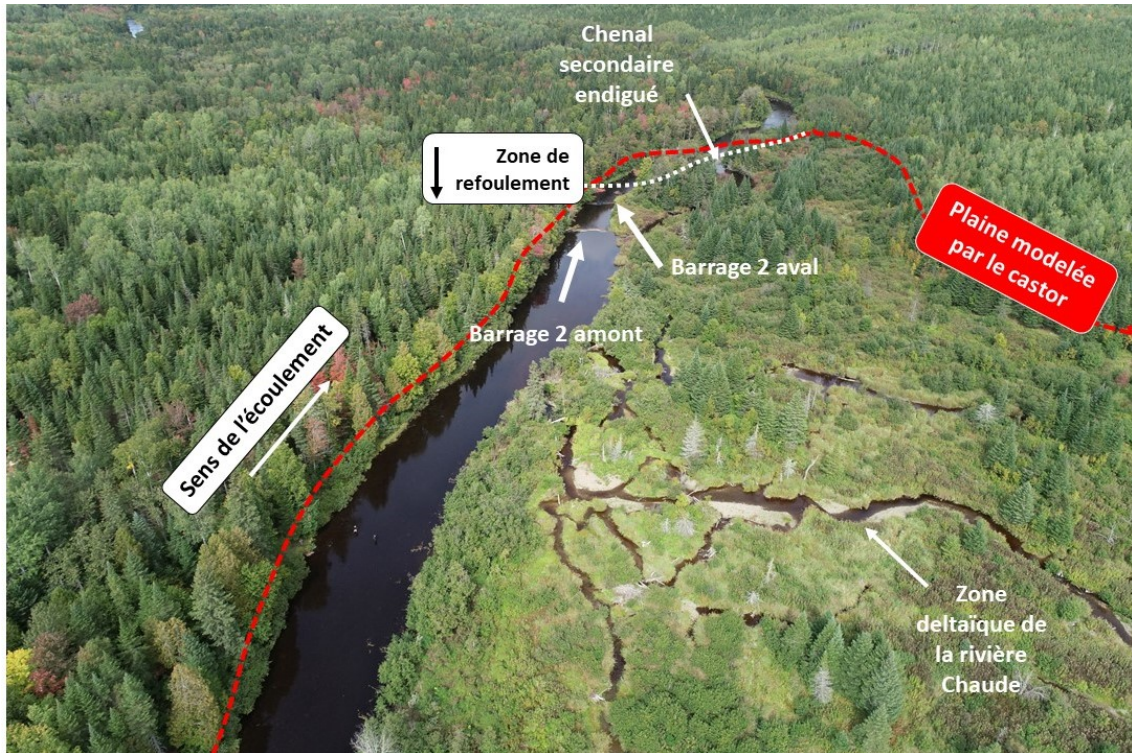


Figure 23. Photographie oblique par drone illustrant l'influence de l'activité du castor sur la plaine alluviale du site du barrage 2.

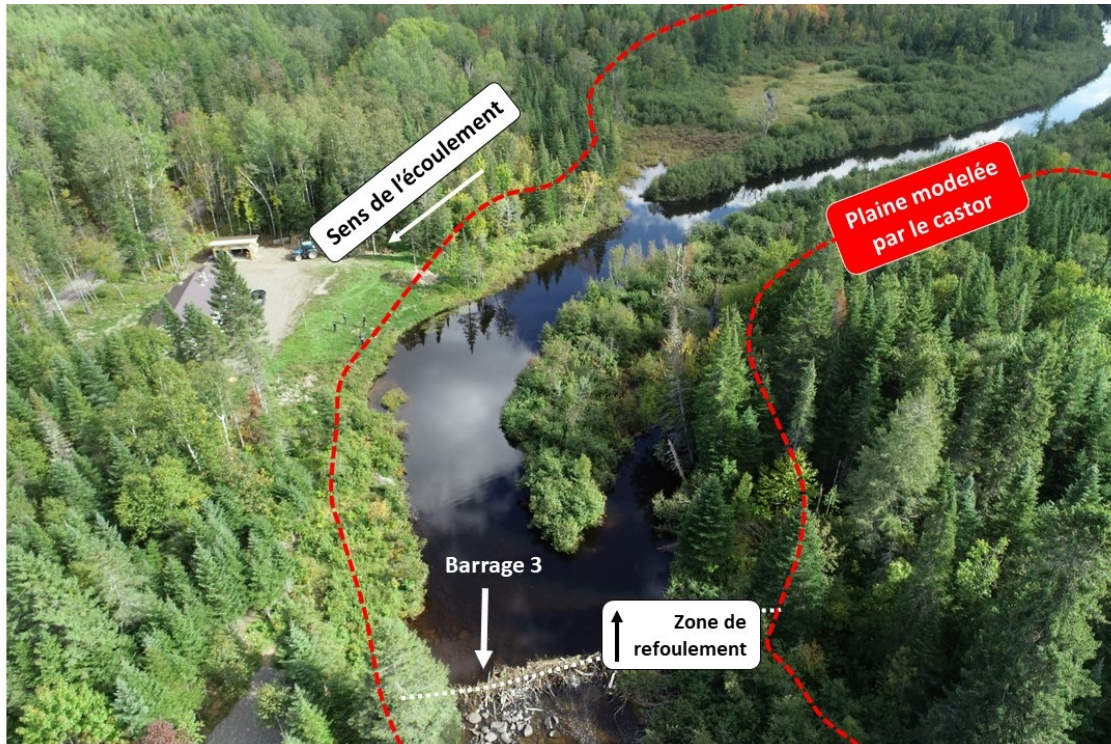


Figure 24. Photographie oblique par drone illustrant l'influence de l'activité du castor sur la plaine alluviale du site du barrage 3.

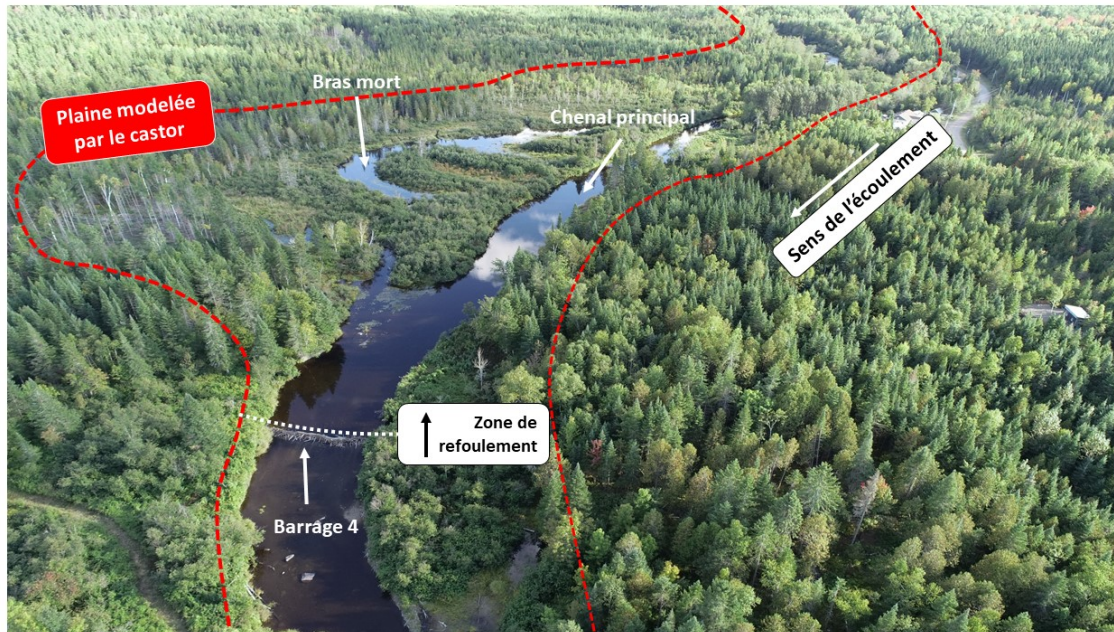


Figure 25. Photographie oblique par drone illustrant l'influence de l'activité du castor sur la plaine alluviale du site du barrage 4.

Résumé des résultats :

A - Caractérisation et segmentation fluviale

- Le corridor fluvial a été divisé en quatre segments (trois sur la rivière Ouelle et un sur La Grande) possédant des caractéristiques morphodynamiques similaires : segment à méandres au niveau de la plaine côtière du fleuve Saint-Laurent (A), segment de transition entre divagant et à méandre (B), segment sinueux semi-alluvial (C) et segment à méandres stables avec plaine alluviale modelée par la présence du castor (D);
- Les berges sont majoritairement meubles (entre 92,2% et 100% selon les segments), avec présence d'affleurements rocheux dans le segment semi-alluvial (C) et de berges anthropiques dans la portion du village de Saint-Pacôme (B) et de la plaine côtière (A);
- Le pourcentage de berges en érosion est relativement faible, variant de 0 km de berges en érosion dans le segment sur la Grande Rivière (D) jusqu'à 2,8 km de berges en érosion dans le segment aval situé dans la plaine côtière du Saint-Laurent (segment A);

B.i - Trajectoire hydrogéomorphologique (HGM)

- L'analyse de la trajectoire HGM a permis de caractériser l'évolution du territoire, de l'environnement fluvial et du lit mineur sur environ 12 km de La Grande Rivière (PK25 à PK36) de 1963 jusqu'à 2019;

- Aucune modification majeure quant à l'utilisation du territoire à l'intérieur du bassin versant n'a été observée au fil du temps;
- Aucun signe d'intervention majeure ou d'aménagement dans le cours d'eau n'a été observé, à l'exception de la construction et la réfection de barrages de différentes envergures sur les lacs de tête entre 1915 et 2015 ;
- Pour le segment D, plusieurs indicateurs témoignent de la stabilité du corridor fluvial dans ce tributaire de la Rivière Ouelle. Ces indicateurs de stabilité consistent à la présence d'étangs, de marécages riverains et de bras morts formant une forme de prairie de castor dans la plaine alluviale de la Grande Rivière.
- Il y a une stabilité quasi générale au niveau de l'évolution de la géométrie planimétrique du lit mineur de 1963 à 2019 entre les PK 25 et PK 37 des segments C et D.
- Le tracé fluvial, les caractéristiques et les paramètres morphométriques sont demeurés stables dans la portion de La Grande Rivière (segment D);
- Quelques modifications majeures peuvent être observées au niveau des tronçons actuellement affectés par la dynamique des barrages de castors. Ces changements dans la géométrie planimétrique du lit mineur s'expliquent principalement par les processus liés à la présence de barrages de castor. Leur présence modifie la largeur du lit mineur, la réactivation des chenaux de débordement et engendre des inondations de la plaine causée par l'effet de refoulement.

B.ii - Trajectoire hydrologique

Historiques – 1921-2020

- Les précipitations totales enregistrées entre 1921 et 2020 varient considérablement d'une année à l'autre montrant des tendances positives ou négatives qui s'étalent sur des cycles variant de 10 à 20 ans;
- Aucun de ces cycles de précipitation totale ne semble corrélérer directement avec les anomalies de débits minimaux (étiages) et maximaux (crues);
- La période 1941-1967 se caractérise par des débits de crues (débits spécifiques maximaux) et d'étiage (débits spécifiques minimaux) considérablement en deçà de la moyenne historique (1921-2020);
- Il y a augmentation des débits spécifiques minimaux pour la période de 1968-1986 et une augmentation des débits maximaux pour la période 1968-2020;
- Les débits d'étiage ont des valeurs standardisées négatives pour la période contemporaine de 1987 à 2020;
- Sept barrages de petite et grandes tailles ont été dénombrés dans la portion amont des sous-bassins versants des rivières Ouelle (2 barrages) et La Grande (5 barrages);
- Malgré l'absence de corrélations entre les données de précipitation totale et les débits spécifiques, la construction de barrages sur les lacs en amont peut affecter la fluctuation des débits d'étiage en diminuant la quantité d'eau dans les bassins versants durant les périodes estivales;

- Les plans d'eau endigués pas des retenues d'eau drainent une superficie totale de 203,6 km², soit 24,0% de la superficie totale du bassin versant de la rivière Ouelle;
- La plupart des barrages ont été mis en place à partir de 1960, sauf celui du Petit-Lac-Saint-Anne qui a été construit en 1915;

- Période récente de l'étude (été et automne 2020)

- Cinq évènements de pluie de 25 mm et plus, concentrés entre le mois d'août et octobre, ont été identifiés;
- La Grande Rivière réagit davantage aux épisodes de pluie que la rivière Ouelle malgré leurs superficies similaires (394.1 et 452.6 km²) et leurs ordres de Strahler similaires (cours d'eau d'ordre 5);
- La réponse hydrologique de la rivière Chaude semble plus rapide que la rivière Sainte-Anne malgré son plus petit bassin versant. Cela peut s'expliquer partiellement par la présence de deux barrages (capacité de retenue de plus de 7.5 millions de m³) en amont de la rivière Sainte-Anne, comparativement à un seul sur la rivière Chaudière (retenue de 1.6 million de m³);
- Les niveaux d'eau de l'Étang de la Décharge montrent une diminution constante tout au long de l'été, malgré plusieurs évènements de pluie, jusqu'à une augmentation significative à la suite de trois évènements majeurs de pluie au début août ;

C – Caractérisation des barrages de castor

- La position de certains barrages en 2020 (entre les PK 36 à 41) est légèrement différente de celle de 2016 (entre les Pk 37 et 42);
- Le secteur d'activité du castor s'étend sur environ 5 km pour ces deux périodes ;
- La distance entre les barrages varie entre 1,2 et 1,9 km;
- Les différences majeures observées entre les barrages s'observent au niveau de la disposition de certains barrages, soit une configuration double (chenal de gauche et droite par exemple) ou en succession (barrage 2 par exemple) ainsi qu'au niveau des dimensions mesurées;
- Les conditions hydrauliques (vitesses, profondeurs et perméabilités) et les matériaux (pourcentage de branches, troncs, et granulométrie) composant les barrages sont plutôt similaires d'un site à l'autre ;
- La similarité dans la composition des barrages est causée par l'homogénéité des matériaux disponibles au niveau du substrat et des bandes riveraines dans ce secteur;
- La puissance spécifique calculée pour chacun des sites de barrage montre de faibles puissances spécifiques ;
- À l'échelle de la plaine alluviale, l'influence des barrages s'observe sur les formes (milieux humides, bras morts, chenaux de débordement...), la dynamique hydrosédimentaire (accumulation de sédiment en amont) et les conditions hydrauliques (variabilité des vitesses amont-aval et au niveau des sections transversales).

V DISCUSSION

Telles que décrites dans les chapitres précédents, les variables de contrôle et leur évolution dans le bassin versant influencent les trajectoires HGM et hydrologique ainsi que la dynamique des barrages de castor. Les cycles et les tendances évolutives des conditions hydrologiques et les impacts du castor sur l'environnement fluvial de La Grande Rivière ont été analysés pour la période de 1921 à 2020. En premier lieu, les interactions entre les trajectoires HGM et hydrologiques du corridor à l'étude seront discutées. L'évaluation de l'impact des changements hydrogéomorphologiques et hydrologiques ainsi que l'impact des activités du Castor du Canada (*Castor canadensis*) sur la libre circulation du saumon atlantique (*Salmo salar*) seront ensuite abordés. Enfin, des pistes d'interventions potentielles et de suivis des dynamiques seront proposées et discutées ainsi que leurs impacts sur le système fluvial.

a. **Trajectoire hydrogéomorphologique et hydrologique leur interaction avec la dynamique de barrage**

Les systèmes fluviaux sont connus pour leur caractère évolutif inhérent aux composantes de la dynamique fluviale responsable à la fois des processus morphogènes et de réajustements. L'analyse de la trajectoire HGM entre 1963 et 2019 n'a pas montré de changements majeurs dans la portion du corridor fluvial de La Grande Rivière (PK24 à PK38) à l'exception des changements au niveau de la plaine causés par l'activité du castor. L'absence de réajustement majeur ou les quelques changements mineurs observés s'expliquent par la résilience de l'environnement fluvial face aux perturbations dans le corridor fluvial à l'étude et par des puissances spécifiques relativement faibles dans ce segment. La résilience du milieu est associée à la présence du castor et de ces barrages qui permet de dissiper l'énergie de l'écoulement par l'effet de refoulement (Butler et Malanson, 2005; Pollock *et al.*, 2017) ainsi qu'en facilitant la formation et l'accès à sa plaine alluviale (Pollock *et al.*, 2017). Ces zones de refoulement permettent également de stocker des sédiments au niveau du lit mineur et de la plaine alluviale favorisant ainsi l'entretien des formes du chenal et de la plaine alluviale (Butler et Malanson, 2005). Néanmoins, l'absence de modification du lit mineur ne signifie pas systématiquement qu'aucun d'évènements morphogènes, responsables des perturbations et des phases de réajustements, n'est pas survenu par le passé. Demers *et al.* (2014) ont d'ailleurs identifié trois phases de réajustements hydrogéomorphologiques dans l'analyse de la trajectoire HGM d'un tronçon d'environ 80 km de la rivière Ouelle :

1. **1961 à 1980** : Stabilisation du lit mineur caractérisée par la diminution de sa largeur et de la superficie des bancs d'accumulation en réponse à l'arrêt de l'activité de la drave en 1952 et le relâchement des sédiments retenus par les barrages en 1958;
2. **1980 à 2001** : Augmentation de la largeur du cours d'eau et de la quantité de sédiments dans le chenal initié par la crue majeure de 1981;
3. **2001-2011** : Stabilisation caractérisée également caractérisée par une diminution de la largeur et de la superficie des bancs d'accumulation, mais cette fois-ci causée par l'épuisement des sources de sédiments stockés dans le chenal depuis 1981.

Ensuite, l'analyse des conditions hydrométéorologiques depuis 1921 a permis de confirmer l'occurrence d'évènements morphogènes de différentes amplitudes, d'en décrire l'évolution et la récurrence et de ressortir des tendances. Toutefois, quelques éléments doivent être considérés afin de nuancer l'interprétation de la trajectoire hydrologique. Par exemple, la présence d'un barrage de type déversoir de surface, possiblement deux en comptant celui dont la date de construction est inconnue (Tableau 1), à forte contenance dans le sous bassin versant de La Grande Rivière peut avoir influencé les débits minimaux et maximaux en raison de l'effet de ces barrages sur les crues (écrêtement des pics de crue) et sur les étiages (réduction des débits minimaux). La présence de barrages de castor dans les tronçons amont de La Grande Rivière a pour effet d'emmagasiner un certain volume d'eau et de favoriser les échanges avec la nappe phréatique (Butler et Malanson, 2005, Pollock *et al.*, 2012; Pollock *et al.*, 2017). Les effets sur le régime hydrologique sont similaires, dans une moindre mesure, à ceux occasionnés par la présence de barrage de rétention. Toutefois, il s'avère difficile de dissocier les effets du castor et ceux des barrages sur le régime hydrologique (p.ex. débits annuels minimaux et maximaux) et la trajectoire hydrologique (c.-à-d. tendances saisonnières ou à long terme) en raison de son impact plus faible et de la variabilité spatio-temporelle de la dynamique de barrage (c.-à-d. éphémérité des barrages, localisations et configurations différentes d'une année à l'autre).

L'influence des barrages de rétention en tête de bassin versant s'observe au niveau des débits spécifiques minimaux et maximaux entre la période 1941 à 1967 où une anomalie négative survient malgré l'anomalie positive des précipitations totales standardisées (Figure 14). Ce phénomène illustre la nécessité d'avoir un seuil minimal de précipitation requis (ou seuil de réaction) avant d'observer une réponse hydrologique dans le bassin versant de la rivière Ouelle et ses sous-bassins. Cela peut être en partie expliqué par le temps de remplissage nécessaire des

lacs de tête endigués (c.-à-d. lacs Therrien, Petit-Lac-Saine-Anne et, fort probablement, l'Étang de l'Écluse) avant de pouvoir déborder et se déverser dans leurs exutoires qui viennent alimenter les bassins versants de La Grande Rivière et de la rivière Ouelle (Figure 9). La période d'anomalie négative observée dans les débits spécifiques minimaux après 1986 peut s'expliquer en partie par la construction du barrage de l'Étang de la Décharge en 1980 et celui du lac Chaudière en 2015 couplée aux précipitations annuelles totales plus faibles pour cette période. La tendance positive des débits spécifiques maximaux standardisés malgré l'anomalie négative des précipitations totales peut s'expliquer par l'occurrence d'évènements de pluie plus intense, mais dont la récurrence est plus faible dans l'année. Cela a pour effet de causer d'importants pics de crues, sans toutefois augmenter significativement la somme totale de précipitations tombées au cours d'une même année. La comparaison des débits maximaux (Figure 26) et minimaux (Figure 27) de la rivière Ouelle avec deux autres bassins versants proximaux et ayant des données disponibles depuis les années 1920 permet de valider certaines hypothèses émises pour la trajectoire hydrologique de la rivière Ouelle. Ainsi, les anomalies négatives des débits maximaux observées pour la période 1927 à 1968 ne s'observent pas sur les deux autres bassins versants où il semble y avoir une variabilité naturelle sans changements aussi marqués que sur la rivière Ouelle. À l'inverse, les débits maximaux semblent plus élevés par rapport à la moyenne sur la rivière Ouelle pour la période récente (1983 à 2020). Au niveau des débits d'étiages, la même tendance s'observe à l'intérieur des trois bassins versants avec des valeurs plus faibles à la moyenne pour la période récente (Figure 27).

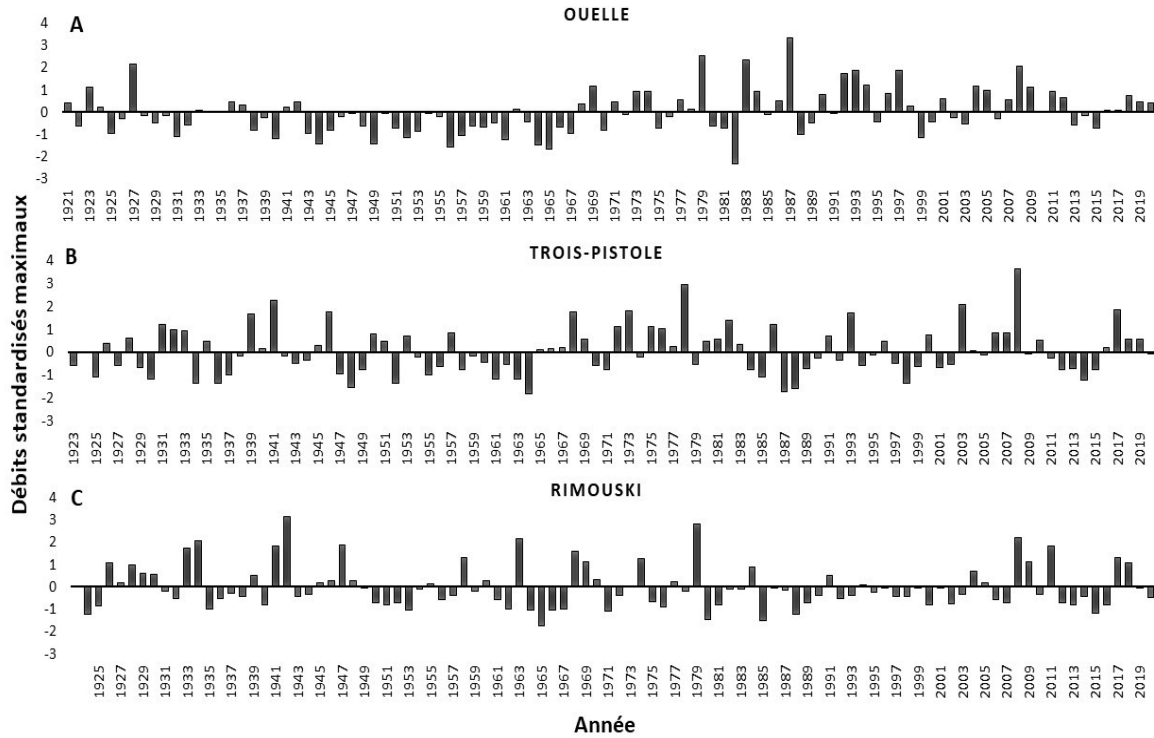


Figure 26. Comparaison des débits standardisés maximaux pour les bassins versants de la rivière Ouelle (A), Trois-Pistoles (B) et Rimouski (C) entre 1921 et 2020.

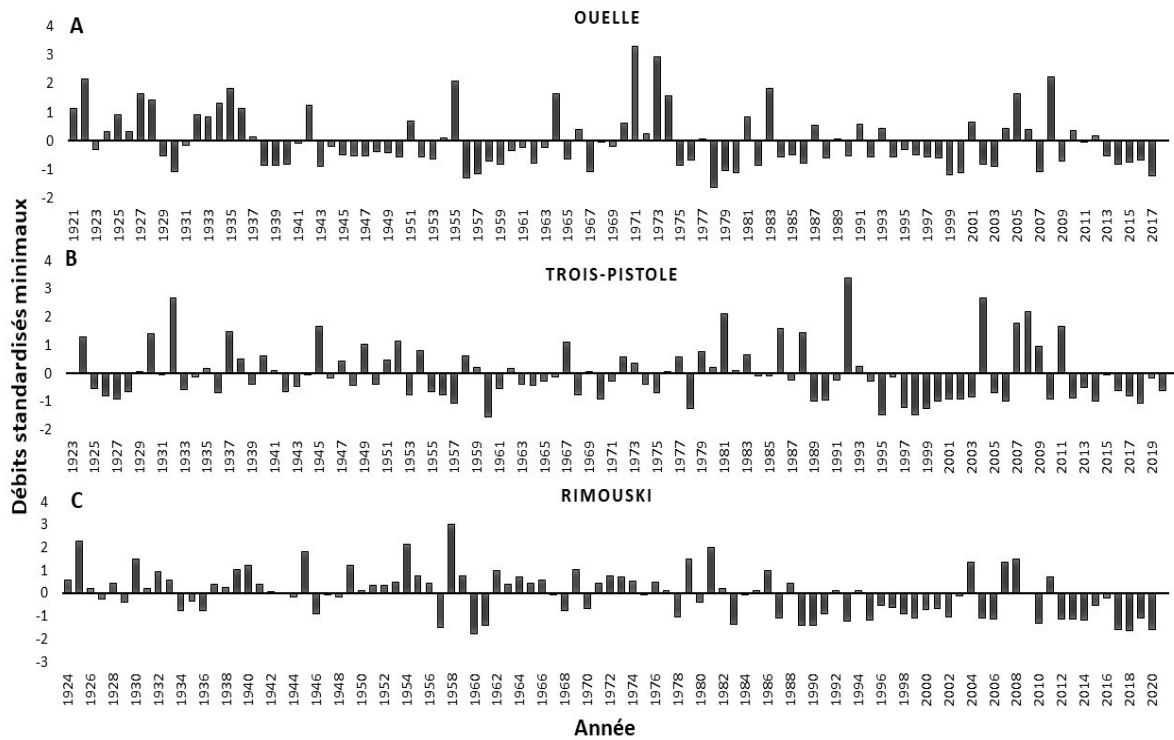


Figure 27. Comparaison des débits standardisés minimaux pour les bassins versants de la rivière Ouelle (A), Trois-Pistoles (B) et Rimouski (C) entre 1921 et 2020.

L'analyse d'évènements de crues récents permet de caractériser la réponse hydrologique des trois tributaires principaux de La Grande Rivière et de la rivière Ouelle pour la période de juillet à octobre 2020. Cette analyse montre que La Grande Rivière s'avère le cours d'eau dont la réponse hydrologique est la plus rapide et dont le seuil de réponse nécessite la plus faible quantité de précipitations afin de réagir (seuil de réaction). Par conséquent, cela confirme que les évènements hydrologiques perturbateurs qui ont été identifiés dans le temps sur la rivière Ouelle ne sont pas nécessairement survenus et ont probablement affecté, dans une moindre mesure, la dynamique fluviale de cette rivière.

Enfin, les segments de rivière propices à la construction de barrages de castor nécessitent préalablement des conditions hydrologiques et morphodynamiques favorables à l'implantation de l'espèce. Ces conditions qui ont été mises en place par la dynamique fluviale sont également soumises aux variations spatio-temporelles de la dynamique fluviale. Par conséquent, l'état d'équilibre du système fluvial est étroitement associé à la dynamique des barrages de castor dans les segments de rivières où le castor est présent en raison de son impact sur les processus fluviaux et la trajectoire hydrogéomorphologique. Les ajustements face aux perturbations issues des dynamiques de barrages et fluviales (p.ex. construction de barrages, onde de rupture de barrage ou crue printanière) résultent en une multitude d'interactions entre celles-ci et de réajustement. Les environnements fluviaux colonisés par le castor sont toutefois connus pour leur résilience face aux perturbations (Pollock *et al.*, 2017).

b. Trajectoire hydrologique, la dynamique des barrages et leur effet sur la libre circulation du saumon atlantique

Les variations du régime hydrologique sont d'une grande importance pour le comportement migratoire et la reproduction du saumon atlantique (Thorstad *et al.*, 2008). En effet, les évènements hydrologiques envoient le signal de migration vers les sites de reproduction en plus de faciliter le passage d'obstacles infranchissables lors des faibles débits. La trajectoire hydrologique détermine ainsi le succès de la migration, la distribution et la qualité des sites de reproduction pour l'espèce (Moir *et al.*, 2006; Tailor *et al.*, 2010).

La dynamique des barrages influence certainement la libre circulation du saumon (Tailor *et al.*, 2010), mais affecte également la morphologie, la dynamique fluviale ainsi que la qualité des habitats. Ces structures contribuent à modeler un cadre physique et des conditions

environnementales pour les organismes vivants côtoyant les écosystèmes lotiques, lentiques et riverains. Malgré le fait qu'une grande majorité d'études mentionnent l'amélioration de la qualité des habitats et soulignent la réponse positive des salmonidés dans les cours d'eau ayant des castors et du bois en rivière (Roni *et al.*, 2015, Pollock *et al.*, 2017), son influence sur la migration anadrome du saumon demeure toutefois nuancée. Par conséquent, les impacts de la dynamique de barrage sur le comportement migratoire du saumon seront discutés sous forme d'un bilan élargi présentant les impacts positifs et négatifs possibles du parcours migratoire de la rivière Ouelle.

i. Connectivité hydrologique et impacts potentiels des lacs endigués

Tout d'abord, l'influence de la variation des conditions hydrologiques (c.-à-d. débits, niveau d'eau, marées) sur les patrons de migration et la disponibilité des salmonidés en rivière est reconnue depuis longtemps par les pêcheurs (Earl Hodgson, 1927 dans Milner *et al.*, 2012). Malgré cela, aucune réponse issue d'un consensus scientifique claire et tranchée ne peut être fournie en ce qui a trait au débit requis pour permettre au poisson de pénétrer dans l'estuaire, d'entamer sa migration anadrome (Milner *et al.*, 2012).

La variabilité des conditions hydrologiques affecte la migration en entraînant un coût énergétique supplémentaire lors des hauts débits (augmentation des vitesses d'écoulement), en interrompant le lien hydrologique entre les habitats lors de faibles débits (étiages), ainsi qu'en fournissant un signal à la montaison aux saumons en attente. Par conséquent, les individus doivent trouver les conditions optimales au sein du parcours migratoire afin de faciliter le passage au travers des obstacles tout en minimisant les dépenses énergétiques. La présence de barrages de castor affecte ses deux éléments par son impact sur les conditions hydrauliques et hydrologiques. Les zones de refoulements agissent à la fois de refuges hydrologiques, thermiques pendant que le barrage a un effet barrière à la migration. Toutefois, leur impact sur le passage du saumon ne peut être systématiquement assumé en raison des caractéristiques et de leurs impacts sur la dynamique fluviale qui diffèrent d'un barrage à l'autre.

Au niveau de l'estuaire, le passage du saumon est reconnu pour être naturellement plus complexe en raison des changements physiologiques et environnementaux que les individus expérimentent ainsi que par les changements de température et la chimie de l'eau causés par l'interaction entre les débits d'eau douce et le cycle des marées (Milner *et al.*, 2012). Ces interactions influencent le

signal de montaison du saumon qui est majoritairement apporté par les températures fraîches de l'eau des rivières. Une fois dans le système fluvial, les salmonidés adultes ont plus de facilité à migrer vers l'intérieur du chenal principal localisé dans la portion estuarienne en raison des chenaux plus profonds, stables et possédant des vitesses d'écoulement moindres dépendamment des marées. Ces conditions minimisent la dépense énergétique et encouragent le lien hydrologique entre les habitats vers l'amont lorsque le chenal est dépourvu d'entraves importantes à la migration.

Dans sa portion aval, les liens hydrologiques entre les habitats de la rivière Ouelle sont sensibles aux fluctuations des débits en raison de la faible profondeur d'écoulement dans le segment de la transition fluviale (segment B), la présence de sédiments très grossiers, ainsi qu'au niveau de la cascade de la Cavée dans le segment sinueux semi-alluvial (segment C). Le passage survient uniquement lorsque les niveaux d'eau augmentent et que la pente hydraulique diminue au niveau de la cascade. Les débits requis afin d'assurer la continuité entre les habitats de ces deux segments sont toutefois méconnus.

Par conséquent, les tendances et la trajectoire hydrologique sont directement liées au succès migratoire de l'espèce tout au long de la rivière Ouelle jusqu'au secteur amont de La Grande Rivière. Les analyses des conditions hydrométéorologiques historiques montrent une réduction des débits d'étiage depuis 1987. D'ailleurs, les projections des débits moyens estivaux/automnaux (Figure 28a) et des étiages estivaux (Figure 28b) pour l'horizon 2050 modélisés par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) vont dans le même sens que cette tendance en prédisant, respectivement, la diminution probable et très probable de ces variables. Cette diminution des débits et la probable augmentation de la sévérité des étiages s'avèrent problématiques pour la montaison du saumon, car celle-ci survient généralement pendant l'été et l'automne, soit lors de la période où l'occurrence d'étiage important est la plus élevée.

Enfin, cette tendance et ces prédictions mettent en lumière l'importance des crues estivales et automnales pour la migration anadrome de cette espèce et pour sa survie. Les prédictions hydrologiques pour l'horizon 2050 illustrent toutefois une augmentation probable des crues estivales et automnales (Figure 28c). L'analyse des données de crues automnales (septembre, octobre et novembre) historiques montre qu'il y a eu 46,6% des automnes entre 1921 à 1966 avec minimum un événement de crue supérieur à 50 m³/s et 60,9% d'automne avec des débits

supérieurs à 40 m³/s. Pour la période 1983-2020, le nombre d'années où il y a eu un évènement de 50,0 m³/s et plus à l'automne est de 55,0 % et 71,0 % des années avec des débits supérieurs à 40,0 m³/s. La tendance historique montre que les crues automnales semblent plus fréquentes dans la période récente (1983-2020), ce qui concorde avec les prédictions du CEHQ (Figure 26). Par conséquent, cela pourra permettre d'avoir des conditions propices à la montaison du saumon vers les sites de fraies à l'automne plus fréquemment avec les changements environnementaux globaux.

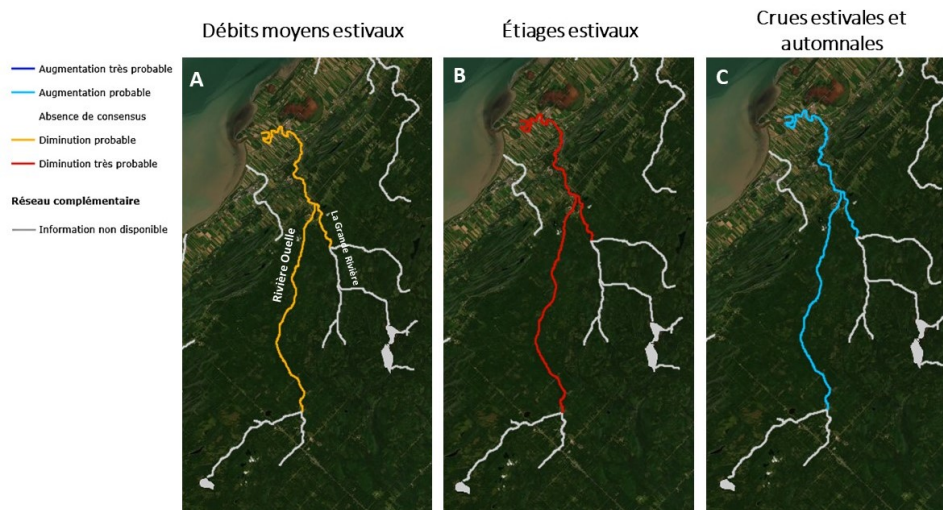


Figure 28. Modélisation des rivières Ouelle et La Grande (A) des débits moyens, (B) des étiages estivaux et (C) des crues estivales et automnales pour l'horizon 2050 par le CEHQ.

ii. *Influence des barrages de castor sur l'habitat et la migration du saumon*

La présence de castors dans La Grande Rivière est bien connue (Furois, 2016) et plusieurs formes au niveau de la plaine alluviale peuvent témoigner de son activité par le passé (Figure 22 à Figure 25). Par conséquent, la dynamique de barrage contribue grandement à la diversification des formes au niveau du lit mineur et sur la plaine alluviale en altérant les conditions hydrauliques et hydrologiques. La diversité d'habitats que cela apporte peut combler les besoins à la faune ichtyenne à différents stades de leur cycle de vie ou à différentes périodes cruciales de l'année (Schlosser, 1991). Les zones d'accalmie créées par le refoulement de l'eau jouent également un rôle écologique considérable permettant d'augmenter la qualité des écosystèmes lotiques en facilitant l'implantation et la croissance de macrophytes et d'algues ainsi que la colonisation par les macroinvertébrés, les organismes benthiques et les poissons (Boivin *et al.*, 2019). Les impacts se répercutent même au niveau des écosystèmes riverains en alimentant la plaine alluviale en

sédiments ainsi qu'en nutriments (Francis *et al.*, 2008), favorisant ainsi la croissance des végétaux sur les rives. La croissance de la ripisylve protège en retour le plan d'eau contre le rayonnement solaire et permet aux salmonidés de demeurer dans un milieu tempéré lors de la période estivale.

De plus, les zones de faible courant en amont des barrages sont des endroits fortement prisés par les salmonidés pouvant servir de refuges hydrologiques lors de crues ou d'étiage et de lieux d'hivernage. Les fosses créées servent également de refuges thermiques en raison de la hauteur de la colonne d'eau. Cependant, cela ne semble pas affecter les températures de surface telles qu'illustrées par l'imagerie thermique obtenue par les vols de drone (voir annexe 3). Ces environnements plus frais sont particulièrement cruciaux pour les organismes **poïkilothermes**, car la température de l'eau affecte la capacité à nager et la consommation d'oxygène des salmonidés (Brett, 1971 dans Milner *et al.*, 2012; Tetzlaff, 2008) et que l'oxygène dissout dans l'eau est directement lié à sa température. Ces zones d'accalmie peuvent jouer des rôles similaires lors de la migration anadrome du saumon et fournir des refuges temporaires lors de leur périple vers leurs zones de fraie.

Ensuite, les principaux impacts négatifs sur la migration du saumon sont associés à l'effet de barrière migratoire potentielle qui limite la distribution amont des salmonidés vers les zones de fraie (Mitchell et Cunjak, 2007 dans Kemp *et al.*, 2012) ainsi que le blocage complet de la migration lors des périodes d'étiage (Pollock *et al.*, 2017). Par conséquent, l'ampleur de ces impacts est davantage dépendante de la variation des conditions hydrologiques (p.ex. débits, vitesses d'écoulement, niveau d'eau) qu'à la présence et des caractéristiques des barrages.

La Figure 29 montre trois différents stades de conditions hydrologiques du barrage 3 sur La Grande Rivière observées à l'automne 2020. L'impact potentiel de ce barrage quant à la libre circulation du saumon s'avère le plus important en raison de son rapport hauteur de chute-largeur (0,22) le plus élevé et de sa hauteur de chute la plus imposante à l'étiage (101 cm). La réduction de la hauteur de chute diminue considérablement avec l'augmentation du débit (voir annexe 2, photos 8 à 11). La crue majeure du 18 octobre 2020 a causé l'ouverture du chenal sans obstruction au niveau de la berge gauche, réduisant ainsi le gradient hydraulique à une pente plutôt faible. La hauteur de chute a également réduit considérablement au niveau de la berge droite, passant de 101 cm à 39 cm (Figure 30). Cet exemple de l'effet d'une crue sur le barrage 3 montre que, malgré ses dimensions imposantes, les crues d'été et d'automne favorisent grandement la libre

circulation du saumon en présence du castor. La destruction partielle ou complète, la création d'échancrures, la réduction du gradient hydraulique amont-aval, la réduction de la hauteur de chute et l'augmentation de la profondeur aval dans ces photos montrent également qu'une crue de cette amplitude facilite le passage du saumon vers son site de fraie.

Malgré le peu de données dans le temps sur la dynamique des barrages de castor sur La Grande Rivière, les impacts modérés des barrages sur la libre circulation peuvent être assumés à moyen-long terme. En premier lieu, les conditions nécessaires à l'implantation de barrages (p.ex. faibles pentes, largeur, profondeur d'eau et large plaine alluviale) sont concentrées dans un secteur restreint en amont de La Grande Rivière. Cela signifie que la construction de barrages par les castors sera récurrente aux mêmes sites. En second lieu, les caractéristiques telles que la composition des barrages, les dimensions et la porosité demeureront similaires en raison de l'homogénéité des sites potentiels au niveau de la composition de la ripisylve, du substrat et des paramètres morphométriques du cours d'eau (p.ex. largeur du lit mineur, degré d'encaissement, profondeur). En dernier lieu, une fois le barrage construit, les dimensions des barrages évoluent en fonction de la disponibilité des matériaux (Stout *et al.*, 2016; Muller et Watling, 2016), de l'intensité des réajustements du cours d'eau et de la variation des conditions hydrologiques (Butler *et al.*, 2005).

Les multiples interactions entre les dynamiques des barrages et fluviales sont indéniables. Considérant les relations entre la puissance spécifique et de nombreux paramètres morphodynamiques, il est fort probable que cette variable, couplée à la disponibilité des matériaux, détermine les dimensions maximales d'un barrage dans un segment donné. Il serait ainsi intéressant de tester cette relation dans divers environnements fluviaux à des fins de validation.

Telles que présentées précédemment, les tendances dans les conditions hydrométéorologiques et les projections 2050 du CEHQ montrent que la récurrence de crues importantes est assez élevée (60,9%) et que son augmentation probable contribuera à faciliter la circulation du saumon dans son parcours migratoire dans La Grande Rivière. Cependant, les conditions hydrologiques nécessaires à la migration dans des tronçons problématiques tels qu'au niveau du village de Saint-Pacôme et de la cavée peuvent être supérieures à celles nécessaires dans le secteur colonisé par le castor.



Figure 29. Photographies présentant trois différents stades de conditions hydrologiques du barrage 3 observés à l'automne 2020 sur La Grande Rivière. Dans l'ordre : conditions hydrologiques à (A) niveau modéré (8,3 m³ / s), (B) à niveau élevé (11,2 m³ / s) ainsi qu'au lendemain (décru) d'une crue majeure (25,3 m³ / s).

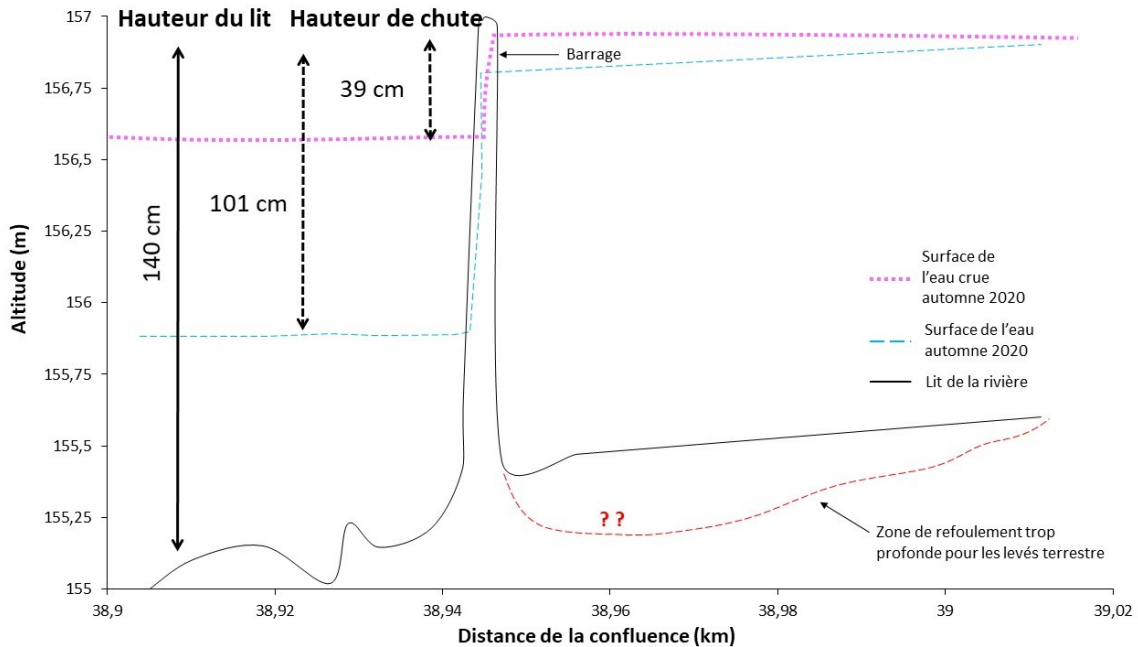


Figure 30. Profil en long du barrage 3 de La Grande Rivière présentant le lit du cours d'eau (trait noir), le niveau d'eau à débit modéré (trait pointillé bleu, $Q_{LG} = 8,3 \text{ m}^3 / \text{s}$) ainsi qu'au lendemain lors de la crue du 19-10-2020 ($Q_{LG} = 25,3 \text{ m}^3 / \text{s}$). Les valeurs de hauteur de chute ont été calculées par la différence entre les niveaux d'eau en amont et aval.

Enfin, l'association entre la présence de barrages de castor à la problématique de restriction du passage du poisson peut parfois être précipitée et spéculative (Kemp *et al.*, 2012). C'est pourquoi les processus derrière les services écosystémiques de l'activité du castor sont très peu valorisés et nécessitent plus de connaissances (Kemp *et al.*, 2012; Pollock *et al.*, 2019). Néanmoins, il est possible d'effectuer des suivis et des interventions mineures afin de répondre aux objectifs de gestion et de conservation de la ressource, ou pour des questions de sécurité civile.

c. Enjeux de gestion, interventions et recommandations proposées

La présence du castor en rivière apporte son lot d'inquiétudes par rapport à la gestion des risques naturels et à la gestion de la ressource ichtyenne, particulièrement au niveau de la disponibilité et la qualité de leurs habitats. Cependant, il est nécessaire d'approcher la problématique d'une manière holistique afin de proposer des actions et interventions en harmonie avec l'environnement fluvial afin que celles-ci perdurent dans le temps.

i. Gestion des barrages de castor et du régime hydrologique

À la lumière des impacts bénéfiques sur la morphodynamique des cours d'eau et les rôles écologiques qu'ils apportent, les castors sont des atouts dans les environnements fluviaux. Malgré la construction de barrages, ces aménagements ne sont généralement pas assez imposants pour être considérés comme des barrières infranchissables pour le saumon atlantique en raison des fluctuations du régime hydrologique à l'automne et parfois en été. Les effets négatifs de ces obstacles sur la migration peuvent être uniquement observés lors des périodes d'étiages sévères, où les saumons devront attendre la prochaine montée des eaux afin de les franchir. Cela pourrait devenir problématique en cas de période d'étiage prolongée. Toutefois, les résultats des différentes analyses couplés aux projections pour l'horizon 2050 par le CEHQ montrent une récurrence de crue élevée en été et à l'automne ainsi qu'une augmentation probable du phénomène. Cela permet d'assurer dans une moindre mesure la montaison vers l'amont dans les segments avec barrages.

En ce qui a trait à la problématique du régime hydrologique, une solution proposée repose sur la gestion du régime hydrologique à l'aide des réserves d'eau présentes au niveau des lacs endigués en amont des deux sous bassins versants. En effet, lors des périodes estivales dont l'étiage est sévère ou prolongé ou l'absence de crue à l'automne, ces lacs de tête permettraient de palier aux conditions hydrologiques défavorables pour l'espèce. Ces derniers représentent une importante réserve en eau endiguée, soit près de 11 millions de m³ d'eau (10 977 680 m³), et affectent environ 26,0% (291,8 km²) de la superficie du bassin versant de la rivière Ouelle. Ces barrages ont été construits afin d'améliorer la qualité de l'habitat de la faune aquatique, semi-aquatique, de la sauvagine (voir annexe 2, photo 12) ainsi qu'à des fins d'utilisation récréative. Par conséquent, les répercussions visées ont été considérées uniquement à l'échelle locale des lacs et le concept de gestion intégré des ressources en eau par bassin versant ne semble pas avoir été appliqué. Dans l'optique où certains de ses barrages peuvent avoir des effets négatifs sur les conditions hydrologiques à l'aval qui affectent le saumon atlantique, deux interventions touchant ces infrastructures pourraient être considérées :

- 1- **Le démantèlement des barrages sur certains des lacs.** Cela permettrait de restaurer certains processus de la dynamique fluviale plus en harmonie avec l'environnement fluvial ainsi qu'un régime hydrologique naturelle plus réactifs aux événements de pluies moindres dans la rivière Ouelle. Cela pourrait également retarder et réduire la durée des périodes d'étiages en

éliminant la notion des seuils de réponses hydrologiques (c.-à-d. remplissage jusqu'au niveau plein bord du déversoir) nécessaires aux lacs de tête avant de se déverser dans leurs exutoires;

- 2- **La modification des barrages à plus fortes dimensions déjà en place.** Les barrages ont été construits avec un déversoir dont le déversement est possible uniquement une fois que le réservoir se remplit. Cela affecte le seuil de réaction et la réponse hydrologique à l'aval. L'objectif des modifications serait, en premier lieu d'abaisser le niveau du déversoir de certains lacs visés afin d'augmenter la réactivité de ces tributaires et d'augmenter le débit moyen au cours de l'été. En second lieu, la mise en place et l'utilisation d'un système d'évacuation de certains lacs pourraient permettre de reproduire les effets d'une petite crue durant les années où les conditions hydrologiques ne sont pas favorables à la montaison du saumon. Cela s'avérerait primordial dans le cas qu'aucune crue ne survienne avant ou pendant la période de migration du saumon atlantique.

Considérant l'ampleur des répercussions sur les gestionnaires, utilisateurs, riverains et citoyens à l'aval, ces interventions proposées nécessiteraient toutefois davantage d'analyses ainsi qu'une modélisation des débits afin de s'assurer de son efficacité et éliminer les risques pour la sécurité civile.

Ensuite, le démantèlement des barrages de castor ou la création de brèches afin de créer un passage pour le saumon s'avèrent tous deux inefficaces et non recommandés pour deux raisons :

- 1- **Effet sur la qualité de l'eau** - Les complexes de barrages de castor peuvent stocker d'importante quantité d'eau et de sédiments au travers de leurs réservoirs et au niveau des milieux humides créés par le refoulement et l'inondation de la plaine alluviale. Ces réserves d'eau permettent de conserver un débit d'étiage plus élevé et d'exercer un effet tampon sur les crues en retardant l'évacuation de l'eau dans le système fluvial à la suite de précipitations. Cela peut être très bénéfique pour les saumons captifs à l'intérieur du parcours migratoire, en attente de la prochaine montée des eaux pour progresser davantage vers un site propice à la fraie. De plus, le démantèlement cause des impacts négatifs sur la qualité de l'eau et les habitats pendant l'intervention par le relâchement d'une grande quantité de sédiments, l'augmentation de la turbidité et la perturbation de l'écosystème;
- 2- **Synchronicité des interventions.** Ce genre d'intervention peut exacerber davantage les conditions favorables à la montaison du saumon en réduisant les débits moyens à l'automne

lorsque mal synchronisé avec la montaison du saumon dans la rivière ou lorsque réalisées en prévision d'une crue. D'une part, le manque de synchronisme avec la période de montaison va provoquer le drainage des réserves d'eau à l'amont sans nécessairement fournir le débit requis pour avoir les conditions favorables au passage du saumon dans les zones de contraintes migratoire à l'aval (c.-à-d. secteurs du village de Saint-Pacôme et de la cavée). De plus, lorsqu'il y a trop de temps qui sépare les interventions de la montaison, cela laisse le temps au castor de venir entretenir les barrages tels que survenus en 2016 (Furois, 2016). D'autre part, la création de brèches en prévision d'une crue permettant la libre circulation du saumon pourrait affecter la structure et l'intégrité du complexe de barrages dans le secteur amont. Cela pourrait générer la destruction en série des barrages vers l'aval et mener à une problématique de sécurité civile et par la perte de géodiversité et biodiversité dans l'environnement fluvial.

Enfin, dans l'optique où les périodes d'étiage peuvent devenir problématiques pour la libre circulation, il est possible d'aménager des passes migratoires temporaires favorisant la montaison et dévalaison des salmonidés (Figure 31 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), tout en conservant les avantages écosystémiques des barrages de castors.

ii. Suivi et acquisition de données sur les barrages de castor et le comportement du saumon

À la lumière des résultats face à la problématique de migration du saumon atlantique sur la rivière Ouelle, plusieurs questions demeurent en suspens face aux interactions entre les dynamiques fluviales, des barrages humains et des castors et le comportement du saumon. Par conséquent, les efforts déployés devraient être dirigés vers un suivi des barrages de castor, de la population et du comportement du saumon de la rivière Ouelle pendant la période de montaison. Ce type de suivi pourrait contribuer à l'apport de connaissance sur les différentes interactions entre ces éléments présents dans plusieurs des rivières à saumon du Québec.

Dans le cadre d'un futur suivi, il serait nécessaire de caractériser et localiser les barrages de castor sur plusieurs années, d'acquérir de l'information sur l'interaction entre la dynamique des barrages en lien avec le régime hydrologique et le comportement du saumon. À court terme, cela permettrait d'établir des seuils de références d'étiage problématiques (s'il y a lieu) et des seuils de débits favorables pour la libre circulation du saumon pour les différents types et configurations de barrages. Les résultats de ses analyses permettraient également de déterminer quels barrages

peuvent être problématiques durant les étiages pour ainsi identifier les barrages nécessitant l'installation de passes migratoires par exemple. L'installation d'un réseau de caméras photo et vidéo à déclenchement automatique au niveau des barrages permettrait de mieux comprendre les interactions entre la dynamique de barrage, le comportement migratoire du saumon et les fluctuations du régime hydrologique.



**Figure 31. Exemple de passe migratoire au niveau d'un barrage de castor (Beaver Institute-
<https://www.beaverinstitute.org/>)**

À moyen-long terme, un suivi interannuel du décompte du saumon réalisé en apnée (ou autres méthodes) serait pertinent durant les périodes de montaison afin d'obtenir une série de données dans le temps. Il serait aussi possible d'analyser le comportement migratoire du saumon à partir de transpondeur (*pit tag*) afin de caractériser quantitativement ces déplacements dans un contexte de rivière avec barrages de castor. Cela permettrait d'analyser l'effet de la dynamique de barrage sur le comportement migratoire (p.ex. synchronisme, date de montaison, temps de résidence, blocage partiel ou complet) selon le régime hydrologique.

Résumé de la discussion :

Interactions entre la dynamique fluviale, du bois en rivière et la trajectoire géomorphologique

A - Trajectoire hydrogéomorphologique et hydrologique et interaction avec la dynamique de barrage

- L'analyse de la trajectoire HGM entre 1963 et 2019 n'a pas montré de changements majeurs dans la portion du corridor fluvial de La Grande Rivière entre les PK24 et 38, à l'exception des changements au niveau de la plaine causés par l'activité du castor;
- L'absence de réajustement ou les changements mineurs s'expliquent par la résilience de l'environnement fluvial face aux perturbations dans le corridor fluvial à l'étude et par des puissances spécifiques relativement faibles dans ce segment ;
- La présence de barrages de type déversoir à forte contenance dans le sous bassin versant de La Grande Rivière peut avoir influencé les débits minimaux et maximaux en raison de l'effet de ces barrages sur les crues (écrêtement des pics de crue) et sur les étiages (réduction des débits minimaux);
- La présence de barrages de castor dans les tronçons de La Grande Rivière a pour effet d'emmagasinier un certain volume d'eau et de favoriser les échanges avec la nappe phréatique, permettant de conserver un niveau d'eau plus élevé durant les périodes d'étiage ;
- Il s'avère difficile de dissocier les effets du castor et ceux des barrages en tête de bassins versants sur la trajectoire hydrologique à long terme ;
- La période d'anomalie négative observée dans les débits minimaux après 1986 peut s'expliquer en partie par la construction du barrage de l'Étang de la Décharge en 1980 et celui du lac Chaudière en 2015 couplée aux précipitations annuelles totales plus faibles de cette période;
- La tendance positive des débits spécifiques maximaux standardisés malgré l'anomalie négative des précipitations totales peut s'expliquer par l'occurrence d'évènements de pluie plus intense, mais dont la récurrence est plus faible;
- La comparaison des débits maximaux et minimaux de la rivière Ouelle avec deux autres bassins versants proximaux (Trois-Pistoles et Rimouski) et ayant des données disponibles depuis les années 1920 permet de voir qu'il semble y avoir une variabilité naturelle plus importante sur la Trois pistoles et la Rimouski.
- Les débits d'étiage suivent la même tendance régionale avec des valeurs plus faibles à la moyenne pour la période récente, c'est-à-dire des périodes d'étiage plus sévères. Cette tendance est confirmée par les analyses de projection du CEHQ;
- L'analyse à l'échelle d'évènements de crues récents (2020) montre que La Grande Rivière a une réponse hydrologique plus rapide et dont le seuil de réponse nécessite la plus faible quantité de précipitations afin de réagir ;
- Les conditions hydrologiques et morphodynamiques sur La Grande Rivière favorisent la présence du castor et l'état d'équilibre de la Grande est étroitement associé à la dynamique des barrages de castors;

B - Trajectoire hydrologique, dynamique des barrages et effets sur la libre circulation du saumon atlantique

i. Connectivité hydrologique

- Malgré leurs impacts sur la morphologie et la dynamique des cours d'eau ainsi que sur la gestion des risques, les barrages de castor contribuent à modeler un cadre physique et des conditions environnementales pour les organismes vivants côtoyant les écosystèmes lotiques et riverains;
- Une majorité d'études mentionnent l'amélioration de la qualité des habitats et soulignent la réponse positive des salmonidés dans les cours d'eau ayant des castors et du bois en rivière, son influence sur la migration anadrome du saumon demeure toutefois nuancée;
- La variabilité des conditions hydrologiques affecte la migration en entraînant un coût énergétique supplémentaire lors des hauts débits (augmentation des vitesses d'écoulement), en interrompant le lien hydrologique entre les habitats lors de faibles débits (étiages), ainsi qu'en fournissant un signal à la montaison aux saumons en attente;
- Les zones de refoulements en amont des barrages agissent à la fois de refuges hydrologiques, thermiques, tandis que le barrage peut avoir un effet barrière à la migration;
- L'impact sur la libre circulation du saumon ne peut être systématiquement assumé en raison des caractéristiques et de leurs impacts sur la dynamique fluviale qui diffèrent d'un barrage à l'autre;
- Les liens hydrologiques entre les habitats de la rivière Ouelle sont sensibles aux fluctuations des débits en raison de la faible profondeur d'écoulement dans le segment de la transition fluviale (segment B) ainsi qu'au niveau de la cascade de la Cavée dans le segment sinués semi-alluvial (segment C).;
- La période de montaison optimale survient uniquement lorsque les niveaux d'eau augmentent et que la pente hydraulique diminue au niveau de la cascade. Les débits requis afin d'assurer la continuité entre les habitats de ces deux segments sont toutefois méconnus;
- Les analyses des conditions hydrométéorologiques historiques montrent des débits d'étiage plus sévère depuis 1987;
- Les projections pour l'horizon 2050 du CEHQ vont dans le même sens en prédisant une diminution probable des débits moyens estival-automne et très probable des débits d'étiage estivaux ;
- Cette diminution des débits et des étiages peut s'avérer problématique pour la montaison du saumon, car celle-ci survient généralement durant ces périodes;
- Ces projections montrent l'importance des crues estivales et automnales pour la migration anadrome de cette espèce et pour sa survie. Les prédictions hydrologiques pour l'horizon 2050 illustrent toutefois une augmentation probable des crues estivales et automnales;

- La tendance historique montre que les crues automnales semblent davantage fréquentes dans la période récente (1983-2020), ce qui concorde avec les projections du CEHQ ;
- L'augmentation des crues automnale pourra permettre d'avoir des conditions propices à la montaison du saumon vers les sites de fraies à l'automne plus fréquemment avec les changements environnementaux globaux ;

ii. Influence des barrages de castor sur l'habitat et la migration

- La présence de castors dans La Grande Rivière est bien connue et plusieurs formes au niveau de la plaine alluviale peuvent témoigner de son activité par le passé ;
- La dynamique des barrages de castor contribue à la diversification des formes au niveau du lit mineur et sur la plaine alluviale en diversifiant les conditions hydrauliques et hydrologiques;
- La diversité d'habitats que les barrages apportent peut combler les besoins à la faune ichtyenne à différents stades de leur cycle de vie ou à différentes périodes cruciales de l'année ;
- Les zones de faible courant en amont des barrages sont des endroits fortement prisés par les salmonidés pouvant servir de refuges hydrologiques lors de crues ou d'étiage et de lieux d'hivernage ;
- Les principaux impacts négatifs sur la migration du saumon sont associés à l'effet de barrière migratoire potentielle qui limite la distribution amont des salmonidés vers les zones de fraie ainsi que le blocage complet de la migration lors des périodes d'étiage ;
- L'ampleur des impacts sur la libre circulation est davantage dépendante de la variation des conditions hydrologiques (p.ex. débits, vitesses d'écoulement, niveau d'eau) qu'à la présence et des caractéristiques des barrages ;
- L'exemple de l'effet d'une crue sur le barrage 3 par exemple, montre que, malgré ses dimensions imposantes, les crues d'été et d'automne favorisent grandement la libre circulation du saumon en présence du castor;
- Les conditions nécessaires à l'implantation de barrages (p.ex. faibles pentes, largeur, profondeur d'eau et large plaine alluviale) sont concentrées dans un secteur restreint en amont de La Grande Rivière ;
- En se basant sur le suivi de 2016 et de 2020, la construction de barrages par les castors sera probablement récurrente aux mêmes sites sur La Grande ;
- Les caractéristiques telles que la composition des barrages, les dimensions et la porosité demeureront similaires en raison de l'homogénéité au niveau de la composition de la ripisylve, du substrat et des paramètres morphométriques du cours d'eau dans ce secteur ;
- Les tendances dans les conditions hydrométéorologiques et les projections 2050 du CEHQ montrent que la récurrence assez élevée des crues importantes (60,9%) et son augmentation probable contribueront à faciliter la libre circulation du saumon dans son parcours migratoire dans La Grande Rivière ;

- Les conditions hydrologiques défavorables à la migration dans des tronçons problématiques (secteurs du village de Saint-Pacôme et de la cavée) peuvent être supérieures à celles observées dans le secteur colonisé par le castor ;
- L'association entre la présence de barrages de castor et à la problématique de restriction du passage du poisson peut parfois être précipitée et spéculative. Cependant, il existe des méthodes plus douces (passes migratoires temporaires par exemple) afin d'atténuer les risques potentiels.

iii. - Enjeux de gestion, interventions et recommandations proposées

- Les barrages de castor ne sont généralement pas assez imposants pour être considérés comme des barrières infranchissables pour le saumon atlantique en raison des fluctuations du régime hydrologique à l'automne;
- Les effets négatifs de ces obstacles sur la migration peuvent être uniquement observés lors des périodes d'étiages sévères, où les saumons devront attendre la prochaine montée des eaux afin de les franchir;
- Au niveau hydrologique, une solution proposée repose sur la gestion du régime hydrologique à l'aide des réserves d'eau présentes au niveau des lacs endigués en amont des deux sous bassins versants;
- Importance de l'approche de gestion intégrée des ressources en eau par bassin versant dans la gestion des lacs endigués en amont;
- Deux interventions touchant les lacs endigués pourraient être considérées : 1) démantèlement des barrages sur certains des lacs et 2) La modification de barrages à plus fortes dimensions déjà en place (études supplémentaires nécessaires);
- Le démantèlement des barrages de castor ou la création de brèches afin de créer un passage pour le saumon s'avèrent inefficaces et non recommandés;
- Dans l'optique où les périodes d'étiage peuvent devenir problématiques pour la libre circulation, il est possible d'aménager des passes migratoires temporaires favorisant la montaison et dévalaison des salmonidés;
- Pour les prochaines étapes, les efforts déployés devraient être dirigés vers un suivi des barrages de castor, de la population et du comportement du saumon de la rivière Ouelle pendant la période de montaison.

VI CONCLUSION

En résumé, la problématique de la rivière Ouelle s'avère complexe et résulte d'une multitude d'interactions entre l'hydrogéomorphologie, le régime hydrologique et la présence du castor. Cette problématique a mené au questionnement quant aux possibilités d'actions ou d'interventions possibles concernant trois éléments touchant ces dynamiques : (1) est-ce que le phénomène d'aggradation du lit dans la portion aval qui mène au comblement de fosses ainsi qu'à la coupure de connectivité lors d'étiage sévère affecte la montaison?; (2) est-ce que les barrages au niveau des lacs de tête affectent le régime hydrologique jusqu'au point de causer une coupure de connectivité lors d'étiage?; et (3) est-ce que la présence de barrages de castor dans La Grande Rivière nuit à la montaison du saumon vers son site de reproduction. Les objectifs de cette étude ont consisté à analyser les trajectoires HGM et hydrologique de La Grande Rivière afin d'en évaluer les interactions avec la dynamique de barrage et l'impact de ses éléments sur la libre circulation du saumon atlantique.

La caractérisation et la segmentation fluviale a permis de comparer l'évolution de chacun des segments et d'analyser la trajectoire HGM sur l'ensemble du corridor à l'étude. Ce dernier a été divisé en quatre segments possédant des caractéristiques morphodynamiques similaires : Le segment à méandres au niveau de la plaine côtière du fleuve Saint-Laurent (A), segment de transition entre divagant et à méandre (B), segment sinueux semi-alluvial (C) et segment à méandres stables avec plaine alluviale modelée par la présence du castor (D). Les berges sont généralement meubles et stables dans l'ensemble des segments à l'exception du segment A dont certaines des berges concaves de méandres sont en état d'érosion. Par conséquent, la trajectoire HGM analysé illustre la stabilité du corridor fluvial dans la portion étudiée. Cela s'explique par la faible variation des variables de contrôles tels que le débit, l'utilisation du territoire (ou du sol) et par la résilience de la plaine alluviale modelée par l'activité du castor dans le secteur amont de La Grande Rivière.

L'analyse de la trajectoire hydrologique a montré que des cycles de 10 à 20 ans séparent les anomalies de précipitations annuelles totales, mais qu'aucun de ces cycles ne semble corrélérer directement avec les anomalies de débits minimaux (étiages) et maximaux (crues). Ce manque de corrélation pourrait être lié à la présence et la construction de barrages de rétention sur les lacs en tête des sous bassins versants des rivière Ouelle et La Grande. L'analyse des données de débits

des principaux tributaires de la rivière Ouelle (c.-à-d. rivières Chaude, Sainte-Anne et La Grande) couplées aux conditions météorologiques ainsi qu'au niveau d'eau de l'Étang de la Décharge a permis d'observer des variations dans la réponse hydrologique de chacune des entités. Malgré son aire de drainage inférieure, La Grande Rivière possède la réponse hydrologique plus prompte aux précipitations comparativement à la rivière Ouelle. Ces différences dans la vitesse de réaction et l'amplitude de la réponse hydrologique s'expliquent par la disposition et la taille de barrages de rétention présents sur les lacs en tête de bassin versant. Le délai de réponse, ou seuil de réaction, s'observe sur La Grande Rivière entre les différents cours d'eau. Cela s'explique par la différence de précipitations nécessaires pour occasionner le déversement du réservoir dans son exutoire dans les différents lacs endigués.

Un secteur de plaine ayant été modelée par l'activité passée et contemporaine du castor a été identifié dans la portion amont de La Grande Rivière. Toutefois, le secteur actuellement colonisé par le castor s'étend sur environ 5 km entre les PK37 et PK42. La localisation des barrages identifiés à l'automne 2016 et 2020 diffère légèrement à l'exception des barrages présents aux sites 2 et 4. Les différences majeures observées entre les barrages de 2020 s'observent au niveau de la disposition de certains barrages, soit une configuration double (chenal de gauche et droite par exemple) ou en succession (barrage 2 par exemple) ainsi qu'au niveau et des dimensions mesurées. La similarité dans le choix des sites colonisés et de la composition des barrages s'explique par les conditions favorables à l'implantation du castor préexistantes de ce secteur ainsi que par l'homogénéité des matériaux disponibles au niveau du substrat et des bandes riveraines dans ce secteur.

Les liens hydrologiques entre les habitats des rivières Ouelle et de La Grande Rivière sont sensibles aux fluctuations des débits dans le régime hydrologique. La faible profondeur d'écoulement observée dans les segments de la transition fluviale (segment B) et l'importante rupture de pente observée dans la cascade de la Cavée au niveau du segment sinueux semi-alluvial (segment C) s'avèrent d'importantes contraintes migratoires. Les barrages de castor dans le secteur amont de La Grande Rivière ont un impact sur la libre circulation du saumon lors des périodes d'étiages sévères ou prolongées. La période de montaison optimale survient généralement lorsque les niveaux d'eau augmentent et que la pente hydraulique diminue au niveau de la cascade. Les débits requis afin d'assurer la continuité entre les habitats de ces deux segments sont toutefois méconnus.

La présence de barrages de rétention dans les deux sous bassins versants et la présence de barrages de castor dans le secteur amont de La Grande Rivière a un impact sur la libre circulation du saumon en affectant le régime hydrologique. Les effets sur le régime consistent au stockage de réserves d'eau en amont des structures, à la réduction des débits minimaux ainsi qu'en tamponnant la réponse hydrologique. Malgré des impacts similaires sur le régime hydrologique, la présence d'ouvrages de rétentions sur les lacs réservoirs affecte davantage le régime hydrologique que les barrages de castor. Cependant, il s'avère difficile de dissocier les effets du castor et ceux des barrages en tête de bassins versants sur les fluctuations des débits et la trajectoire hydrologique à long terme. D'une part, l'analyse des conditions hydrométéorologiques historiques montrent une augmentation de la sévérité des débits d'étiage depuis 1987. Les projections pour l'horizon 2050 du CEHQ vont dans le même sens en prédisant une diminution probable des débits moyens estival-automne et très probable des débits d'étiage estivaux. D'autre part, les projections montrent une augmentation probable des crues d'été et d'automne. Cela permettra de fournir plus fréquemment les conditions propices à la montaison du saumon vers les sites de fraie à l'automne.

La trajectoire hydrologique montre l'importance de la réponse hydrologique et des crues dans le comportement migratoire du saumon atlantique. Par conséquent, les solutions proposées concernent la gestion des volumes d'eau stockés à l'aide des lac-réservoirs et la modification de leurs barrages. Lorsque les périodes d'étiage peuvent devenir problématiques pour la libre circulation, il est possible d'aménager des passes migratoires temporaires au niveau des barrages de castor qui favorisent la montaison et dévalaison des salmonidés.

Enfin, il existe des lacunes dans la littérature concernant les interactions du castor avec la dynamique fluviale et le comportement migratoire du saumon. L'information retrouvée est parfois spéculative, décrite dans un environnement très spécifique ou les questions hypothétiques soulevées ne sont pas répondues. Des efforts supplémentaires devraient ainsi être dirigés vers un suivi des barrages de castor, de la population et du comportement du saumon de la rivière Ouelle pendant la période de montaison. Cela permettrait d'acquérir l'information nécessaire afin de mieux comprendre la dynamique de barrage et son influence sur le comportement migratoire du saumon.

VII Bibliographie

Abbe, T.B. et Montgomery, D.R. 1996. Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers, *Regulated Rivers: Research and Management*, vol. 12, p.201-221

Abbe, T.B. et Montgomery, D.R. 2003. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington, *Geomorphology*, vol. 51, p. 81-107.

Baker, B.W., Hill, E.P. 2003. Beaver (*Castor canadensis*) dans *Wild mammals of North America: Biology, management and conservation*. The John Hopkins University Press, Baltimore (MD), p.288-310.

Barnes DM, Mallik A.U. 1997. Habitat factors influencing beaver dam establishment in a Northern Ontario watershed. *Journal of Wildlife Management*, vol. 61, p.1371-1377.

Beier P, Barrett RH. 1987. Beaver habitat use and impact in Truckee River Basin, California. *J Wildl Manage*. 51:794–799.

Bernot, V., Calland, V., Bravard, J.P. et Foussadier, R. 1996. La sectorisation longitudinale du Vidourle (Gard-Herault) : une méthode appliquée à la gestion environnementale de l'espace fluvial méditerranéen, *Revue de Géographie de Lyon*, vol. 4, p. 323-339

Biron, P.M. 2017. La restauration de l'habitat du poisson en rivière: une recension des écrits. Rapport scientifique présenté à la Fondation de la Faune du Québec.

Boivin M., Maltais M., et Buffin-Bélanger, T. 2019. Guide d'analyse de la dynamique du bois en rivière. Guide scientifique présenté au *Conseil de l'eau du Nord de la Gaspésie et à la Fondation de la Faune du Québec*. 97 p. + annexes.

Bracken, L.J. et Wainwright J. 2006. Geomorphology and equilibrium: myth and metaphor? *Transactions of the Institute of British Geographers*, vol. 31, p. 167–178.

Brett J.R. 1971. Energetic responses of salmon to temperature. *American Zoologist*. Vol. 11, p.99– 113.

Brierley, G.J. et Fryirs, K.A. 2005. *Geomorphology and River Management: Application of the River Styles Framework*, Oxford, *Wiley-Blackwell*, 416 p.

Brierley, GJ, Fryirs, KA, Boulton, A, Cullum, C. 2008. Working with change: the importance of evolutionary perspectives in framing the trajectory of river adjustment. In *River futures. An integrative scientific approach to river repair*, Brierley GJ, Fryirs KA (eds). Island Press: Washington; 65–84.

Bryant, M.D. 1983. The role of beaver dams as coho salmo habitat in southeast Alaska streams. Dans *Proceedings of the Olympic Wild Fish Conference*, Olympic Wild Fish Conference, *Portn*

Burchsted, D., Daniels, M., Thorson, R., Vokoun, J. 2010. The river discontinuum: applying beaver modifications to baseline conditions for restoration of forested headwaters. *Bioscience*, vol. 60. P.908–922.

Butler, D.R. et Malanson, P. M. 2005. The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams. *Geomorphology*, Vol. 71, p. 48-60.

Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ). 2021. Données historiques des débits de la rivière Ouelle, stations no. 022701, 022702, 022703 et 022704 (http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/sommaire.asp?cle=7056120&date_selection=2019-06-04) Page consultée le 02-02-2021.

Chesney, W. R., Adams, C. C., Crombie, W. B., Langendorf, H. D., Stenhouse, S. A. et Kirkby, K. M. 2010. Shasta River juvenile coho habitat and migration study. *California Department of Fish and Game*, Sacramento, California, 141 p.

Church M. 1992. Channel morphology and typology. In *The Rivers Handbook*, ed. P Calow, GE Petts, 1:126–43. Oxford: Blackwell Sci. 526 pp.

Church, M. 2006. Bed material Transport and the Morphology of Alluvial River Channels, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 34, p. 325-354.

Cotton F. E. 1990. Potential beaver colony density in parts of Quebec Mémoire de maîtrise. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg (Virginia).

Cramer, M.L. 2012. Stream Habitat Restoration Guidelines, Co-publié avec Washington Departments of Fish and Wildlife, Natural Resources, Transportation and Ecology, Washington State Recreation and Conservation Office, Pudget Sound Partnership, and the U.S. *Fish and Wildlife Service*, Olympia, Washington, 844 p.

Cunningham, J.M., Calhoun A.J.K., Glanz W.E. 2006. Patterns of beaver colonization and wetland change in Acadia National Park. *Northwest Sci.*, vol. 13, p. 583–596.

Demers, S. et Buffin-Bélanger, T. 2011. Une méthode illustrée pour la sectorisation morphodynamique de la rivière Neigette (Québec). *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, vol. 55, no 3, p. 318-333.

Demers S., Olsen T. et Buffin-Bélanger T. 2014. Développement d'une méthode hydrogéomorphologique pour mieux considérer les dynamiques hydrosédimentaires aux droits des traverses de cours d'eau du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie dans le contexte de changements climatiques et environnementaux. Laboratoire de Géomorphologie et de Dynamique Fluviale, Université du Québec à Rimouski (UQAR). Remis au ministère des Transports du Québec (MTQ), décembre 2014, 202 p.

Dieter C.D., McCabe T.R. 1989. Factors influencing beaver lodge-site selection on a prairie river. *Am Midl Nat.* 122:408–411.

Dodd, J.A., Newton, M. et Adam, E.C. 2016. The effect of natural flood management in-stream wood placements on fish movement in Scotland. *Scottish Centre for Ecology and the Natural Environment (SCENE)*, University of Glasgow, 38 p.

Dufour, S. and Piégay, H. 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, 568-581

Environnement Canada. 2021. Données climatiques historiques de la station de La Pocatière, stations no. 7054094 et 7054095

(http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/sommaire.asp?cle=7056120&date_selection=2019-06-04) Page consultée le 02-02-2021.

Francis, R.A., Tibaldeschi, P. et McDougall, L. 2008. Fluvially-deposited large wood and riparian plant diversity, *Wetland Ecology and Management*. Vol. 16, no 5, p. 371-382.

Furois, V., 2016. Plan stratégique de développement durable de la pêche au saumon atlantique de la rivière Ouelle, Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-de-Loup (OBAKIR). Produit pour la Société de gestion de la rivière Ouelle (SGRO) : 89 p.

Furois, V. 2018. Suivi biologique des refuges thermiques du bassin versant de la rivière Ouelle. *Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR)*, 47 p.

Gurnell, A.M., and Sweet, R. 1998. The distribution of large woody debris accumulations and pools in relation to woodland stream management in a small, low-gradient stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 2: 1101-1121.

Hafen, K., Macfarlane, W.W. 2016. Can beaver dams mitigate water scarcity caused by climate change and population growth? *The Technical Newsletter of the National Stream and Aquatic Ecology Center*, Fort Collins (Colorado), p. 1-5.

Harig, A. L., and Fausch, K. D. (2002). Minimum habitat requirements for establishing translocated trout populations. *Ecol. Appl.* 12, 535–551. doi: 10.1890/1051-0761(2002)012%5B0535:mhrfet%5D2.0.co;2

Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, K. Jr. et Cummins, K.W. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems, *Advances in Ecological Research*, vol. 15, p. 133-302.

Hodgson, Earl W. 1927. *Salmon Fishing*. London: Black, 314pp.

Howard R.J., Larson J.S. 1985. A stream habitat classification system for beaver. *Journal of Wildlife Management*, vol. 49, p. 19–25.

Jakes A.F., Snodgrass J.W., Burger J. 2007. *Castor canadensis* (Beaver) impoundment associated with geomorphology of southeastern streams. *Southeast Nat*, vol. 6: p. 271–282.

Jung, T.S et Staniforth, J.A. 2010. Unusual beaver, *Castor canadensis*, dams in Central Yukon. *The Canadian Field-Naturalist*, vol. 124, no. 3: p.274-275

Kemp, P.S., Worthington, T.A., Langford, T.E.L., Tree, A.R.J., Gaywood, M.J. (2012). Qualitative and quantitative effects of reintroduced beavers on stream fish. *Fish and Fisheries*, vol. 13, no. 2, 158-181.

Lafond, R., Pilon, C. et Leblanc, Y. 2003. Bilan du plan d'inventaire aérien des colonies de castors au Québec (1989-1994). Société de la Faune et des Parcs du Québec, 89 p.

Larsen, A., Larsen, J., Lane, S.N., 2020. Dam Busy: Beavers and their Influence on the Structure and Function of River Corridor Hydrology, Geomorphology, Biogeochemistry and Ecosystems. *Earth Science Reviews*. <https://doi.org/10.31223/X5B59N>

Leeder, M.R. 1983. On the interaction between turbulent flow, sediment transport and bedform mechanics in channelized flows. Modern and ancient fluvial systems, *Special Publication of the International Association of Sedimentologists*. J. D. C. a. J. Lewin. Oxford: 5-18.

Leopold, L.B. et Maddock, T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *Geological Survey Professional*, paper 252, 64 p.

Levine, R. et Meyer, G.A. 2014. Beaver dams and channel sediment dynamics on Odell Creek, Centennial Valley, Montana, USA. *Geomorphology*, vol. 205, p. 51-64.

Lokteff, R. L., B. B. Roper, and J. M. Wheaton. 2013. Do beaver dams impede the movement of Trout? *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 142: p. 1114–1125.

Milner N.J., Solomon D.J. & Smith G.W. (2012b) The role of river flow in the migration of adult Atlantic salmon, *Salmo salar*, through estuaries and rivers. *Fisheries Management and Ecology* 19, 537–547.

Mitchell, S.C. and Cunjak, R.A. 2007. Stream flow, salmon and beaver dams: roles in the structuring of stream fish communities within an anadromous salmon dominated stream. *Journal of Animal Ecology*, vol. 76, p. 1062– 1074.

Moir, H.J., Gibbons, C.N., Soulsby, C., Webb, J. 2006. Discharge and hydraulic interactions in contrasting channel morphologies and their influence on site utilization by spawning Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 63, p. 2567–2585.

Muller, G. et Watling, J. 2016. The engineering in beaver dams. *River Flow 2016: Eighth International Conference on Fluvial Hydraulics*, United States. 12 - 15 Juillet 2016, 7 pp.

Nagayama, S., Nakamura, F., Kawaguchi, Y. et Nakano, D. 2012. Effects of configuration of instream wood on autumn and winter habitat use by fish in a large meandering reach, *Hydrobiologia*, vol. 680, p. 159-170.

Naiman R.J., Melillo J.M., Hobbie J.E. 1986. Ecosystem alteration of boreal forest streams by beaver (*Castor canadensis*), *Ecology*, vol. 67, p.1254–1269.

Nash, C. 2015. Impacts of artificial beaver dam (ABDs) on degraded wet meadow habitat, Silvies Basin, Oregon. Dans *145th Annual Meeting of the American Fisheries Society*, 20 août 2015.

Opperman, J., Merenlender, A., Lewis, D., 2006. Maintaining wood in streams: a vital action for fish conservation. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, Publication 8157OPSW (Oregon Plan for Salmon and Watersheds), 1999. *Oregon Aquatic Habitat: Restoration and Enhancement Guide*: 103 p.

Pollock, M.M., Beechie, T.J., Wheaton, J.M., Jordan, C.E., Bouwes, N., Weber, N., Volk, C. 2014. Using beaver dams to restore incised stream ecosystems. *Bioscience*, vol. 64, p. 279-290.

Pollock, .M., Heim, M.,et Werner, D. 2003. Hydrological and geomorphic effects of beaver dams and their influence on fishes. Dans *The Ecology and Management of Wood in World Rivers, American Fisheries Society Symposium*, p. 213-233.

Pollock, M., Wheaton, J., Bouwes, N., Vol, C., Weber, N. et Jordan, C. 2012. Working with beaver to restore salmon habitat in the Bridge Creek intensively monitored watershed. NOAA Technical Memorandum NMFS-NWFSC-120, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration. 547 p.

Pollock, M.M., G.M. Lewallen, K. Woodruff, C.E. Jordan and J.M. 2017. The Beaver Restoration Guidebook: Working with Beaver to Restore Streams, Wetlands, and Floodplains. Version 2.0. *United States Fish and Wildlife Service, Portland (Oregon)*, 219 pp.

Remar AC. 2013. Multivariate geospatial detection and quantification of ecological thresholds corresponding to dispersion of *Castor canadensis* Kuhl. (North American Beaver) in central Massachusetts [M.Sc. Thesis]. Newark (Delaware): University of Delaware.

Retzer J. L., H. Swope M., Remington J. D., and Rutherford W. H.: Suitability of physical factors for beaver management in the Rocky Mountains of Colorado. State of Colorado, Department of Game and Fish Technical Bulletin No. 2, Denver, 1956.

Roni P, Beechie T, Pess G, Hanson K. 2015. Wood placement in river restoration: fact, fiction, and future direction. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 72, p.466-478.

Rybczynski, N., 2007. Castorid phylogenetics : Implications for the evolution of swimming and tree-exploitation in beavers. *Journal of Mammalian Evolution*, vol. 14, no.1, p. 1-35

Schlosser I.J. 1995. Critical landscape attributes that influence fish population dynamics in headwater streams. Dans *The Importance of Aquatic-Terrestrial Ecotones for Freshwater Fish*, p. 77-81.

Schlosser I.J. 1991. Stream fish ecology: a landscape perspective. *BioScience*, vol. 41, p.704–712.

Schmitt, L., Maire, G. et Humbert, J. 2000. Typologie hydrogéomorphologique des cours d'eau : vers un modèle adapté à la gestion du milieu physique des rivières du versant sud-occidental du fossé Rhénan, *GéoCarrefour*, vol. 75, p. 347-363

Schumm, S. A. 1977. *The fluvial system*, New York, USA, Wiley.

Stout, T.L., Majerova, M. et Neilson, B.T. 2016. Impacts of beaver dams on channel hydraulics and substrate characteristics in a mountain stream. *Ecohydrology*, vol. 10, p.1-13 p.

Strahler A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos Trans Am Geophys Union*, vol. 38, p.913-920.

Suzuki N et McComb W.C. 1998. Habitat classification models for beaver (*Castor canadensis*) in the streams of the Central Oregon Coast Range. *Northwest Sci*, vol. 72, p. 102–110.

Tetzlaff, D., Gibbins, C., Bacon, P. J., Youngson, A. F. & Soulsby, C. 2008. Influence of hydrological regimes on the pre-spawning entry of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) into an upland river. *River Research and Applications* vol. 24, p. 528–542.

Thorstad, E.B., Økland, F., Aarestrup, K., Heggberget, T.G. 2008. Factors affecting the within-river spawning migration of Atlantic salmon, with emphasis on human impacts. , vol. 17, p. 345–371.

Tremblay G. 2010. Caractérisation des paramètres de l'habitat du castor qui favorisent l'utilisation des ponceaux comme site de construction du barrage. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (Québec).

Touihri, M., Labbé, J., Imbeau, L. et Darveau, M. 2018. North American beaver (*Castor canadensis* Kuhl) key habitat characteristics: review of the relative effects of geomorphology, food availability and anthropogenic infrastructure. *Ecoscience*, vol. 25, no. 1, p. 9-23

Westbrook C., Cooper D., Baker B. 2011. Beaver assisted river valley formation. *River Res Applic.*, vol. 27, p.247–256.

Wheaton J.M., Bennett S.N., Bouwes, N., Maestas J.D. and Shahverdian S.M. 2019. *Low-Tech Process-Based Restoration of Riverscapes, Design Manual, Version 1.0*. Utah State University Restoration Consortium. Logan, UT, 288 p.

ANNEXES

Annexe 1 : Glossaire géomorphologique (inspiré de Boivin et al., 2019)

Aggradation du lit :

Élévation graduelle ou progressive du lit d'un cours d'eau par accumulation de sédiments.

Amont :

Partie d'un cours d'eau comprise entre un lieu déterminé et sa source.

Aval :

Partie d'un cours d'eau comprise entre un lieu déterminé et son embouchure.

Bassin versant hydrographique

Le bassin versant est une unité géographique naturelle recueillant, à travers le réseau hydrographique, les eaux qui y ruissellent. Il correspond à la surface d'alimentation d'un cours d'eau. Le bassin versant est délimité par la ligne de partage des eaux, c'est-à-dire la ligne de crête de part et d'autre de laquelle l'eau de pluie ruisselle. Les eaux d'un même bassin versant alimentent un exutoire commun (cours d'eau, lac, mer, océan). Dans un bassin versant, il y a continuité : - longitudinale, de l'amont vers l'aval (ruisseaux, rivières, fleuves) ; - latérale, des crêtes vers le fond de la vallée ; - verticale, des eaux superficielles vers des eaux souterraines et vice versa. (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Cohésif

Propriété d'un sol pourvu de cohésion. Les argiles et les limons sont des sols cohésifs ; sables et les graviers propres (c'est-à-dire dépourvus de particules fines) sont non cohésifs (ou pulvérulents). (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Débit liquide

Le débit liquide correspond au volume d'eau qui traverse une section transversale d'un cours d'eau par unité de temps. Les débits des cours d'eau sont exprimés en m³/s avec trois chiffres significatifs (ex : 1,92 m³/s, 19,2 m³/s, 192 m³/s), ou pour les petits cours d'eau, en l/s. (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Débit morphogène :

Débit qui a la capacité de modifier les formes d'une rivière par l'érosion et le transport des sédiments. Au Québec, ces débits se produisent surtout durant la crue printanière (avec la fonte des neiges), mais aussi lors d'événements de précipitation intense.

Débit plein bord

Le débit plein bord correspond au volume d'eau pouvant s'écouler au sein du chenal, avant que des débordements se produisent. Le débit plein bord est associé à un niveau plein bord. Il est atteint lors de crues de récurrence 1,5 à 2 ans. Il correspond souvent à la limite de végétation sur les berges.

Débit solide

Le débit solide correspond à la masse des matières solides traversant une section donnée d'un cours d'eau par unité de temps. Il comprend les matières en solution, les matières en suspension et les matériaux de fond. Ces matériaux sont déplacés sur le lit du cours d'eau selon différentes lois de transport : charriage, suspension, saltation. (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Érosion des berges

L'érosion est un phénomène naturel. Généralement provoquée par l'écoulement, elle participe au transport de la charge solide et à la recharge sédimentaire du cours d'eau. L'érosion des berges est à l'origine de la migration des méandres. Elles garantissent le fonctionnement dynamique du cours d'eau. (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

États d'équilibre d'un cours d'eau

En géomorphologie fluviale, la notion d'équilibre est fondamentale. Les cours d'eau sont des objets dynamiques qui évoluent dans l'espace et dans le temps suivant des processus dominants (par exemple, la migration latérale, l'incision ou l'exhaussement du lit) dont les moteurs (débits liquides et solides, niveau de base) et les résistances (ripisylves, granulométrie) sont aussi variables dans le temps. Ainsi, les cours d'eau ne doivent pas être perçus comme des objets dans un état statique, mais plutôt comme des objets dont les caractéristiques fluctuent dans le temps. On peut ainsi distinguer l'équilibre stable pour des cours d'eau dont l'état oscille autour d'un état moyen et l'équilibre dynamique pour des cours d'eau dont l'état oscille autour d'un changement vers un autre état. Dans les deux cas, la notion d'équilibre est conditionnée par les apports liquides et les apports solides. (Adaptée de Boivin et al., 2019)

Géomorphologie

Discipline qui étudie les formes de relief et leur mobilité, leur dynamique. Dans le cadre des hydrosystèmes, l'analyse porte sur la géométrie du lit des cours d'eau et les causes de ses transformations spatiales (de l'amont vers l'aval) ou temporelles en relation avec la modification des flux liquides et solides, la dynamique de la végétation riveraine, les interventions humaines. Il s'agit donc d'une science d'interface et de synthèse qui fait appel à des données naturalistes et expérimentales (hydraulique et hydrologie notamment) et à des données issues des sciences humaines (histoire, économie, agricole...). (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Géomorphologie fluviale (hydrogéomorphologie)

Science qui cherche à comprendre et décrire la structure du cours d'eau. Elle étudie les formes des cours d'eau et les conditions de leur formation. (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Hyporhéique

Ensemble des [sédiments](#) saturés en eau, situés au-dessous et à [côté](#) d'un [cours d'eau](#), contenant une certaine quantité d'[eau de surface](#). Si le cours d'eau s'écoule sur un substratum imperméable, il ne développera pas de [zone hyporhéique](#). La zone hyporhéique peut être constituée exclusivement d'eau de surface (cas des rivières perchées au-dessus de la [nappe alluviale](#)) ou caractérisée par un [mélange d'eau](#) de surface et d'eau souterraines (lorsque les échanges avec la [nappe](#) existent). Ces différentes configurations se succèdent le long d'une même rivière. Généralement, les têtes de [bassin](#) présentent une zone hyporhéique réduite ou absente contrairement à la [plaine alluviale](#). (Office International de l'Eau (OiEau))

Lit mineur d'un cours d'eau

Partie du lit compris entre des berges franches ou bien marquées dans laquelle l'intégralité de l'écoulement s'effectue, la quasi-totalité du temps en dehors des périodes de très hautes eaux et de crues débordantes. Le lit mineur englobe le lit d'étiage. Sa limite est le lit de plein bord. (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Lit majeur d'un cours d'eau

Le lit majeur constitue l'espace riverain d'un cours d'eau dans lequel l'écoulement ne se fait que temporairement lors des débordements des eaux hors du lit mineur. Ses limites externes sont déterminées par la plus grande crue historique. Le lit majeur du cours d'eau permet le stockage des eaux de crues débordantes. (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Migration latérale :

La migration latérale est créée par le déplacement du tracé d'une rivière à l'intérieur de sa vallée. L'érosion des berges est le processus qui permet année après année le mouvement latéral d'un cours d'eau. Les taux de migration sont très variables d'une rivière à l'autre, d'une section à l'autre et annuellement selon les crues.

Puissance spécifique d'un cours d'eau

La puissance spécifique correspond sommairement au produit de la pente multipliée par le débit et divisé par la largeur du cours d'eau, qui caractérise les potentialités dynamiques du cours d'eau. Les capacités d'ajustement du cours d'eau sont en grande partie fonction de la puissance spécifique. (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Ripisylve ou riparienne

Le terme ripisylve vient du latin « Ripa » qui veut dire la rive et « Sylva » la forêt. La ripisylve est une formation végétale, naturelle et riveraine d'un milieu aquatique située dans la zone frontière entre l'eau et la terre (écotones). On distingue : - le boisement de berge (généralement géré dans le cadre des programmes d'entretien des rivières) situé à proximité immédiate du lit mineur. - la forêt alluviale qui s'étend plus largement dans le lit majeur. La nature de la ripisylve est étroitement liée aux écoulements superficiels et souterrains. Elle exerce une action sur la géométrie du lit, la stabilité des berges, la qualité de l'eau, la vie aquatique, la biodiversité animale et végétale (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Substrat

Matériaux formant le lit de la rivière (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Tête de bassin versant

Parties amont des bassins versants et par extension tronçon amont des rivières qui, en zone de relief notamment, sont le plus souvent moins exposées aux pressions anthropiques que les parties aval (mais restent très fragiles) et qui de ce point de vue constituent des secteurs de référence tout à fait importants et donc à préserver. (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 2010).

Trajectoire hydrogéomorphologique :

La trajectoire hydrogéomorphologique est un concept permettant de dégager objectivement des tendances ou des ruptures dans l'évolution d'un cours d'eau sur une période de temps donnée. Elle permet de comprendre la manière dont les cours d'eau évoluent dans le temps, de proposer un diagnostic hydrogéomorphologique lorsque des facteurs de contrôles y sont associés et d'exposer la sensibilité des cours d'eau à des perturbations. En conduisant une série de mesures géométriques sur des photographies aériennes datant de différentes époques, il est possible de déterminer quels ajustements morphologiques sont en cours et de projeter ces ajustements dans le futur (Boivin et al., 2019)

Trajectoire hydrologique

L'étude de la trajectoire hydrologique d'un cours d'eau comprend l'analyse des variations interannuelles et pluriannuelles des débits à partir d'une série chronologique. Les variations du régime hydrologique constituent un volet important pour la compréhension de la trajectoire morphologique puisqu'elles conditionnent la capacité et la compétence de l'écoulement à mobiliser des sédiments (adaptée de Bourdon, 2013).

Annexe 2 : Photos terrain



Photo 1. Mesure de la hauteur moyenne et hauteur de chute à l'aide d'une règle d'arpenteur au site du barrage 3. Vue vers l'amont.



Photo 2. Prise de mesure des vitesses d'écoulement à l'aval d'un barrage au site du barrage 3. Vue vers la berge gauche.



Photo 3. Barrage aval en construction au site du barrage 2. Vue vers la berge gauche.



Photo 4. Configuration en paliers amont-aval d'un complexe de deux barrages au site du barrage 2. Vue vers l'amont.



Photo 5. Configuration en paliers enchevêtrés d'un complexe de deux barrages au site du barrage 1. Vue vers l'aval.



Photo 6. Faible perméabilité du barrage du chenal nord au site du barrage 1. Vue vers l'amont. La composition en limon du barrage était élevée.



Photo 7. Forte perméabilité dans la portion supérieure du barrage nord illustrant une hauteur de chute élevée au niveau du site du barrage 1. Vue vers l'amont.



Photo 8. Barrage nord du site de barrage 1 le lendemain de la crue du 18 octobre 2020. Vue vers la berge gauche.



Photo 9. Barrage sud du site de barrage 1 le lendemain de la crue du 18 octobre 2020. Vue vers la berge droite.



Photo 10. Barrage nord du site de barrage 3 le lendemain de la crue du 18 octobre 2020. Vue vers la berge gauche.



Photo 11. Barrage nord du site de barrage 4 le lendemain de la crue du 18 octobre 2020. Vue vers la berge droite.

AMÉNAGEMENT FAUNIQUE LAC SAINTE-ANNE

Les milieux humides font partie des écosystèmes les plus productifs de la planète et leur valeur écologique est inestimable.

Au Québec, les milieux humides assurent nourriture, habitat et abri à 600 espèces animales, dont les oiseaux, les poissons, les mammifères, les amphibiens et les reptiles. On y observe une flore unique et spectaculaire.

Essentiels à notre santé et à celle de notre environnement, les milieux humides tels que les marais, les prairies humides, les marécages et les tourbières :

- jouent un rôle de filtre naturel important pour la qualité de l'eau;
- diminuent les effets des inondations, des sécheresses et de l'érosion;
- fournissent un habitat essentiel à la sauvagine et à la faune, notamment aux espèces en péril;
- offrent un lieu privilégié pour la pratique de nombreuses activités de plein air et d'apprentissage.

LE SAVIEZ-VOUS ?
Au Québec, près de 90% des milieux humides en zone urbaine sont dégradés et qui régénérés entraînent des conséquences importantes et un coût pour la société.

Aménagement faunique Lac Sainte-Anne

L'aménagement faunique du Lac Sainte-Anne a été réalisé en 1984 par Canards Illimités (CI), afin de préserver les nombreux marais riverains menacés par la détérioration avancée du barrage de drave construit au début du 20e siècle à l'exutoire du lac. Considéré comme le plus important lac de pêche de la ZEC Chopais, le barrage du Petit-Lac-Sainte-Anne permet de maintenir un niveau d'eau stable et optimal pour le développement d'un habitat de qualité pour la sauvagine et essentiel pour la conservation de l'habitat faunique du rat musqué et de son vaste complexe de milieux humides et hydriques. La préservation de leur intégrité est nécessaire afin de maintenir les aires d'alimentation et l'habitat préférentiel de l'omble de fontaine ainsi que les conditions propices à une multitude d'espèces fauniques. En 2019, Canards Illimités (CI), en collaboration avec le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) de la région du Bas-Saint-Laurent, a procédé à la mise à niveau des ouvrages afin d'assurer, à long terme, la pérennité de cet aménagement faunique.

L'aménagement des marais vise à :

- Maintenir un niveau d'eau afin de créer des conditions optimales favorisant la diversité et la densité de la faune et de la flore associées aux milieux humides;
- Offrir des conditions idéales pour l'alimentation et la reproduction de l'omble de fontaine;
- Offrir un habitat de qualité à la sauvagine et aux autres oiseaux aquatiques lors des migrations, de la nidification et de l'élevage des couvées.

LA MISSION DE CANARDS ILLIMITÉS
est de conserver les milieux humides et les habitats qui s'y rattachent au bénéfice de la sauvagine nord-américaine et de promouvoir un environnement sain pour la faune et les humains.

www.canards.ca | SUIVEZ-NOUS SUR  

 Québec   



Photo 12. Panneau d'interprétation décrivant l'objectif faunique du plus imposant barrage du Lac Sainte-Anne.

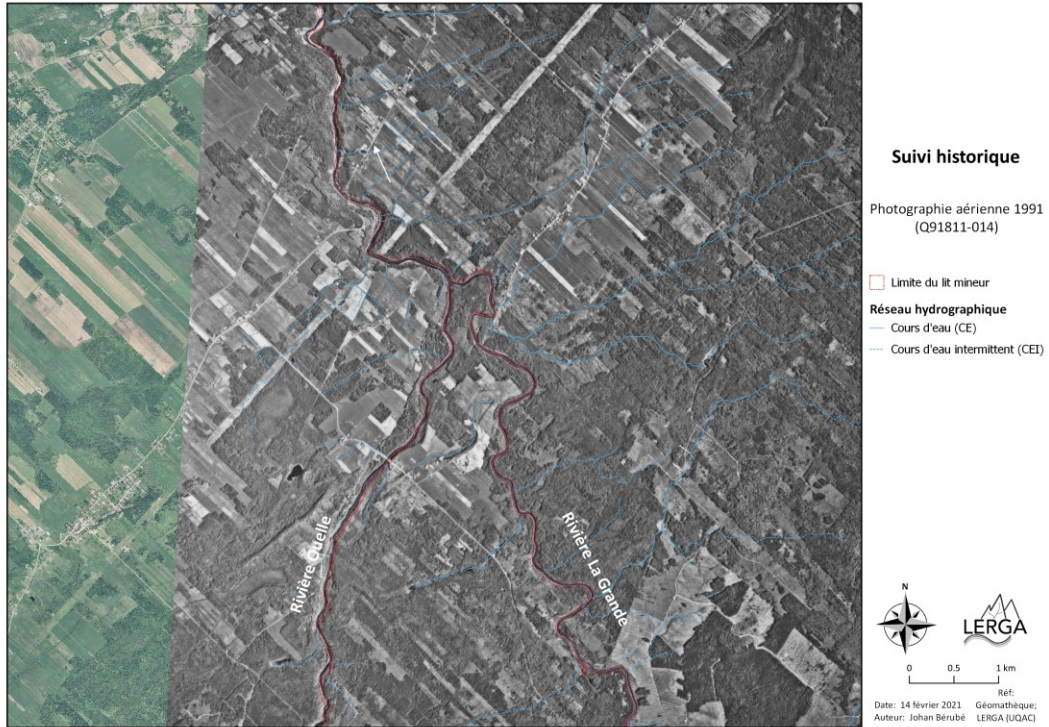
Annexe 3 : Photographies aériennes et figures complémentaires



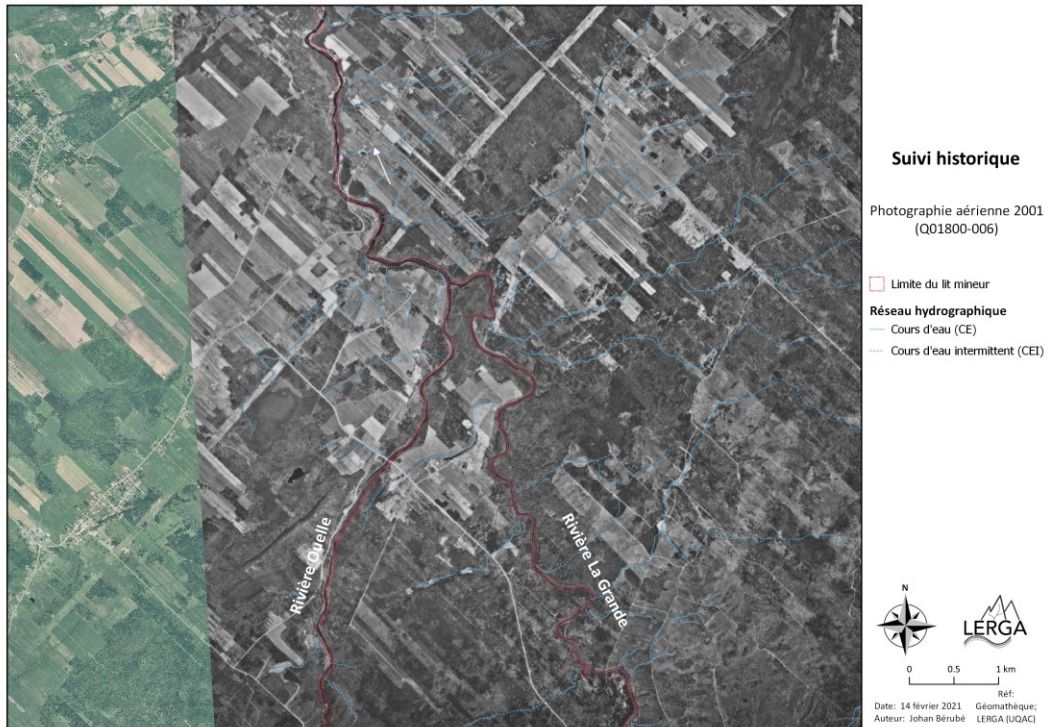
Photographie aérienne de 1963 le long du corridor fluvial à l'étude.



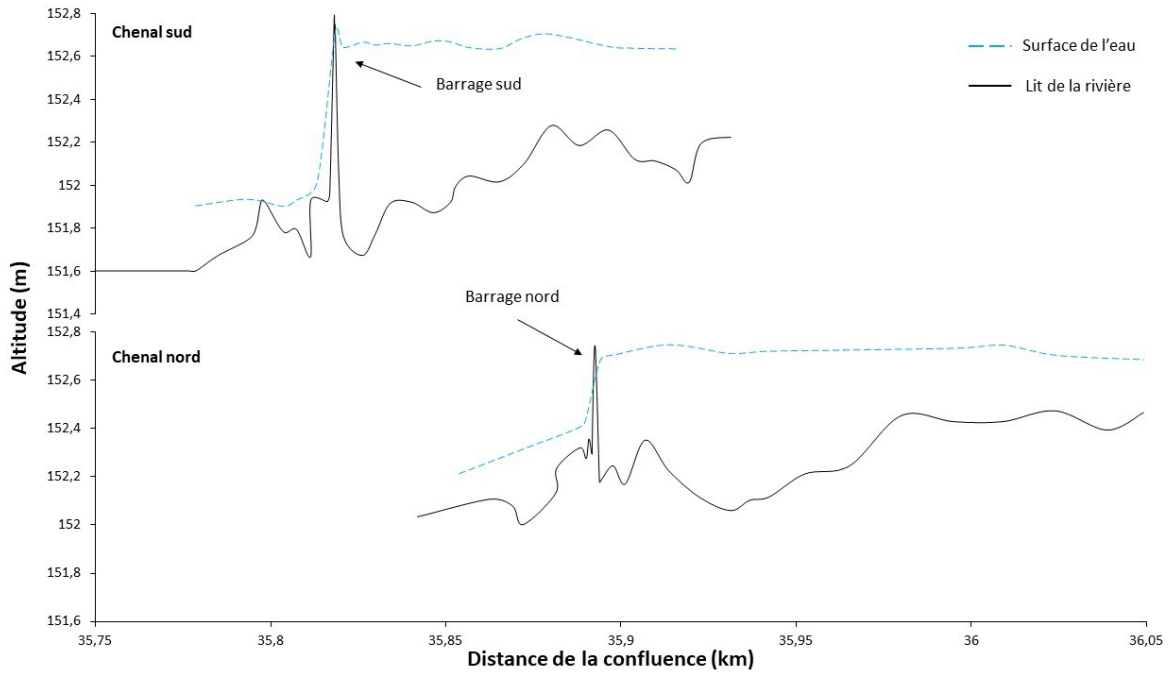
Photographie aérienne de 1978 le long du corridor fluvial à l'étude.



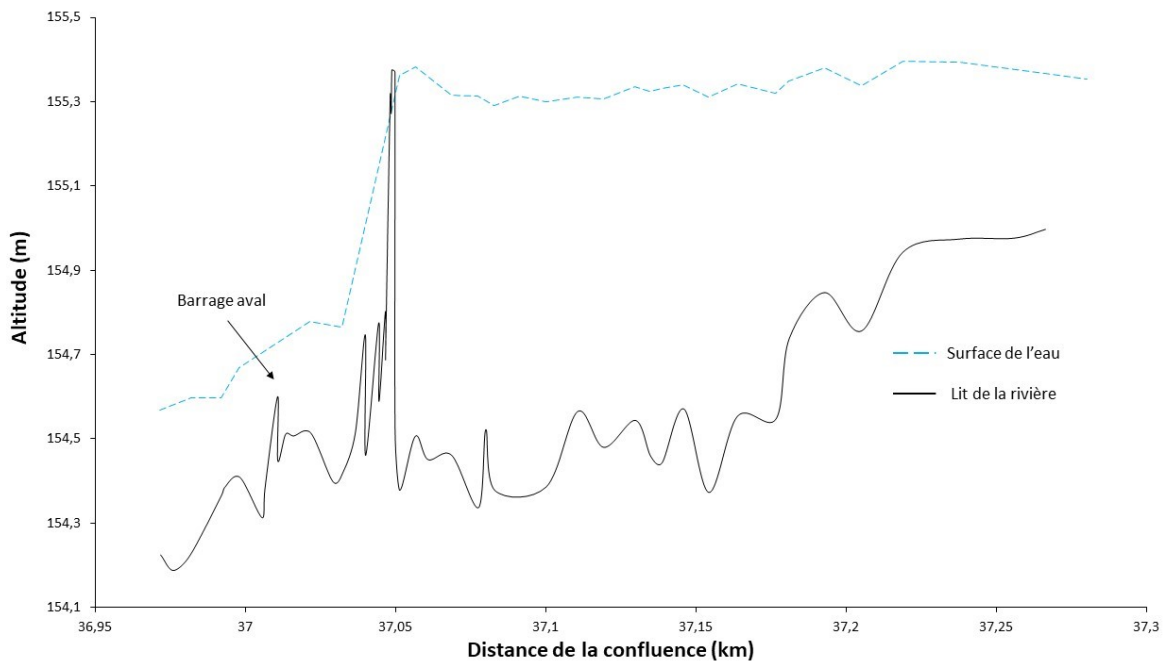
Photographie aérienne de 1991 le long du corridor fluvial à l'étude.



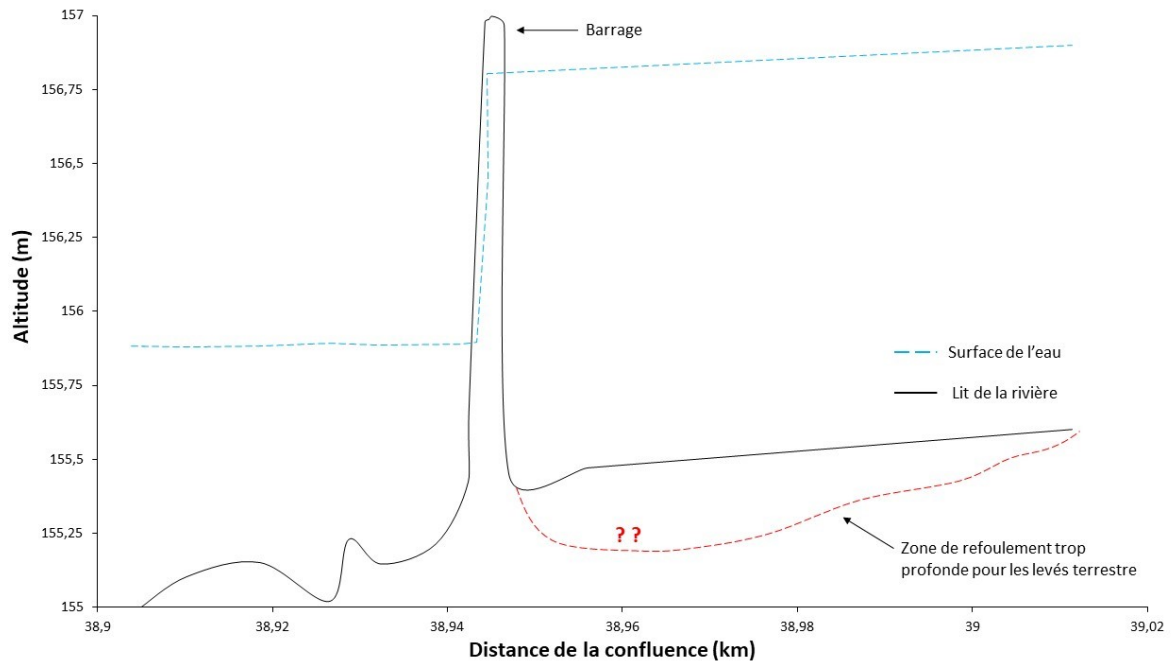
Photographie aérienne de 2001 le long du corridor fluvial à l'étude.



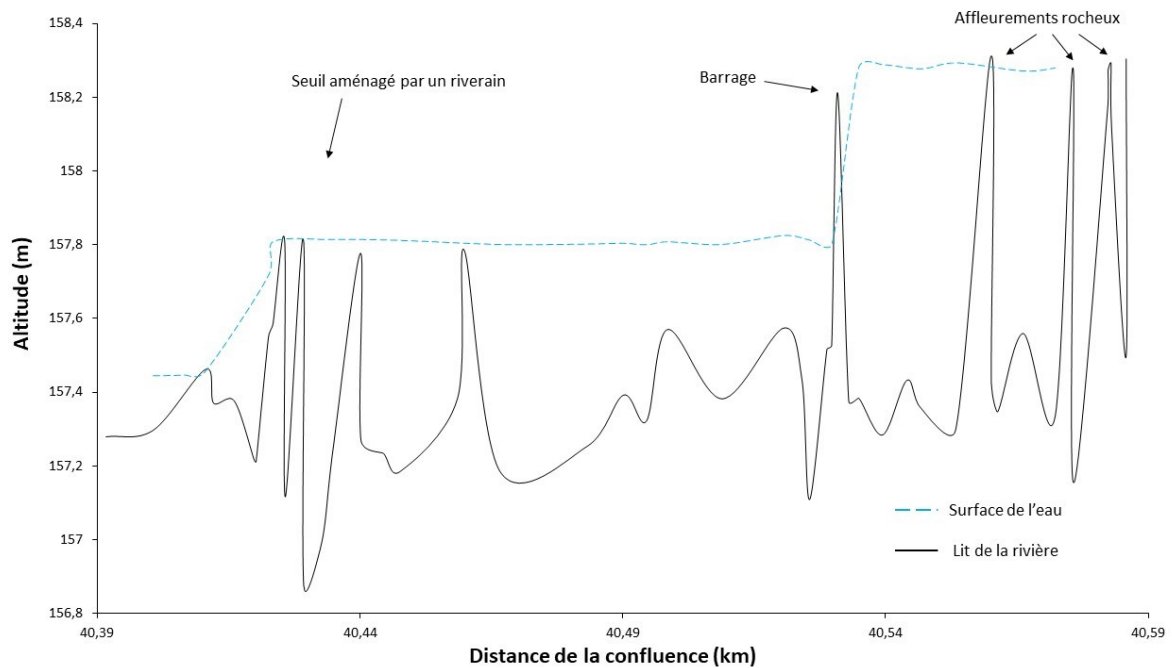
Profils longitudinaux des deux barrages du chenal nord (en haut) et sud (en bas) au niveau du site de barrage 1.



Profil longitudinal des deux barrages en paliers au niveau du site de barrage 2.

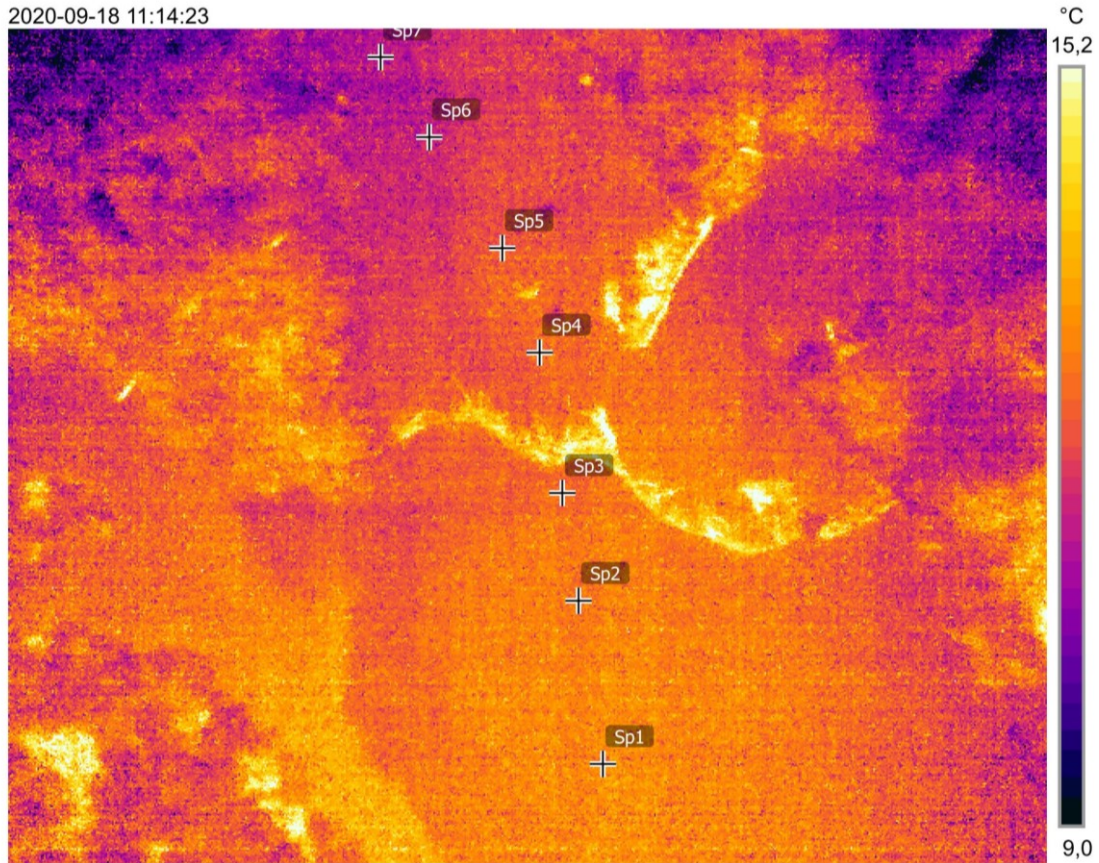


Profil longitudinal du barrage au niveau du site de barrage 3.



Profil longitudinal du barrage au niveau du site de barrage 4.

2020-09-18 11:14:23



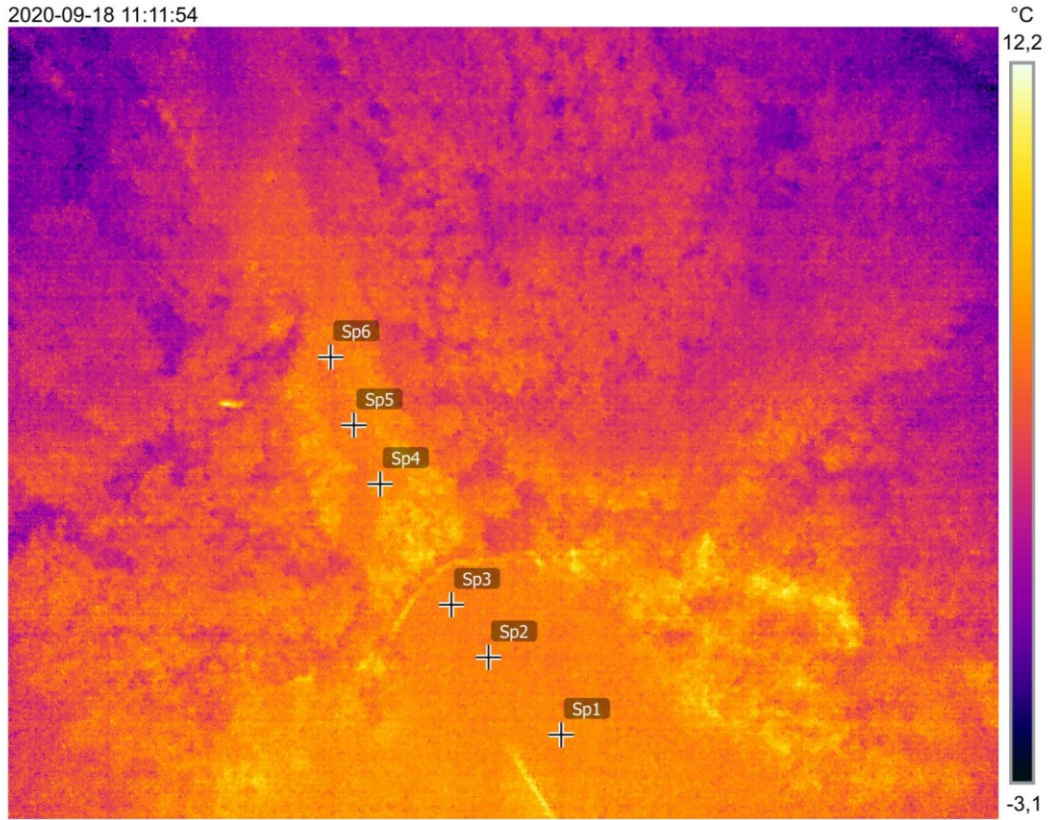
DJI_0086.jpg

Mesures

Sp1	12,9 °C
Sp2	12,5 °C
Sp3	12,5 °C
Sp4	12,4 °C
Sp5	12,9 °C
Sp6	11,4 °C
Sp7	11,1 °C

Imagerie thermique acquise par drone au niveau du chenal sud du site du barrage 1. L'image montre une faible variation longitudinale des températures de surface.

2020-09-18 11:11:54



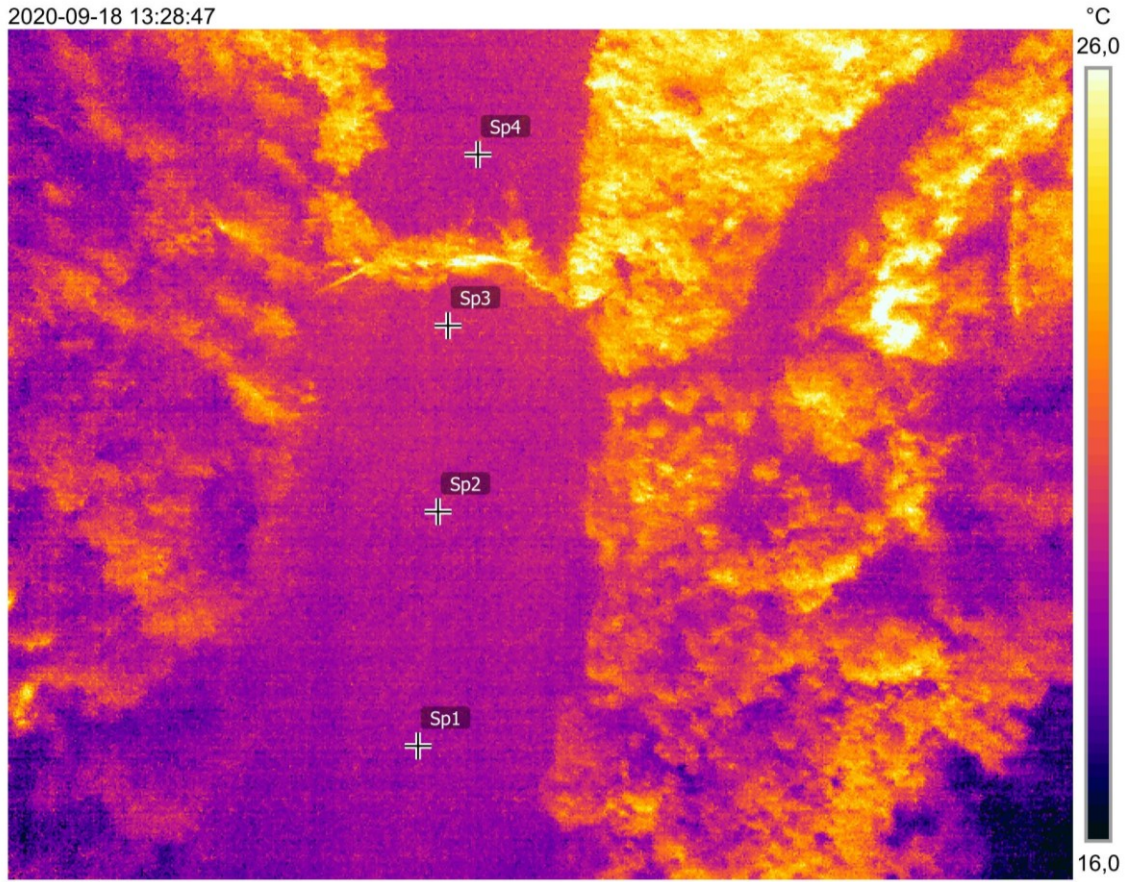
DJI_0057.jpg

Mesures

Sp1	6,3 °C
Sp2	6,3 °C
Sp3	6,1 °C
Sp4	7,1 °C
Sp5	5,7 °C
Sp6	6,1 °C

Imagerie thermique acquise par drone au niveau du chenal nord du site du barrage 1. L'image montre une faible variation longitudinale des températures de surface.

2020-09-18 13:28:47



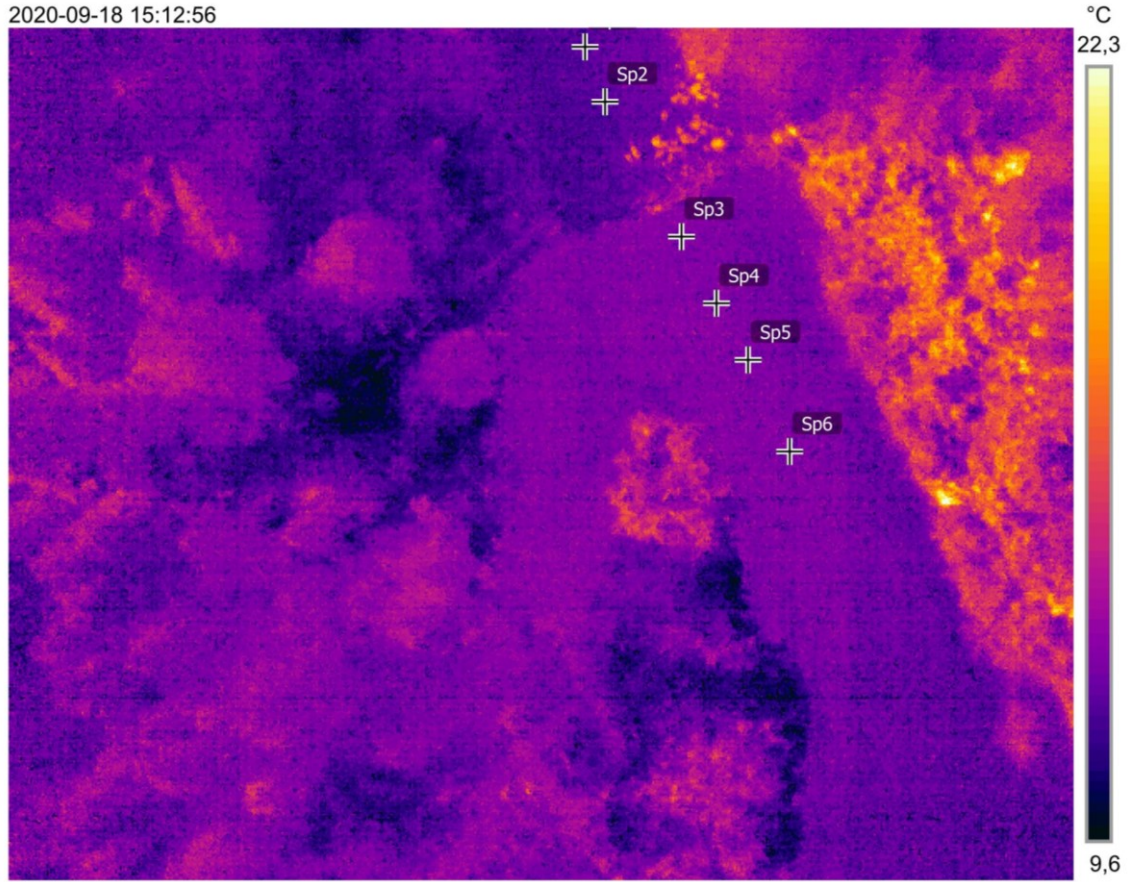
DJI_0060.jpg

Mesures

Sp1	19,2 °C
Sp2	19,1 °C
Sp3	19,9 °C
Sp4	19,1 °C

Imagerie thermique acquise par drone au niveau du barrage amont du site du barrage 2.
L'image montre une faible variation longitudinale des températures de surface.

2020-09-18 15:12:56



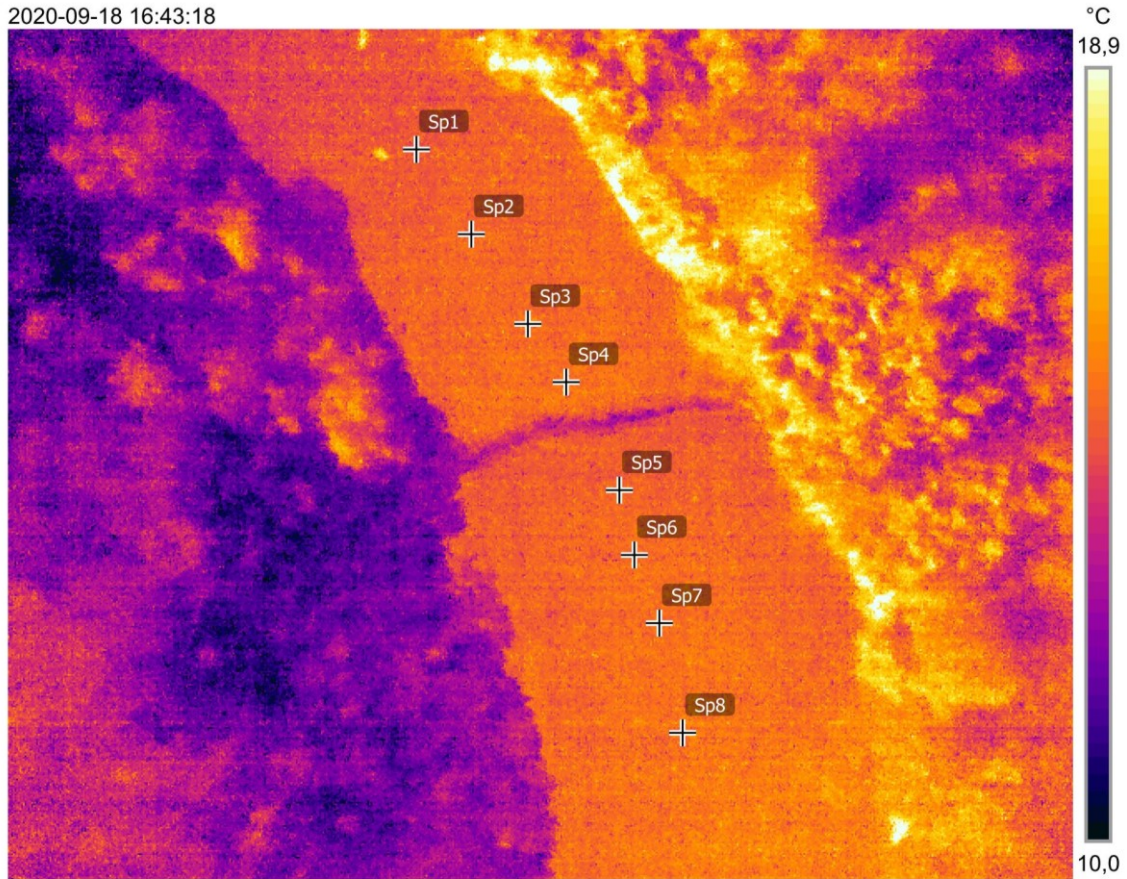
DJI_0070.jpg

Mesures

Sp1	11,6 °C
Sp2	10,9 °C
Sp3	12,4 °C
Sp4	12,9 °C
Sp5	12,7 °C
Sp6	12,9 °C

Imagerie thermique acquise par drone au niveau du site du barrage 3. L'image montre une faible variation longitudinale des températures de surface.

2020-09-18 16:43:18



DJI_0059.jpg

Mesures

Sp1	14,7 °C
Sp2	14,9 °C
Sp3	15,2 °C
Sp4	15,1 °C
Sp5	14,9 °C
Sp6	15,4 °C
Sp7	15,4 °C
Sp8	15,4 °C

Imagerie thermique acquise par drone au niveau du site du barrage 4. L'image montre une faible variation longitudinale des températures de surface.