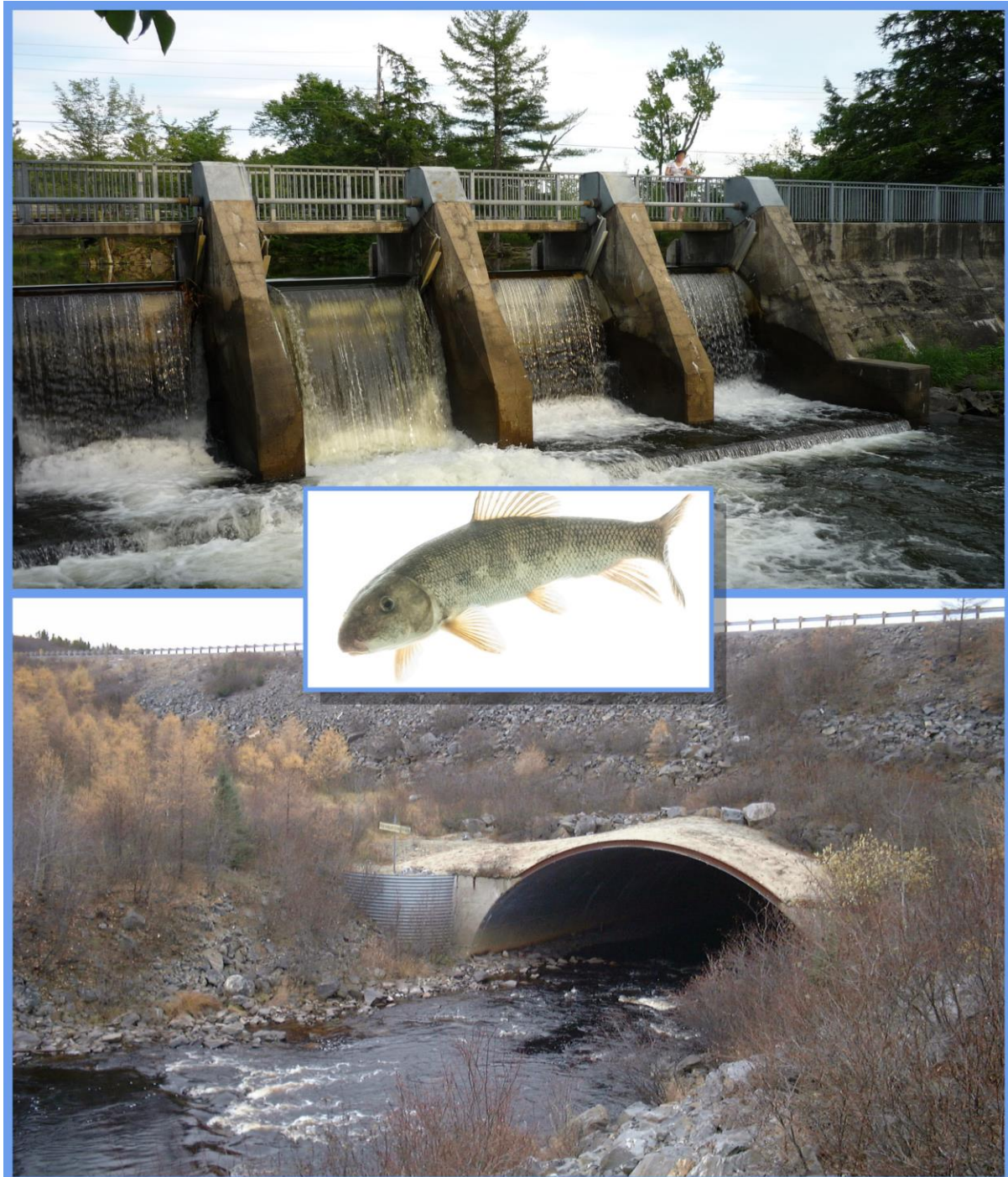


Connectivité aquatique du bassin versant de la rivière Yamaska : étude de cas du meunier noir (*C. comersonii*)

Rapport final



Connectivité aquatique du bassin versant de la rivière Yamaska : étude de cas du meunier noir (*C. comersonii*)

Date de dépôt : décembre 2020

Auteurs : Alex Arkilanian¹, Andrew Gonzalez¹

¹ Département de biologie, Université McGill

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés avec le soutien financier du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques dans le cadre de la mise en œuvre de la Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques ainsi que la contribution du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs et du ministère des Transports du Québec. Andrew Gonzalez tient à souligner l'aide de la chaire Liber Ero en biologie de la conservation.

Crédits – Photos de couverture

Meunier noir : USFWS Mountain-Prairie

Barrage : UncivilFire

Ponceau : Peter Van den Bossche

Résumé

La biodiversité des poissons est menacée par des rythmes de disparition beaucoup plus rapides que ceux d'autres groupes ou organismes, et ce, à l'échelle mondiale. L'une des causes est l'impact de l'activité humaine sur la qualité et la connectivité des habitats dans les cours d'eau. La connectivité des cours d'eau est désormais considérée comme essentielle à la santé des populations de poissons. Or, partout dans le monde, les principaux cours d'eau sont fragmentés à des degrés divers par toutes sortes d'obstacles, dont des barrages.

Ce rapport décrit la démarche que nous avons élaborée pour évaluer la connectivité structurelle et fonctionnelle des cours d'eau au regard des besoins d'une espèce cible de poisson. Nous avons appliqué cette démarche à la population de meuniers noirs qui vit dans le bassin versant de la rivière Yamaska pour mesurer la connectivité structurelle, à l'aide de l'indice de connectivité dendritique (ICD), ainsi que la connectivité fonctionnelle. Pour les meuniers noirs adultes et en frai, nous avons employé un ICD modifié, appelé indice de connectivité dendritique des habitats (ICDH), qui tient compte à la fois de la quantité et de la qualité des habitats.

Les résultats montrent que la connectivité de l'ensemble du bassin versant ne change pas selon le type de connectivité évaluée. La fragmentation du bassin par des barrages et des ponceaux réduit la connectivité d'un pourcentage pouvant atteindre 90 % par comparaison avec la fragmentation naturelle. À plus petite échelle, toutefois, il y a d'importantes différences entre la connectivité structurelle et la connectivité fonctionnelle pour des poissons adultes. Ces différences semblent entraîner la nécessité de certains compromis sur le plan de la conservation; en effet, l'élimination de certains obstacles dans le but d'améliorer la connectivité structurelle d'un segment ne modifie pas forcément la connectivité fonctionnelle pour les poissons adultes. Par ailleurs, les résultats montrent des différences à l'intérieur d'un segment entre la connectivité fonctionnelle pour les poissons adultes et pour le frai. Ces différences ne sont pas à négliger; elles signifient en effet qu'on ne saurait améliorer la situation du meunier noir dans l'ensemble du bassin si l'on concentre les mesures de conservation sur les segments d'importance pour les adultes sans accorder une égale attention aux juvéniles.

Le rapport souligne l'importance de tenir compte de l'évolution des besoins des espèces en matière d'habitat pendant tout le cycle de vie. Par ailleurs, l'étude des multiples formes de connectivité dans la rivière Yamaska permet d'y recenser plus exactement les populations de meuniers noirs. La démarche peut être étendue à l'analyse de l'impact des obstacles sur de multiples espèces de poissons dans de nombreux bassins versants des basses terres du Saint-Laurent. Plus elle intégrera de données sur la présence des poissons et sur les obstacles caractéristiques, mieux nous arriverons à évaluer la connectivité dans toutes les basses terres du Saint-Laurent et à comprendre les compromis à faire pour la conservation des diverses espèces de poissons de l'écorégion.

Table des matières

1. Introduction	5
1.1. Préserver la connectivité	5
2. Méthodes	10
2.1. Survol	10
2.2. Sources des données	10
2.3. Modélisation de la présence du meunier noir adulte	11
2.4. Modélisation de la présence du meunier noir en frai	14
2.5. Analyses de connectivité	15
3. Résultats : connectivité structurelle	16
3.1. Connectivité structurelle à l'échelle régionale	16
3.2. Connectivité structurelle à l'échelle locale	16
4. Résultats : connectivité fonctionnelle pour les adultes	18
4.1. Connectivité fonctionnelle pour les adultes à l'échelle régionale	18
4.2. Connectivité fonctionnelle pour les adultes à l'échelle locale	18
4.3. Points chauds de la connectivité fonctionnelle pour les adultes	21
5. Résultats : connectivité fonctionnelle des frayères	22
5.1. Connectivité fonctionnelle des habitats de frai à l'échelle régionale	22
5.2. Connectivité fonctionnelle des habitats de frai à l'échelle locale	22
5.3. Connectivité fonctionnelle pour les poissons adultes : points chauds	25
6. Discussion	26
6.1. Forte fragmentation d'habitats importants en amont	26
6.2. Différences entre la connectivité structurelle et la connectivité fonctionnelle	26
6.3. Choix des mesures de conservation pour un ensemble d'espèces et de cycles de vie	27
7. Recherches futures	28
7.1. Données manquantes	28
7.2. Granularité des données	29
7.3. Connectivité pour multiples espèces	30

1. Introduction

1.1. Préserver la connectivité

La biodiversité en eau douce, et en particulier dans les eaux courantes, est plus menacée que la biodiversité terrestre, et ce, à l'échelle mondiale (Collen et coll., 2014). On estime que le rythme de disparition d'espèces de poissons est de deux à trois fois plus grand que le taux moyen naturel (Ricciardi et Rasmussen, 1999; Burkhead, 2012). En outre, depuis 1989, le nombre d'espèces de poissons d'eau douce menacées de disparition en Amérique du Nord a augmenté de 92 %, ce qui représente au total 700 taxons (Jelks et coll., 2008). La fragmentation de l'écoulement des eaux est l'une des grandes menaces qui pèsent sur la biodiversité en eau douce à l'échelle planétaire (Dudgeon et coll., 2006). Il reste désormais très peu de cours d'eau considérés comme s'écoulant librement (Grill et coll., 2019). Cette fragmentation nuit à l'accessibilité des habitats importants pour le déroulement complet du cycle de vie des organismes d'eau douce, dont les frayères (Gosset et coll., 2006). De plus, l'altération de l'écoulement causée par ces modifications a d'importants effets sur le poisson, notamment lors de la période des migrations (Poff et coll., 1997; Lytle et Poff, 2004). Des chercheurs ont étudié récemment douze réseaux hydrographiques du Midwest des États-Unis et y ont observé une richesse spécifique moindre et une dissemblance plus grande dans les segments isolés que dans les segments très connectés (Perkin et Gido, 2012).

À mesure que croît la population humaine partout sur la planète, les infrastructures énergétiques et de transports nuisent sans cesse davantage à l'écoulement d'un grand nombre de réseaux hydrographiques. En 2005, presque tous les grands réseaux étaient plus ou moins fragmentés (Nilsson et coll., 2005), et la fragmentation avait encore progressé une décennie plus tard (Zarfl et coll., 2015). Partout dans le monde, l'urbanisation entraîne l'expansion des réseaux routiers, qui comptent pour beaucoup dans la fragmentation des cours d'eau (Forman et Alexander, 1998; Alexandre et Almeida, 2010; O'Hanley et coll., 2013). Des études récentes montrent que l'infrastructure bâtie provoque aussi la fragmentation des cours d'eau à l'échelle planétaire (Grill et coll., 2019). Ces tendances sont à prévoir également au Québec, où l'hydroélectricité, source d'énergie importante, est en croissance (Hydro-Québec, 2020). De plus, l'expansion urbaine s'étend rapidement dans plusieurs régions du sud de la province, ce qui risque d'entraîner la construction de nouvelles routes et l'installation de nouveaux ponceaux qui accentueront la fragmentation.

La préservation de la connectivité est importante pour la pérennité des populations animales et pour leur capacité de migrer, de s'adapter aux changements climatiques et de trouver un habitat approprié. Concrètement, la gestion de parcelles soigneusement choisies permet de maintenir la biodiversité en préservant le mouvement des organismes (Crooks et Sanjayan, 2006). La préservation de la qualité et de l'accessibilité des habitats par la préservation de la connectivité est également considérée comme essentielle à la préservation des eaux douces (Eros et coll., 2018). À ce jour, la restauration des réseaux hydrographiques consiste essentiellement à améliorer la qualité des habitats et à restaurer les chenaux principaux, sans prêter beaucoup d'attention aux petits affluents à l'échelle locale (Pracheil et coll., 2013).

La restauration des conditions environnementales d'un site peut aider les populations de poissons qui y vivent (Palmer et coll., 2010), mais elle ne doit pas se faire au détriment de l'ensemble des populations de poissons (métapopulations) présentes dans un réseau hydrographique. De fait, la recherche montre que la structure d'un réseau hydrographique influe à elle seule sur la dynamique des populations et des communautés (Tonkin et coll., 2018). Des chercheurs ont constaté, par exemple, que l'isolement de populations de poissons favorise leur disparition du fait d'une immigration moindre depuis les sites voisins (Letcher et coll., 2007). Par conséquent, pour comprendre comment les obstacles anthropiques à l'écoulement des cours d'eau affectent la biodiversité, il faut analyser la connectivité des populations de poissons et de leurs habitats.

Diverses méthodes d'analyse de la connectivité des réseaux hydrographiques ont été mises au point (Neville et coll., 2006; O'Hanley et coll., 2013; Eros et coll., 2018). L'indice de connectivité dendritique (ICD) est l'un des outils les plus utilisés pour quantifier la connectivité structurelle des divers tronçons d'un réseau hydrographique (Cote et coll., 2009) [Encadré 1]. La connectivité structurelle est une mesure de la configuration et des relations physiques au sein d'un réseau hydrographique, mais elle ne tient pas compte de la réponse comportementale des organismes aux éléments du paysage (Fagan et Calabrese, 2006). En revanche, elle tient explicitement compte de la perception qu'ont les espèces des habitats et de l'influence de la configuration du réseau sur les déplacements des poissons (Crooks et Sanjayan, 2006). Si l'ICD est sensible aux effets à l'échelle des communautés comme la diversité des espèces (Perkin et Gido, 2012), les mesures de préservation, fondées sur les besoins d'une espèce donnée, seraient sans doute plus efficaces si la connectivité fonctionnelle était mieux comprise.

Encadré 1. Indice de connectivité dendritique et indice de connectivité dendritique des habitats

L'indice de connectivité dendritique (ICD) sert à déterminer l'ampleur de la fragmentation d'un réseau hydrographique indépendamment de l'échelle (Cote et coll., 2009). Il se présente sous deux formes, liées à la stratégie migratoire des poissons diadromes et potamodromes. Pour le calcul de l'ICD des poissons potamodromes, le réseau hydrographique fragmenté est considéré comme un nombre n de fragments créés par les obstacles M dans le réseau entier. Il s'agit ensuite d'additionner la valeur de la connectivité entre toutes les paires de fragments. La connectivité entre les fragments i et j est le produit de leur longueur (l_i et l_j) divisé par la longueur du réseau entier (L) et pondéré par le produit de la probabilité de franchissement en amont (p_m^u) et en aval (p_m^d) de l'obstacle qui les sépare (c_{ij}). La probabilité de franchissement est la probabilité, exprimée par un nombre entre 0 et 1, que les poissons franchissent un obstacle donné. Par exemple, une probabilité de franchissement de 0,8 signifie que 80 % des poissons qui se trouvent devant un obstacle donné peuvent le franchir. Par conséquent, la connectivité entre deux fragments, quels qu'ils soient, est le produit de la probabilité de franchissement de tous les obstacles qui les séparent. De cette façon, ces événements de dispersion sont considérés comme indépendants les uns des autres.

$$ICD = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \frac{l_i}{L} \frac{l_j}{L} * 100$$

$$c_{ij} = \prod_{m=1}^M p_m^u p_m^d$$

En ajoutant à l'ICD la qualité des habitats, on obtient une nouvelle mesure : l'indice de connectivité dendritique des habitats (ICDH). Alors que l'ICD calcule la connectivité dans chaque segment en fonction de la longueur du cours d'eau, l'ICDH pondère la longueur de chaque cours d'eau par la qualité de l'habitat. L'ICDH mesure donc la connectivité entre les segments i et j en multipliant leur longueur par la qualité de l'habitat (h_i et h_j) et en divisant le produit par la longueur totale du cours d'eau, pondéré par la qualité de l'habitat (H). Ce procédé fait que les cours d'eau de meilleure qualité comptent davantage que ceux qui ne sont pas de bonne qualité dans la valeur finale de l'indice.

$$ICDH = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \frac{h_i}{H} \frac{h_j}{H} * 100$$

Nous décrivons dans ce rapport la méthode que nous avons employée pour mesurer la connectivité structurelle et fonctionnelle dans le bassin versant de la rivière Yamaska pour une espèce cible de poisson : le meunier noir (*Catostomus comersonii*) [Figures 1 et 2]. Le meunier noir est un poisson d'eau douce indigène d'Amérique du Nord. On le trouve dans de petits ruisseaux, des rivières et des lacs, mais surtout en

eau peu profonde, où ses lèvres charnues l'aident à se nourrir de vers, de mollusques, de larves d'insectes et d'œufs de poissons. L'espèce est considérée comme généraliste, puisqu'elle peut survivre dans des conditions diverses, même défavorables. Elle s'adapte aisément à divers habitats et à des influences environnementales changeantes. Le meunier noir tolère relativement bien les eaux [turbides](#) et polluées, mais il a un faible succès reproducteur dans des [eaux acidifiées](#). Le meunier noir [fraie](#) en eau peu profonde ou dans des ruisseaux, en avril et en mai, quand l'eau atteint 10 °C. Le frai est parfois déclenché par un changement de température et par le ruissellement des eaux d'une fonte hâtive (Pêches et Océans Canada, 2016).

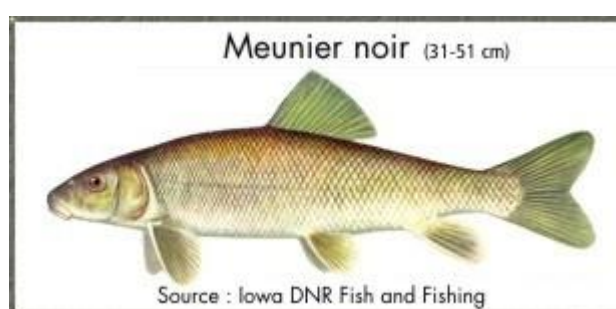


Figure 1. Le meunier noir (*C. commersonii*) est un poisson d'eau douce cypriniforme. Ses lèvres charnues et papilleuses qui lui permettent d'aspirer la matière organique et le périphyton du fond des cours d'eau lui ont valu en anglais le nom de *sucker* (suceur).

Notre démarche étant générique, elle peut guider le choix des mesures de préservation de la connectivité de toute espèce cible de poisson, pour peu que l'on dispose de données suffisantes sur la présence de l'espèce et sur ses préférences en matière d'habitat. Elle peut également englober de multiples espèces si le but est de guider la préservation de la biodiversité des poissons dans un bassin versant perturbé par l'activité humaine. Les pages qui suivent présentent nos méthodes, en résumé et en détail, suivies de nos principales observations, de quelques suggestions pour approfondir la recherche et de nos conclusions.

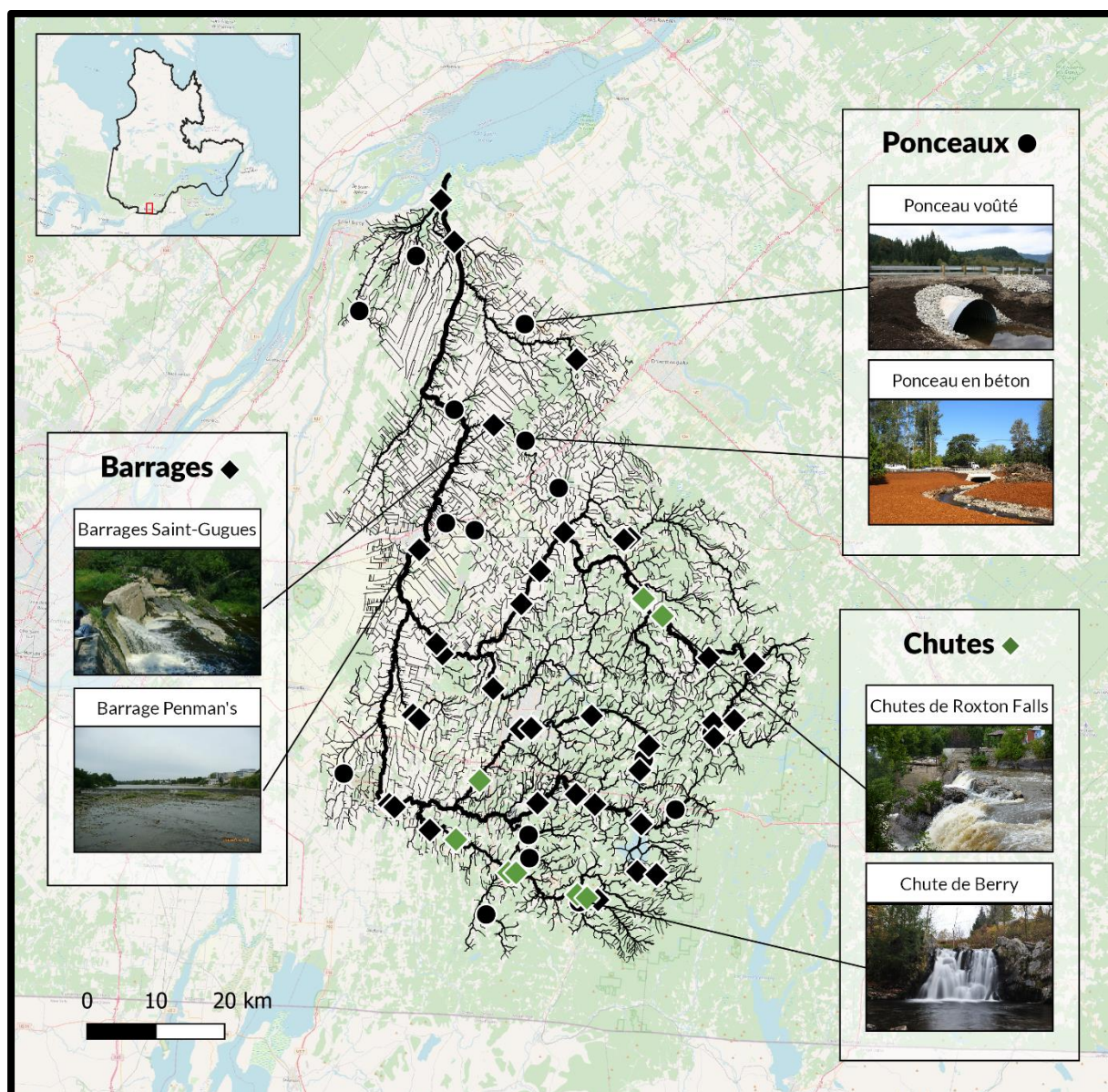


Figure 2. Carte des ruisseaux du bassin versant de la rivière Yamaska, avec emplacement et type d'obstacles. Cercles noirs : ponceaux; carrés noirs : barrages; carrés verts : chutes.

2. Méthodes

2.1. Survol

Nos méthodes permettent de mesurer de multiples formes de connectivité dans le bassin versant de la Yamaska, à partir de données sur la présence du meunier noir, les conditions environnementales des cours d'eau, ainsi que l'emplacement et le type d'obstacles. Nous proposons une démarche (Figure 3) pour évaluer la connectivité de la rivière en fonction des besoins du meunier noir en matière d'habitat. Le Tableau 1 est un glossaire des termes pertinents.

En résumé, la démarche commence par la sélection d'une région et d'une espèce cible. La connectivité structurelle du bassin versant est calculée à l'aide de la carte des cours d'eau et des obstacles. On utilise les données sur la présence de l'espèce cible pour générer un modèle de prédiction de sa présence dans tout le bassin. Le modèle repose sur des données relatives à la présence de l'espèce compilées depuis 15 ans (Figure 4). Le Tableau 2 décrit les variables environnementales à partir desquelles le modèle peut prédire la présence du meunier noir. Ces prédictions pour l'ensemble du bassin permettent de calculer la connectivité fonctionnelle pour les adultes de l'espèce cible. Puis, on recourt à un noyau de dispersion pour déterminer quelles sont les zones de frai possibles, selon la distance par rapport aux cours d'eau convenant à cette fin (Figure 5). Le noyau de dispersion est la probabilité qu'un adulte se rende dans chaque zone de frai. Ces probabilités sont ensuite combinées à la probabilité de la présence d'adultes dans le ruisseau source pour déterminer l'importance des cours d'eau au stade du frai de l'espèce cible. Cette dernière étape prédictive permet le calcul de la connectivité fonctionnelle pour l'espèce cible, au stade du frai.

La démarche produit des mesures finales pour chaque type de connectivité et une carte des valeurs de connectivité segmentaires, qui illustrent l'importance de chaque segment du bassin versant au regard des mesures de connectivité respectives.

2.2. Sources des données

Le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) et le ministère des Transports (MTQ) ont fourni des données essentielles à l'étude sur, respectivement, les variables environnementales mesurées et modélisées pour chaque segment de 100 mètres de cours d'eau du bassin versant de la Yamaska (Tableau 2), la présence

et l'absence du meunier noir dans ces mêmes cours d'eau (Figure 4) et l'emplacement et le type des obstacles qui entravent les cours d'eau du bassin.

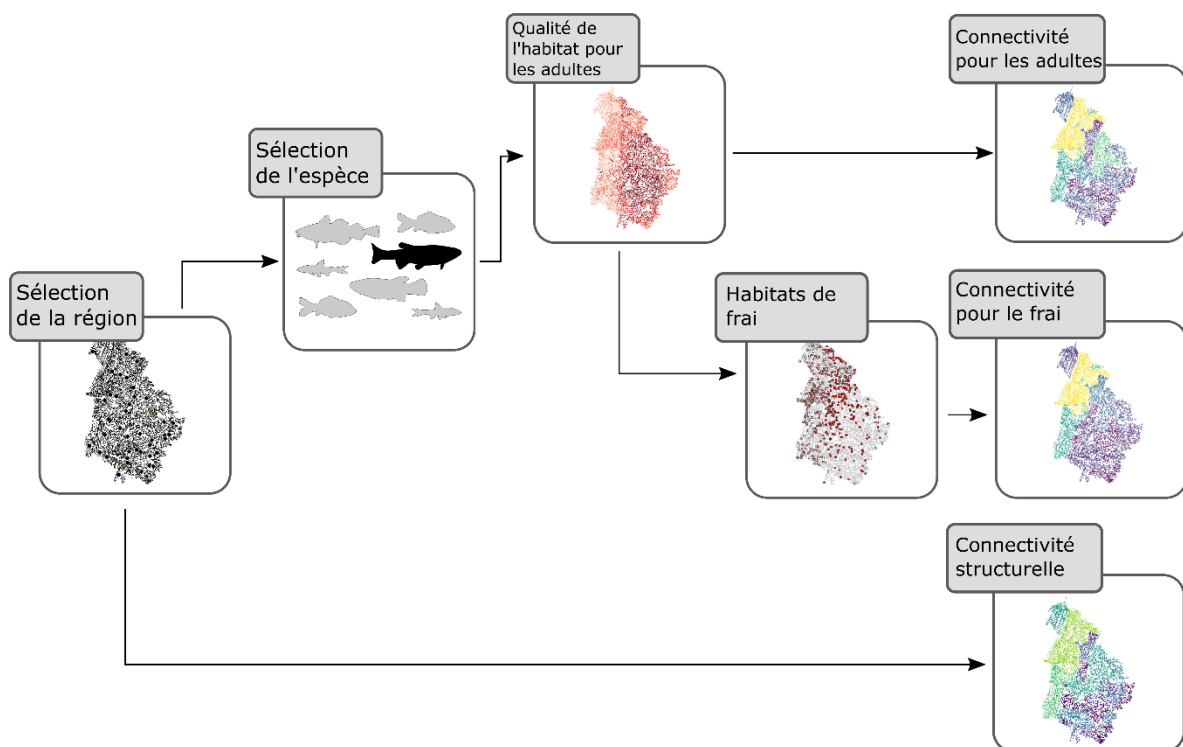


Figure 3. Étapes de la méthode d'évaluation de la connectivité des cours d'eau pour une espèce cible : 1) choisir la région; 2) choisir l'espèce; 3) déterminer la qualité des segments des divers cours d'eau pour le stade adulte de l'espèce cible; 4) déterminer les lieux de frai convenables en fonction de la proximité avec les habitats de qualité pour les adultes; et 5) calculer l'ICD et l'ICDH à partir de la longueur des cours d'eau, pondérés par la qualité des habitats pour le stade adulte et le stade du frai.

2.3. Modélisation de la présence du meunier noir adulte

Pour déterminer la qualité des cours d'eau au regard des besoins du meunier noir, nous avons mis en œuvre un modèle de forêt d'arbres décisionnels afin de prédire la qualité de tous les affluents de la rivière Yamaska pour cette espèce, à partir de données sur sa présence ou son absence depuis 15 ans, combinées à des données environnementales modélisées. La comparaison de ce modèle avec une régression logistique de base a révélé sa supériorité quant à la précision et à l'aire sous la courbe d'efficacité. Le modèle de forêt d'arbres décisionnels final présentait un indicateur de précision de 0,825 et une valeur de 0,87 pour l'aire sous la courbe d'efficacité, contre 0,72 et 0,76 respectivement pour le modèle de régression logistique. Utilisé pour prédire un ensemble de données tests, le modèle de forêt

d'arbres décisionnels a aussi produit moins de faux négatifs (12 %) et de faux positifs (22 %) que la régression logistique (24 % et 42 % respectivement). Il a produit des valeurs de probabilités de la présence du meunier noir dans le bassin versant de 0 à 1.

Tableau 1. Glossaire.

<i>Connectivité structurelle</i>	Connectivité du paysage calculée sans égard particulier au comportement ou aux besoins d'une espèce. Illustre l'accessibilité physique générale dans la région à l'étude.
<i>Connectivité fonctionnelle</i>	Connectivité du paysage calculée en fonction du comportement et des capacités de dispersion d'une espèce. Reflète plus précisément l'accessibilité dans la région à l'étude pour l'espèce cible.
<i>Probabilité de franchissement</i>	Probabilité (entre 0 et 1) qu'un poisson franchisse un obstacle.
<i>Segment</i>	Dans le contexte de l'ICD, section où les cours d'eau ne sont pas fragmentés les uns par rapport aux autres, mais séparés par des obstacles des autres cours d'eau du réseau.
<i>Indice de connectivité dendritique (ICD)</i>	Mesure de la connectivité structurelle de réseaux dendritiques, par exemple, de cours d'eau. L'ICD est fondé sur la probabilité de franchissement d'obstacles et la longueur d'un cours d'eau dans un segment par rapport à l'ensemble du bassin versant. Valeur de 0 à 100.
<i>Indice de connectivité dendritique des habitats (ICDH)</i>	Adaptation de l'ICD qui mesure la connectivité fonctionnelle de réseaux dendritiques comme des cours d'eau. L'ICDH est fondé sur la probabilité de franchissement d'obstacles et sur la longueur de cours d'eau constituant des habitats de qualité par rapport à l'ensemble du bassin versant. Valeur de 0 à 100.
<i>ICD segmentaire</i>	Mesure prise au niveau d'un segment, qui représente la valeur d'un segment focal par rapport à la connectivité de l'ensemble du bassin versant.

Tableau 2. Sommaire des variables environnementales modélisées par le MELCC pour chaque tronçon de 100 mètres de ruisseau dans le bassin versant de la Yamaska. Les variables sont présentées selon l'ordre de leur importance dans le modèle final de la présence de meuniers noirs adultes.

Variable	Minimum	Maximum
<i>Largeur (m)</i>	0,13	148,05
<i>Débit (m³/s)</i>	0,000027	4,66
<i>Longitude (°)</i>	-73,12819	-72,20557
<i>Température maximale moyenne sur 7 jours (°C)</i>	22,12	39,56
<i>Pente (%)</i>	0	3,61
<i>Alcalinité (mg/L)</i>	191,73	4 152,93
<i>Distance du lac le plus près (km)</i>	8,35	29 687,52
<i>Carbone organique dissous (mg/L)</i>	0	2 113,25
<i>Latitude (°)</i>	45,09227	46,11159

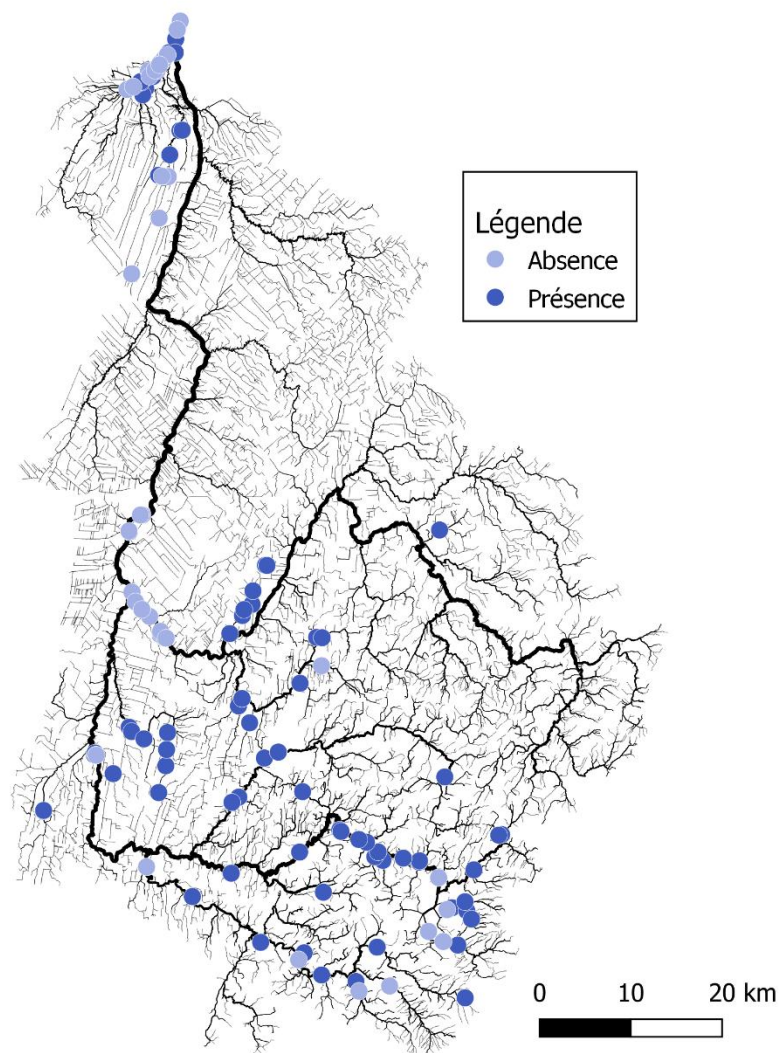


Figure 4. Présence et absence du meunier noir dans le bassin versant de la Yamaska depuis les 15 dernières années, selon les données compilées par le MFFP.

2.4. Modélisation de la présence du meunier noir en frai

L'évaluation de la qualité des cours d'eau pour le frai du meunier noir est fondée sur les résultats de la modélisation de leur qualité pour les individus adultes. Nous n'avons d'abord tenu compte que des cours d'eau dont l'ordre de Strahler était de 1 ou 2. Cela concorde avec la littérature selon laquelle le meunier tend à frayer dans des cours d'eau dont la vitesse est entre 0,3 et 0,6 m/s (McNamanay et coll., 2012). Ensuite, pour chaque site de frai potentiel, nous avons recensé tous les cours d'eau sources possibles et calculé la probabilité d'immigration depuis un noyau de dispersion à l'aide de paramètres dérivés d'une vaste méta-analyse des poissons d'eau douce (Radinger et Wolter, 2015), soit : la longueur moyenne des déplacements sur courte distance (1,09 km), la longueur moyenne des déplacements sur longue distance (32,16 km) et le pourcentage de la population susceptible

d'amorcer une migration de longue distance (62 %) (Figure 5). Nous avons ensuite multiplié la probabilité d'immigration par la probabilité de présence dans les sites sources, cette dernière étant calculée d'après le modèle de qualité des sites pour les adultes. Pour obtenir la probabilité de frai finale, nous avons additionné les valeurs de probabilité de tous les sites sources possibles.

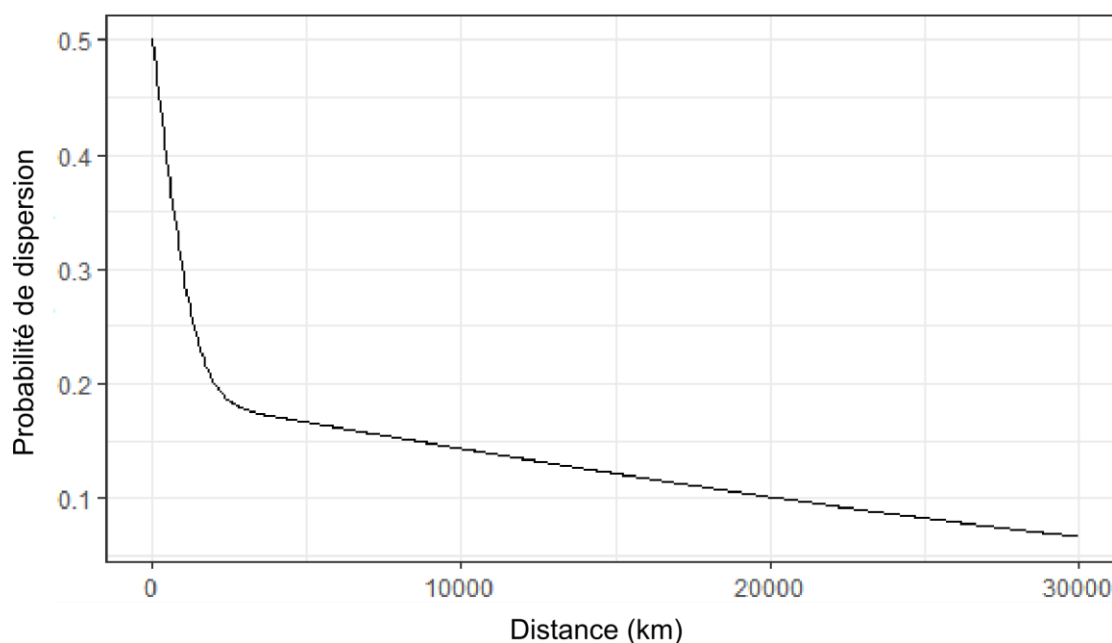


Figure 5. Noyau de dispersion paramétré pour déterminer la probabilité de dispersion du meunier noir depuis les cours d'eau sources vers les frayères. Les paramètres, tirés de l'étude de Radinger et Wolter (2015), sont : migration de courte distance (1,085 km), migration de longue distance (32,16 km) et pourcentage de la population susceptible d'amorcer une migration de longue distance (62 %).

2.5. Analyses de connectivité

La connectivité du bassin versant a été calculée à l'aide de l'ICD de connectivité structurelle et d'un ICD modifié, soit l'ICDH. Chaque obstacle entravant le réseau a été assorti d'une probabilité de franchissement de 0 à 1, selon le type d'obstacle. Les ponceaux ont été assortis d'une probabilité de franchissement partiel de 0,8, ce qui signifie que 80 % des meuniers noirs peuvent les franchir. Les chutes et les barrages ont obtenu un score de 0, ce qui signifie qu'ils sont complètement infranchissables pour le meunier noir.

Chaque indice de connectivité sommaire a été décomposé en valeurs segmentaires d'ICD et d'ICDH pour chaque segment créé par les obstacles du bassin. Si les valeurs sommaires ont le mérite de donner une idée générale de la fragmentation du bassin

versant, les valeurs segmentaires permettent de comprendre l'importance de chaque segment pour le meunier noir.

3. Résultats : connectivité structurelle

L'ICD global du bassin versant de la Yamaska est de 8,39, contre un ICD de 69,15 pour la fragmentation naturelle par des chutes d'eau. C'est dire que si l'on considère la fragmentation anthropique (barrages et ponceaux), seuls 12,1 % de la connectivité naturelle du bassin versant est préservée. D'où il ressort que les obstacles construits, comme les barrages et les ponceaux, ont un impact significatif sur la connectivité structurelle du bassin versant.

3.1. Connectivité structurelle à l'échelle régionale

La plus importante tendance à grande échelle de la connectivité structurelle dans la région est une connectivité inférieure dans les parties les plus en amont du bassin de la portion sud, notamment dans les rivières Yamaska Nord, Yamaska Sud et Yamaska Sud-Est. C'est là que l'on trouve la plus grande densité d'obstacles, en particulier des barrages, de sorte que les fragments y sont très courts, avec une longueur moyenne d'environ 7 m, contre 85 m pour les fragments en aval. Les segments de la portion aval du bassin versant, dans le nord, ont la plus grande connectivité structurelle, avec des valeurs de 12 à 24. Ces valeurs élevées sont attribuables à une densité d'aménagement plus faible dans cette portion du bassin versant. L'exception à cette tendance générale de connectivité structurelle est la rivière Noire, vers le centre du bassin. Cette rivière est fragmentée en son centre par trois barrages. En amont de cette série de barrages, toutefois, les affluents de la rivière Noire restent relativement bien connectés et forment quelques larges fragments adjacents, séparés seulement par quelques obstacles partiels, ce qui rend la région plus accessible au meunier noir.

3.2. Connectivité structurelle à l'échelle locale

La forte densité d'obstacles dans tout le bassin versant a un impact considérable sur la connectivité de l'ensemble du réseau, mais on peut aussi évaluer la connectivité en un endroit donné du réseau. La connectivité à l'échelle locale (ICD segmentaire) est déterminée par le lien entre les fragments et les environs. Si un petit fragment n'est séparé que par un obstacle partiel d'un fragment plus grand et bien connecté, la connectivité de ce fragment reste plutôt élevée. C'est le cas du fragment qui entoure Saint-Hugues (Figure 6). Il contient seulement 47 km de cours d'eau, mais il n'est séparé que par un obstacle partiel du plus grand segment, qui compte plus de

3 000 km de cours d'eau. Par conséquent, la connectivité structurelle de ce petit fragment est relativement élevée (ICD = 12,42). Par contre, le segment situé à proximité de la rivière Yamaska Sud-Est contient 43 km de cours d'eau, et il est séparé d'autres vastes segments bien connectés par une série d'obstacles complets, tant en amont qu'en aval. Ce fragment est considéré comme ayant une faible connectivité structurelle, avec un ICD de 1,35 seulement.

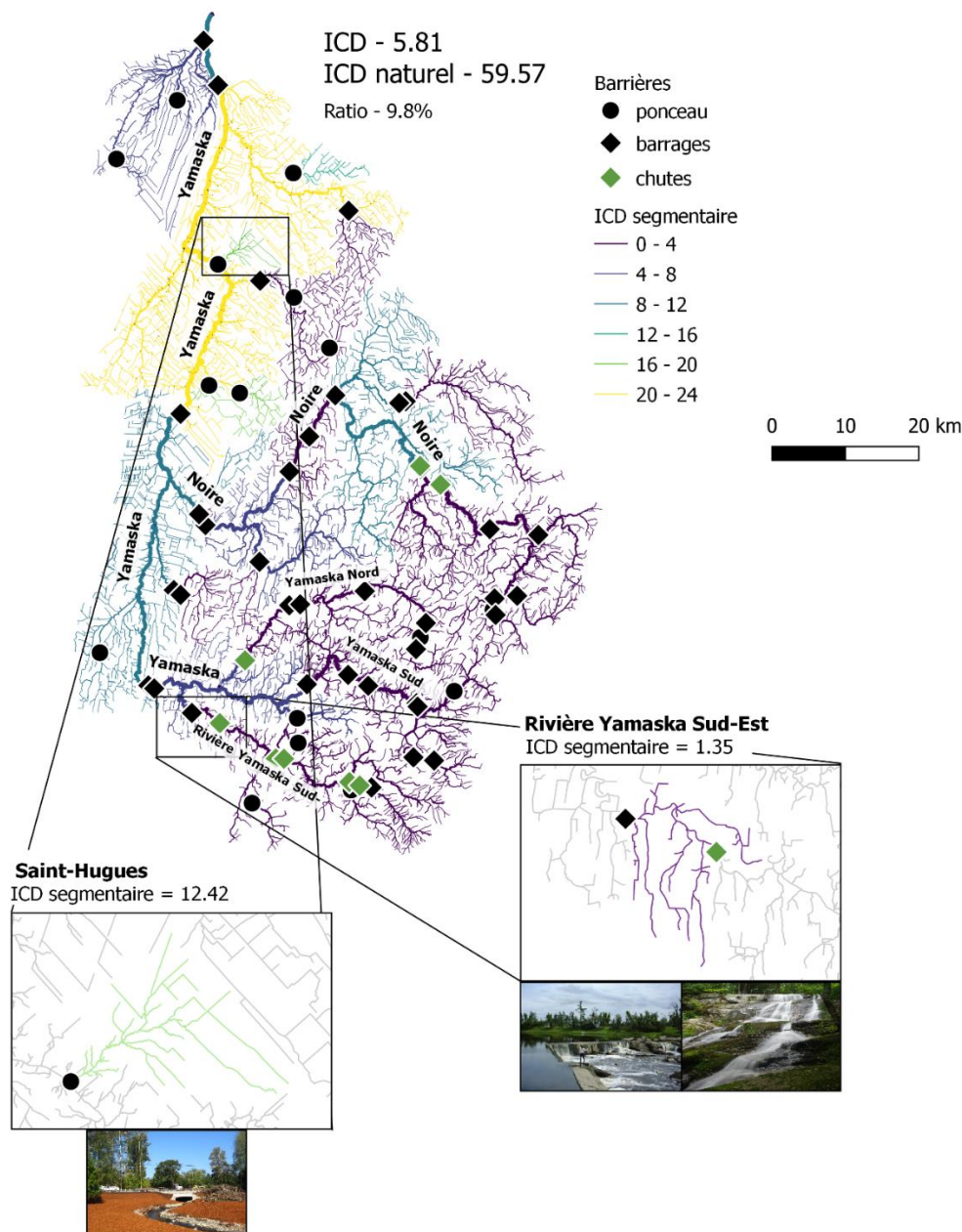


Figure 6. Carte du bassin versant de la rivière Yamaska colorée en fonction des valeurs de l'ICD segmentaire incluant les types d'obstacles. En encadré : fragments spécifiques et exemple d'obstacles. En jaune et en vert : ICD segmentaire élevé; en bleu et en violet : ICD segmentaire faible.

4. Résultats : connectivité fonctionnelle pour les adultes

L'ICDH global du bassin versant de la Yamaska pour les meuniers noirs adultes est de 7,07 contre 63,40 pour la fragmentation naturelle par les chutes. C'est dire que si l'on considère la fragmentation anthropique (barrages et ponceaux), seuls 11,2 % de la connectivité naturelle des habitats des adultes sont préservés. Il en ressort que les obstacles construits, comme les barrages et les ponceaux, ont un impact sensible sur l'accessibilité des habitats du meunier noir adulte dans la Yamaska.

4.1. Connectivité fonctionnelle pour les adultes à l'échelle régionale

Les habitats de qualité pour les adultes se concentrent surtout dans la portion orientale du bassin versant, alors que dans le chenal principal de la Yamaska et dans les autres affluents de la portion ouest du bassin se trouvent des cours d'eau qui conviennent peu au meunier noir adulte (Figure 7). Cependant, certains segments de cette portion sont tout de même assortis des ICDH segmentaires les plus élevés, avec des valeurs de 10,2 à 22,1, ce qui signifie qu'ils sont bien connectés à des habitats propices aux adultes par comparaison avec beaucoup d'autres segments dont l'ICDH n'est que de 0 à 4. Dans cette analyse, la probabilité de la présence d'adultes est utilisée pour sous-pondérer la longueur des cours d'eau qui ne sont pas des habitats de qualité et pour accroître l'importance des cours d'eau dont les caractéristiques en font un habitat convenable pour le meunier noir adulte. Bien que ces segments de la portion occidentale du bassin versant ne contiennent qu'environ 70 km d'habitat de grande qualité, ils restent beaucoup plus grands que d'autres segments, compte tenu d'une probabilité de présence de plus de 50 %. Par contre, les segments de la portion sud-est du bassin sont généralement assortis de faibles valeurs de connectivité (de 5,7 à 0). Ils comptent plus de 1 000 km d'habitats de grande qualité, mais la densité des obstacles est très élevée, d'où de petits segments très courts d'habitats de qualité. Dans la portion centre-est du bassin, constituée de la rivière Noire et de certains de ses affluents les plus en amont, il y a toutefois un segment assorti d'une valeur de connectivité modérée, soit entre 8,4 et 10,2, parce qu'il compte plus de 500 km d'habitat de grande qualité et qu'il s'y trouve une vaste région de cours d'eau non fragmentés.

4.2. Connectivité fonctionnelle pour les adultes à l'échelle locale

La connectivité fonctionnelle dépend étroitement de la probabilité de présence du meunier noir. Un segment très fragmenté par rapport au reste du bassin versant aura un faible score de connectivité si, en plus d'être isolé d'un habitat important, il n'offre

pas une forte densité d'habitats de qualité. C'est le cas du segment qui se trouve à proximité de Saint-Edmond-de-Grantham, dont l'ICDH est de 1,35. Situé dans le cours supérieur, il est très fragmenté, par un barrage, par rapport au reste du bassin versant. Il ne compte qu'à peu près 8 km d'habitats de grande qualité. Les segments voisins renferment des habitats de bonne qualité, mais ils sont rendus inaccessibles par un barrage municipal. En revanche, le segment situé à proximité du ruisseau Blanchard n'est que partiellement fragmenté par rapport au plus vaste segment du bassin versant, et il compte 25 km d'habitats de grande qualité. Étant donné sa position par rapport aux autres et les conditions environnementales qui y prévalent, son ICDH est de 12,42, ce qui est plutôt élevé.

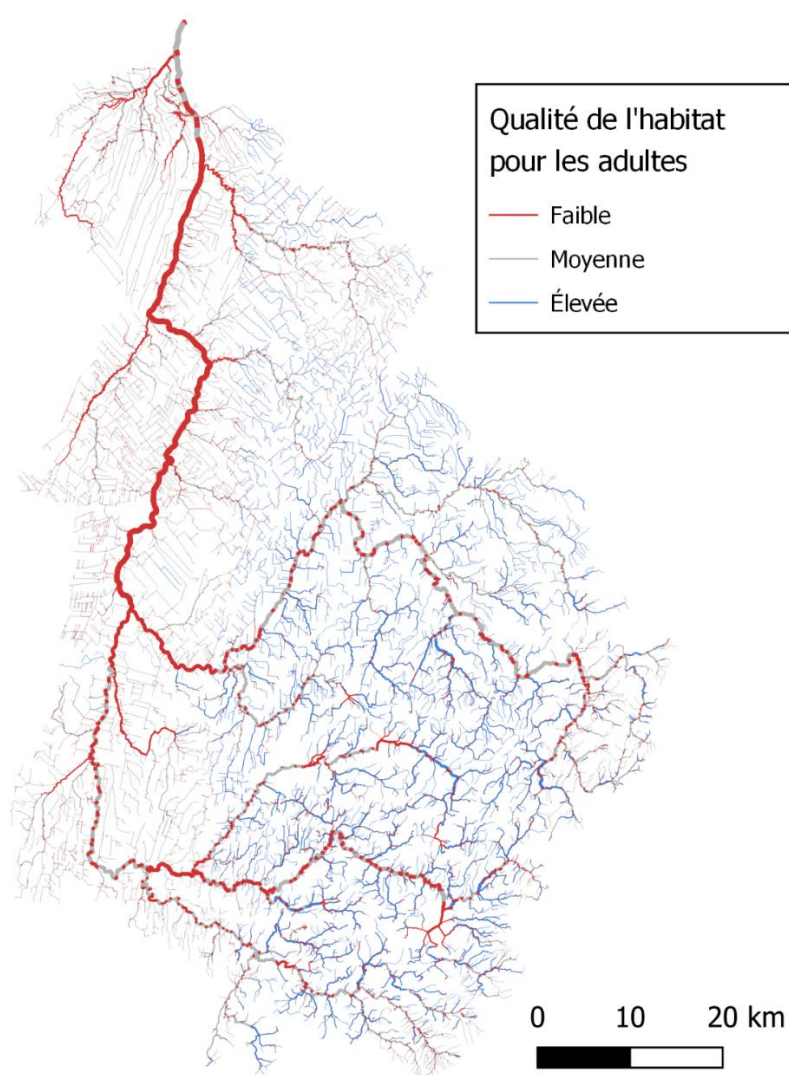


Figure 7. Carte du bassin versant de la rivière Yamaska. Les couleurs indiquent la probabilité de présence de meuniers noirs adultes. En rouge : cours d'eau où la probabilité est inférieure à 50 %. En bleu : cours d'eau où la probabilité est supérieure à 50 %.

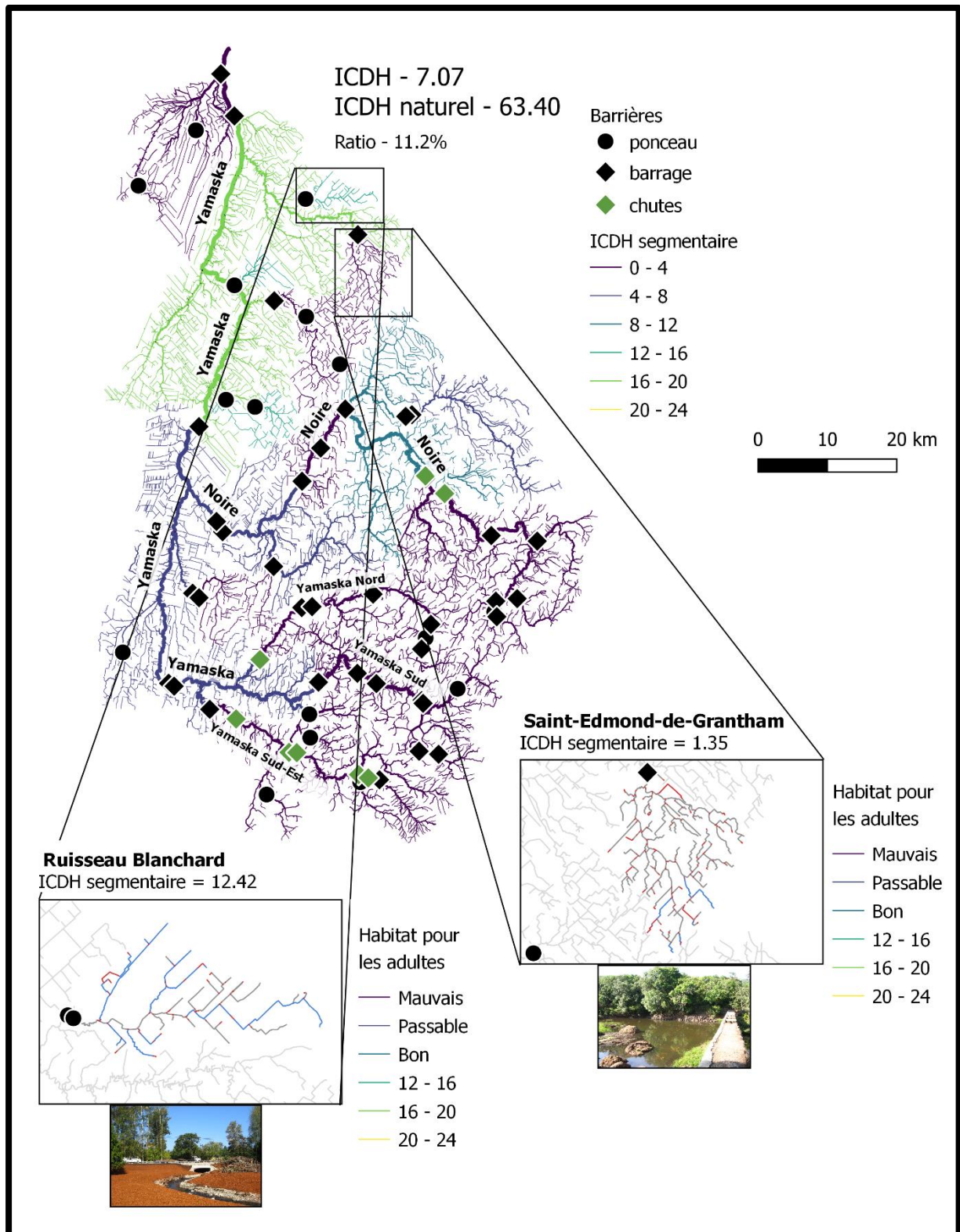


Figure 8. Carte du bassin versant de la rivière Yamaska coloré en fonction des valeurs d'ICDH segmentaires pour le meunier noir adulte, incluant l'emplacement et la classification des barrières sur le réseau. En encadré : fragments, exemples d'obstacles et qualité des cours d'eau du segment comme habitat du meunier noir adulte.

4.3. Points chauds de la connectivité fonctionnelle pour les adultes

À l'échelle locale, la connectivité fonctionnelle pour les adultes est semblable à la connectivité structurelle, à quelques exceptions près : dans une région à l'est, la connectivité fonctionnelle est grande, tandis que dans certains segments de la portion ouest, elle est faible par rapport à la connectivité structurelle à l'échelle locale (Figure 9). Ces valeurs s'expliquent par l'emplacement d'habitats de qualité pour les adultes dans la région (encadré de la Figure 9). Ainsi, dans la portion ouest, où la connectivité est grande pour les adultes, on observe une grande quantité d'habitats de qualité pour les adultes. Bien que les segments du sud-est aient des quantités analogues d'habitats de qualité pour adultes, ils sont plus fragmentés, étant donné une densité plus grande d'obstacles infranchissables. En revanche, la portion ouest compte une plus grande proportion d'habitats de faible qualité pour adultes et, par conséquent, les valeurs de connectivité structurelle surestiment l'importance de cette région pour le meunier noir adulte.

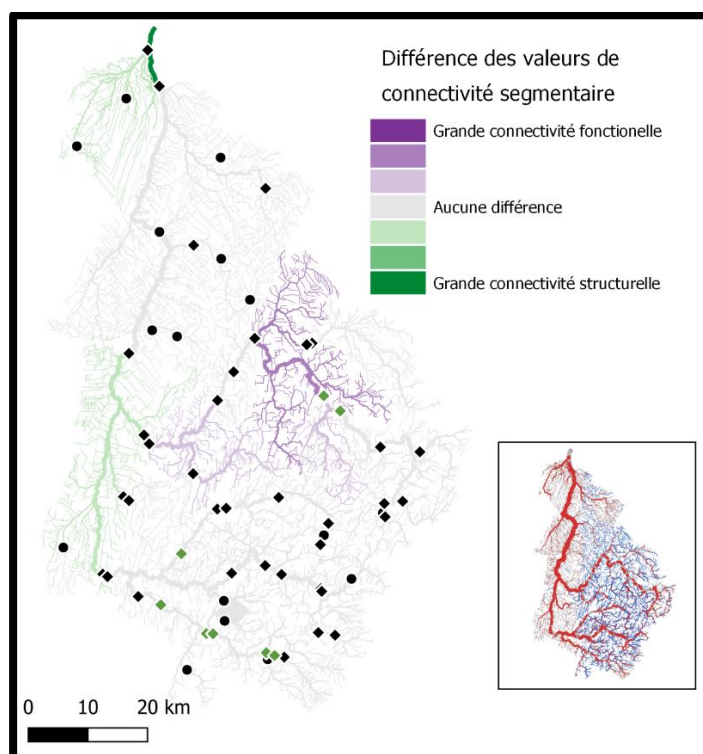


Figure 9. Différence entre les valeurs de connectivité structurelle et fonctionnelle segmentaire des cours d'eau du bassin versant de la Yamaska. En encadré : modélisation de la qualité des habitats du meunier noir adulte. En bleu, les habitats de grande qualité; en rouge, habitats de faible qualité.

5. Résultats : connectivité fonctionnelle des frayères

Dans l'ensemble, l'ICDH de frai du bassin versant de la Yamaska est de 5,81 contre 59,57 dans le cas de la fragmentation naturelle par des chutes. C'est dire que si l'on considère la fragmentation anthropique (barrages et ponceaux), seuls 9,8 % de la connectivité naturelle des habitats de frai sont préservés dans le bassin versant. D'où il ressort que les obstacles construits, comme les barrages et les ponceaux, ont un impact sensible sur l'accessibilité des habitats de frai du meunier noir dans la Yamaska.

5.1. Connectivité fonctionnelle des habitats de frai à l'échelle régionale

Les observations générales sont les mêmes que pour les autres mesures de connectivité. C'est dans la portion sud-est du bassin que l'on trouve les segments où la connectivité est la plus faible. Toutefois, certains des segments en aval des rivières Yamaska Sud-Est et Yamaska Sud-Ouest, dans le sud du bassin versant, ont un ICDH de frai de 3,5 à 8,4, attribuable à une forte densité de frayères de qualité dans la région, en particulier dans les cours d'eau plus étroits, plus appréciés du meunier noir. À l'exception d'un segment extrêmement fragmenté au centre du cours de la rivière Noire, il y a aussi beaucoup de segments assortis d'un ICDH de frai modéré, soit de 8,4 à 14,5 le long de la rivière Noire et de ses affluents.

5.2. Connectivité fonctionnelle des habitats de frai à l'échelle locale

La tendance générale de la connectivité fonctionnelle sur le plan du frai est surtout attribuable à l'existence d'habitats de frai dans les segments fragmentés du bassin versant de la Yamaska. Toutefois, l'emplacement de ces segments par rapport aux autres, et les obstacles qui les fragmentent ont aussi d'importantes répercussions sur la connectivité estimée. Ainsi, alors que la majeure partie de la rivière Noire est assortie de valeurs de connectivité élevées, il y a, au centre de la rivière (Figure 10) un segment assorti d'un ICDH de 0,93, ce qui est très faible. La raison en est que ce segment ne compte que 26 m de cours d'eau acceptables sur le plan du frai et qu'il est coupé d'autres portions du bassin versant par deux obstacles complets : le barrage du Père-Tarte et un autre barrage dans la municipalité d'Upton. D'autres segments comportant aussi des sites de frai de faible longueur ont tout de même un ICDH de frai élevé parce qu'ils sont voisins d'un grand nombre d'habitats de qualité dont ils ne sont séparés que par des obstacles partiels. C'est le cas notamment du segment à proximité de celui du ruisseau Bonin, qui compte 1 231 m de cours d'eau

de qualité sur le plan du frai, ce qui est relativement long, et qui n'est séparé d'autres segments dotés de frayères acceptables que par des obstacles partiels.

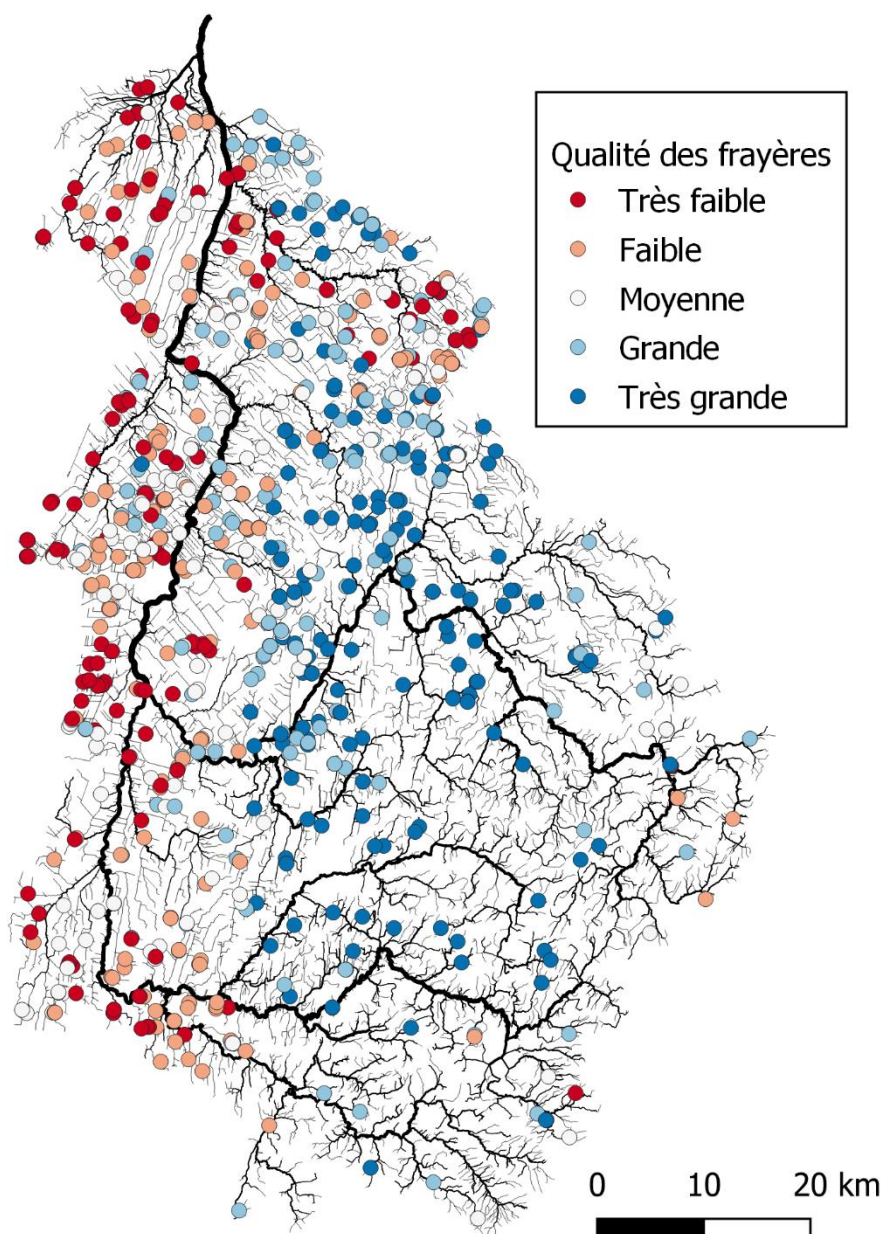


Figure 10. Carte du bassin versant de la Yamaska avec lieux de frai possibles et probabilités de frai. En rouge : probabilité inférieure à 50 %; en bleu : probabilité supérieure à 50 %.

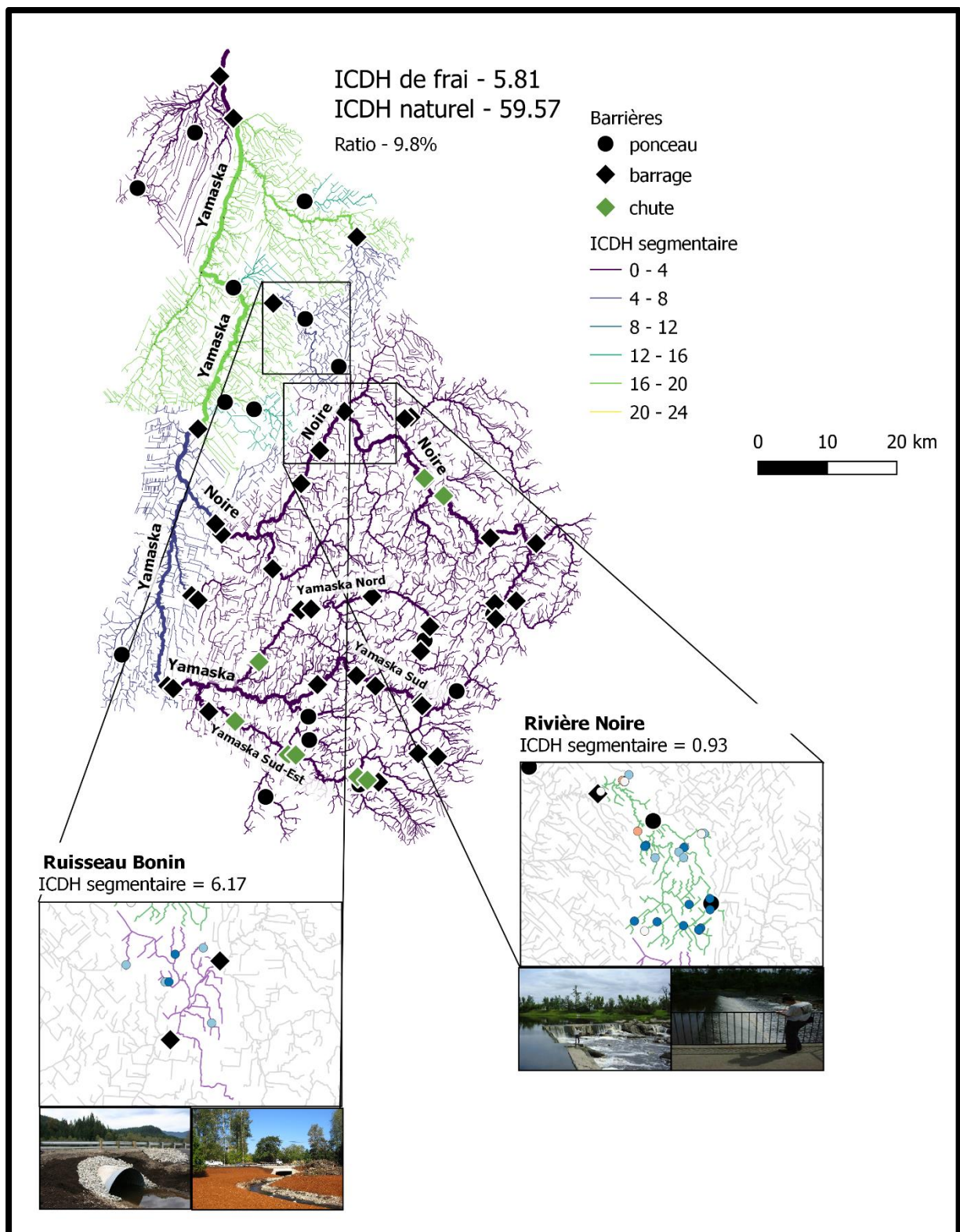


Figure 11. Carte du bassin versant de la rivière Yamaska colorée en fonction de l'ICDH de frai, avec types d'obstacles. En encadré : fragments, exemples d'obstacles et qualité des sites de frai pour le meunier noir.

5.3. Connectivité fonctionnelle pour les poissons adultes : points chauds

À l'échelle locale, la connectivité fonctionnelle pour le frai est généralement semblable à la connectivité fonctionnelle pour les adultes, à quelques exceptions près : elle est plus grande dans une zone du nord-est et plus faible dans de nombreux autres segments par rapport à la connectivité fonctionnelle pour les adultes à l'échelle locale (Figure 12). Ces résultats sont attribuables à l'emplacement des lieux de frai possibles dans le bassin versant (encadré de la Figure 12). Cette zone de grande connectivité pour le frai, dans le nord-est, correspond à une grande densité de frayères de grande qualité et d'habitats d'adultes de faible qualité. Par contre, d'autres régions du bassin versant, considérées comme importantes sur le plan de la connectivité pour les adultes, ne comportent pas une grande quantité de frayères de qualité.

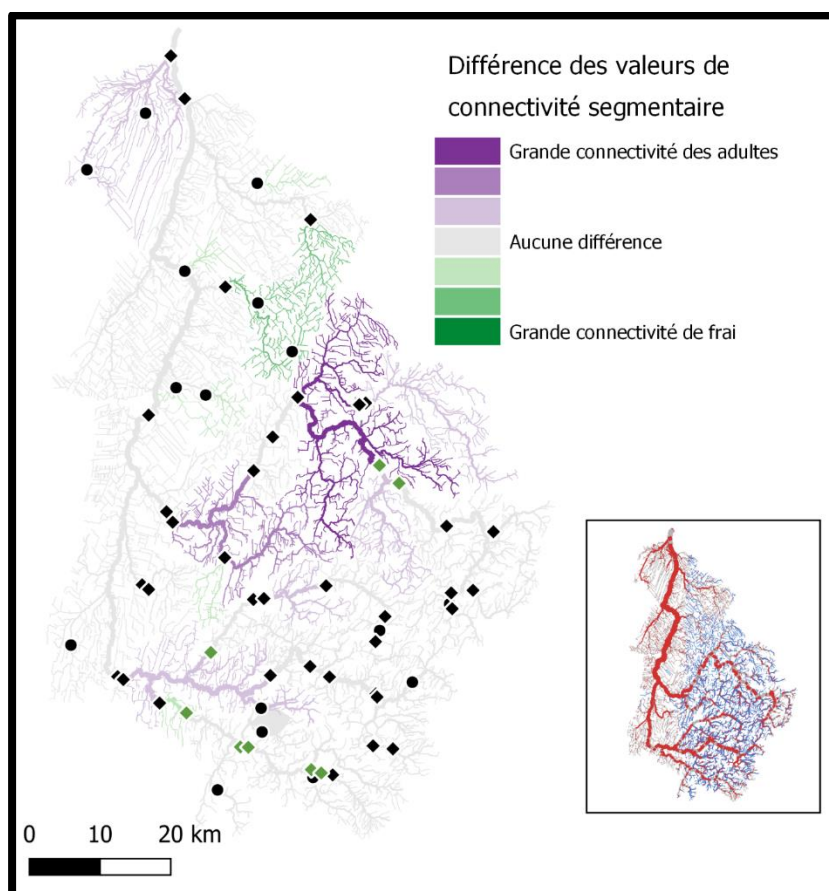


Figure 12. Différence de valeurs entre la connectivité fonctionnelle pour les adultes et la connectivité fonctionnelle pour le frai des cours d'eau du bassin de la Yamaska. En encadré : qualité des sites de frai pour le meunier noir avec, en bleu, les sites de frai de grande qualité, en gris, les sites de qualité moyenne et en rouge, les sites de mauvaise qualité.

6. Discussion

La connectivité structurelle et la connectivité fonctionnelle sont toutes deux d'importantes mesures quant à la capacité de l'habitat à soutenir la biodiversité aquatique. La restauration est, depuis longtemps, l'axe privilégié de la préservation des cours d'eau. Toutefois, il est démontré que, seule, la restauration est inefficace pour la conservation des espèces de poissons (Palmer et coll., 2010; Pracheil et coll., 2013). Des publications récentes mettent en relief l'importance de préserver, outre la qualité, la quantité des habitats (Eros et coll., 2018). La connectivité structurelle suppose que tous les cours d'eau d'un bassin versant sont d'égale importance pour l'espèce. Ce type d'analyse peut bien résumer la fragmentation d'un bassin versant pour une espèce généraliste qui jouit d'un habitat acceptable dans le bassin entier. Toutefois, la plupart des espèces n'ont besoin que d'accéder aux cours d'eau qui répondent à leurs besoins écologiques. La connectivité fonctionnelle permet de tenir compte de ces besoins et du fait que certains cours d'eau sont plus importants que d'autres pour l'espèce. L'analyse de la connectivité fonctionnelle peut livrer une information plus précise sur la fragmentation dans un bassin versant au regard d'une espèce cible donnée.

6.1. Forte fragmentation d'habitats importants en amont

L'analyse de la connectivité structurelle et de la connectivité fonctionnelle a permis d'observer une constante : la connectivité est généralement grande dans la partie ouest du bassin versant de la rivière, mais faible dans la portion sud-est. Ceci correspond à une fragmentation plus grande dans la partie amont de la rivière Yamaska et à une faible fragmentation des cours d'eau en aval. De plus, les valeurs de connectivité à l'échelle du bassin entier, selon ces trois mesures, sont également faibles. Ce résultat était prévisible, la recherche ayant montré qu'il suffit de quelques obstacles au départ d'un réseau pour produire un impact considérable sur la connectivité régionale du bassin versant (Grill et coll., 2014).

6.2. Différences entre la connectivité structurelle et la connectivité fonctionnelle

La connectivité structurelle dans le bassin versant de la rivière Yamaska est faible étant donné une forte densité d'obstacles. En comparaison avec l'effet de la fragmentation naturelle, plus de 80 % de la connectivité a été perdue en raison de la présence de ponceaux et de barrages. Il subsiste quelques secteurs, dans l'axe longitudinal de la Yamaska, où la connectivité structurelle est assez grande, mais la

plupart des autres cours d'eau du bassin versant sont très fragmentés en petits segments déconnectés.

La valeur de connectivité structurelle de 8,39 est assez proche de la connectivité fonctionnelle pour les poissons adultes, qui est de 7,07. Cette similarité est signe que l'emplacement des obstacles dans le bassin versant provoque une fragmentation structurelle et dissocie les habitats de qualité pour adultes, le tout à des degrés similaires. Toutefois, l'ajout de la qualité des habitats à la mesure de l'indice de connectivité dendritique des habitats (ICDH) des adultes permet de mieux comprendre l'état de portions particulières du bassin, qui se distinguent par d'importantes différences de connectivité structurelle et fonctionnelle. C'est le cas notamment des tributaires en amont de la rivière Noire, dans la zone centre-est du bassin versant. Même si la connectivité structurelle entre les segments de cette portion du bassin est plutôt faible, l'ICDH pour adultes de ces segments est modéré. Ces segments pourraient donc être la cible prioritaire des mesures adoptées pour préserver la santé de la population du meunier noir.

À 5,81, la connectivité fonctionnelle sur le plan du frai est, elle aussi, proche de la connectivité structurelle. Toutefois, alors que les valeurs de connectivité à l'échelle du bassin entier sont assez semblables, elles diffèrent beaucoup plus à l'échelle des segments. Ainsi, à proximité de la rivière Noire, le bassin versant de la rivière Yamaska compte de nombreux segments où l'ICDH de frai est élevé en comparaison avec l'ICD structurel, étant donné la forte concentration de frayères de qualité. Les segments doivent vraisemblablement être des cibles privilégiées des efforts de conservation si l'on veut assurer le maintien de la population du meunier noir, puisque l'existence de frayères de qualité est essentielle au cycle biologique de l'espèce.

6.3. Choix des mesures de conservation pour un ensemble d'espèces et de cycles de vie

Les différences entre la connectivité structurelle et la connectivité fonctionnelle peuvent guider le choix des mesures de conservation à privilégier pour une espèce cible. Il faut en outre tenir compte d'importantes différences de connectivité fonctionnelle, selon qu'elle est évaluée au regard des besoins des poissons adultes ou du frai. Pour préserver la santé de la population de meuniers noirs dans le bassin versant, il faut en effet répondre à tous les besoins de l'espèce pendant tout son cycle biologique. L'un des moyens d'y parvenir est de préserver l'habitat

d'alimentation des adultes et l'habitat de frai, où les individus matures déposent leurs œufs. Par ailleurs, pour que le meunier noir puisse achever son cycle de vie, il faut étudier ces deux volets de la connectivité fonctionnelle pour éviter que les adultes soient dépourvus de frayères et vice versa. En fait, la recherche démontre que la fragmentation des réseaux hydrographiques affecte les populations en rendant les frayères moins accessibles (Gosset et coll., 2006). Selon d'autres études, le rythme de disparition des espèces de poissons augmente en fonction de l'isolement induit par la réduction de l'immigration depuis d'autres segments du bassin versant, qui diminue la richesse spécifique et accroît les dissemblances entre les communautés (Letcher et coll., 2007; Perkin et Gido, 2012).

Les frayères s'observent généralement dans les plus petits cours d'eau, en amont, alors que les adultes préfèrent les cours d'eau légèrement plus gros. Cet écart appelle déjà des priorités différentes sur le plan de la conservation. Il se manifeste également dans les mesures de connectivité : les segments de la portion sud de la région sont très fragmentés au regard des deux mesures de connectivité, mais sont pour la plupart assortis d'un ICDH de frai légèrement supérieur à l'ICDH des adultes. La différence est principalement attribuable à la forte densité de cours d'eau de tête et, par conséquent, de frayères de qualité. Du point de vue des besoins des adultes, ces segments sont moins prioritaires sur le plan de la conservation, puisqu'ils ne comportent pas une forte proportion d'habitats de qualité. Pour préserver l'espèce, il importe de concentrer les efforts sur la conservation des segments où la connectivité est grande à la fois au regard des besoins des adultes et pour le frai.

7. Recherches futures

Ce rapport porte sur la connectivité structurelle et fonctionnelle du bassin versant de la rivière Yamaska pour une seule espèce de poisson : le meunier noir. Toutefois, la démarche est adaptable à divers bassins versants et à l'étude de régions restreintes ou plus vastes, par exemple, l'ensemble des basses terres du Saint-Laurent. Voici d'ailleurs quelques moyens de combler les lacunes des données et d'en affiner la granularité, ainsi que des moyens d'utiliser la démarche pour déterminer les priorités de conservation et de restauration au profit de la biodiversité des poissons.

7.1. Données manquantes

La méthode élaborée aux fins de la présente étude de connectivité l'a été en fonction des données existantes. Or, certaines données importantes rendraient la méthode

plus fiable et l'évaluation plus précise. L'ajout de données sur l'environnement et sur les barrières, par exemple, permettrait de mieux comprendre la fragmentation, d'affiner les modèles de qualité des habitats et d'évaluer la connectivité avec plus de justesse.

Certes, le Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) englobe de nombreuses variables utiles à l'évaluation de la qualité des cours d'eau et des frayères, mais au moment de cette évaluation, il ne s'y trouvait pas de données sur le degré de pollution aquatique des lieux en question ni sur l'état de l'environnement de ces cours d'eau à l'époque du frai. On sait que le meunier noir, espèce cible de ce rapport, est très résistant aux polluants aquatiques courants. Il est donc probable que la concentration de ces polluants dans l'eau n'ait pas un impact considérable sur la qualité de l'habitat. Toutefois, de nombreuses autres espèces sont très sensibles à un grand nombre de polluants courants et il importe donc d'inclure ces données dans les modèles de qualité des habitats. Par ailleurs, les données du CRHQ sont modélisées selon une échelle temporelle d'un an, mais le frai se produit souvent à une époque particulière de l'année, selon l'espèce. Pour déterminer plus précisément la qualité des frayères, il faudrait donc disposer de données saisonnières sur les variables environnementales dont on sait qu'elles ont tendance à changer, comme la température et le débit de l'eau. Ces données permettraient de mieux comprendre l'emplacement des sites importants à l'intérieur d'un bassin versant, mais il en faudrait d'autres encore pour affiner l'évaluation de la connectivité.

Ce rapport ne détaille évidemment pas tous les obstacles qui se trouvent dans le bassin versant de la Yamaska, et le calcul de la probabilité de franchissement des obstacles dont il fait état est fondé sur des études qui datent. Des partenariats et un partage de données avec les municipalités de la région et l'organisme de bassin versant local permettraient d'obtenir des données de plus haute résolution. Enfin, l'intégration de données sur les caractéristiques physiques des obstacles, comme la pente et la hauteur des ponceaux ou la présence d'échelles à poissons sur les lieux des barrages permettraient une estimation plus raffinée et plus précise de la probabilité de franchissement par diverses espèces.

7.2. Granularité des données

La méthode présentée dans ce rapport exige à la fois une analyse à petite échelle pour trouver quelles aires sont des habitats propices pour les adultes et des habitats de frai convenables, et pour faire état de la connectivité à l'échelle de l'ensemble du

bassin versant. Dans cette optique, la démarche proposée exige une compréhension pointue du bassin versant si l'on veut comprendre la connectivité dans l'ensemble du bassin. Les données qui fondent ce rapport ont une granularité de 100 m. Or, cette résolution ne tient pas compte des microhabitats présents dans les cours d'eau, ce qui nuit à la localisation de frayères importantes. Le frai exige souvent des conditions très particulières comme des zones de courant de moins de 100 m qui échapperaient donc aux évaluations étant donné ce degré de granularité.

7.3. Analyse de connectivité pour plusieurs espèces cibles

La démarche utilisée peut aussi être élargie à plusieurs espèces cibles en vue de la détermination de la connectivité au regard de la diversité des poissons dans la région. Chaque espèce a des besoins écologiques distincts et réagit d'une manière particulière à la fragmentation. Le regroupement d'espèces en fonction de leurs besoins écologiques permettrait d'analyser la connectivité pour chaque groupe et d'optimiser les mesures de conservation en fonction de multiples objectifs, au profit de nombreuses espèces. La démarche proposée deviendrait alors un outil efficace de préservation de la biodiversité des poissons (Figure 13).

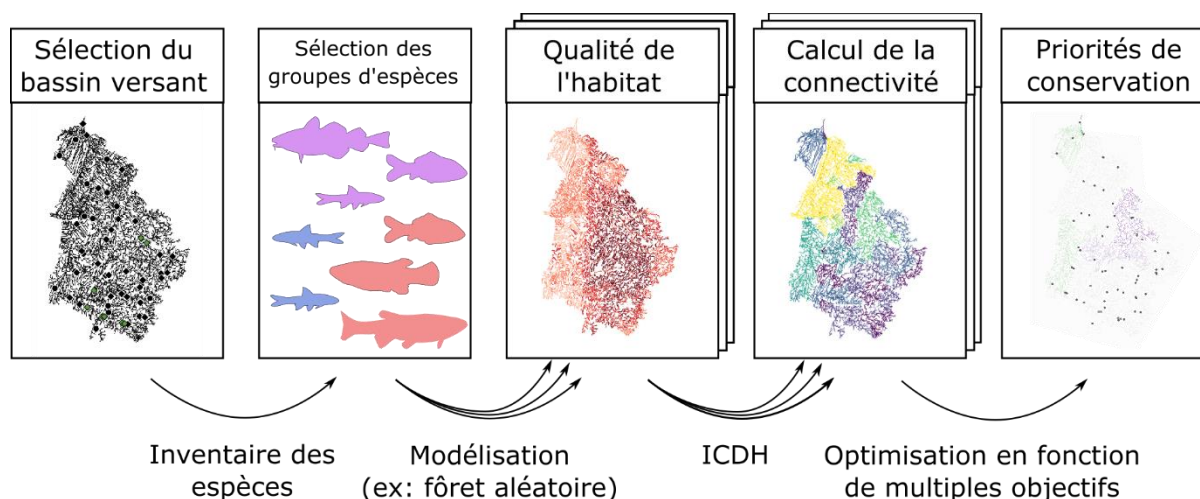


Figure 13. Étapes de priorisation des zones de conservation en fonction de plusieurs espèces cibles. 1) Choisir la région où aura lieu l'analyse de connectivité. 2) Regrouper les espèces en fonction de leurs besoins écologiques. 3) Modéliser la qualité des habitats pour chaque groupe d'espèces. 4) Calculer l'ICD et l'ICDH pour chaque groupe. 5) Accorder la priorité aux régions d'importance pour la connectivité en fonction de l'ensemble des résultats de connectivité.

Conclusion

L'expansion de la production d'hydroélectricité et de la construction routière partout sur la planète a déjà entraîné une fragmentation considérable des cours d'eau. Étant donné l'urbanisation et la croissance démographique dans le sud du Québec, il devient nécessaire d'analyser la connectivité des cours d'eau et leur conservation. Dans le cadre de cette étude, nous avons élaboré une méthode pour évaluer diverses formes de connectivité, que nous avons appliquée au meunier noir présent dans le bassin versant de la rivière Yamaska.

Nous observons dans ce portrait global que la fragmentation du réseau se concentre dans la zone en amont plutôt que dans les chenaux principaux du réseau. Or, les aires d'amont sont des habitats très importants pour le meunier noir, sur le plan du frai et de l'alimentation, en plus de procurer d'importants nutriments pour l'aval du bassin versant. Selon la théorie la plus largement acceptée en matière d'écologie des rivières, les chenaux principaux des réseaux hydrographiques sont essentiels à la conservation de la biodiversité des poissons au Canada (Carrara et coll., 2012; Altermatt, 2013; Henriques-Silva et coll., 2019).

À l'échelle du bassin versant, les valeurs de connectivité structurelle et fonctionnelle sont similaires, ce qui signifie que les barrages et les ponceaux ont un impact similaire sur la connectivité, la réduisant à plus de 90 %. Toutefois, les mesures de connectivité à l'échelle segmentaire signalent d'importantes différences au sein du bassin versant en fonction du type de connectivité évalué. Certains segments se caractérisent par une faible connectivité structurelle, mais sont très importants pour le stade adulte ou le stade du frai du meunier noir. Ce résultat signifie que l'élimination des obstacles dans une portion du bassin versant en fonction du nombre de cours d'eau isolés en amont seulement ne serait pas forcément bénéfique pour les populations de meuniers noirs.

Il y a quelques différences importantes entre la connectivité fonctionnelle pour le stade adulte et pour le stade de frai. Les adultes préfèrent les vastes cours d'eau au débit lent, tandis que les poissons en frai s'observent principalement dans les petits cours d'eau au courant rapide. Ces différences se manifestent dans les résultats de connectivité associés à ces deux stades du cycle de vie de l'espèce. Il y a en outre d'importantes différences entre les valeurs de connectivité de différents segments du bassin versant, différences d'une importance cruciale, puisque la préservation des

habitats des poissons adultes sans égard aux habitats de frai ne peut pas préserver efficacement la population du meunier noir dans le bassin versant de la rivière Yamaska. La prise en compte de ces différences facilitera la priorisation des objectifs de préservation et la détermination des sites qu'il importe de restaurer.

Bibliographie

- Alexandre, C. M., et P. R. Almeida (2010). « The impact of small physical obstacles on the structure of freshwater fish assemblages », *River Research and Applications*, vol. 26, p. 977–994.
- Altermatt, F. (2013). « Diversity in riverine metacommunities: a network perspective », *Aquatic Ecology*, vol. 47, p. 365–377.
- Burkhead, N. M. (2012). « Extinction Rates in North American Freshwater Fishes, 1900–2010 », *BioScience*, vol. 62, p. 798–808.
- Carrara, F., F. Altermatt, I. Rodriguez-Iturbe et A. Rinaldo (2012). « Dendritic connectivity controls biodiversity patterns in experimental metacommunities », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, p. 5761–5766.
- Collen, B., F. Whitton, E. E. Dyer, J. E. M. Baillie, N. Cumberlidge, W. R. T. Darwall, C. Pollock, N. I. Richman, A.-M. Soulsby et M. Böhm (2014). « Global patterns of freshwater species diversity, threat and endemism », *Global Ecology and Biogeography*, vol. 23, p. 40–51.
- Cote, D., D. G. Kehler, C. Bourne et Y. F. Wiersma (2009). « A new measure of longitudinal connectivity for stream networks », *Landscape Ecology*, vol. 24, p. 101–113.
- Crooks, K. R., et M. A. Sanjayan (2006). *Connectivity conservation*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Dudgeon, D., A. H. Arthington, M. O. Gessner, Z.-I. Kawabata, D. J. Knowler, C. Lévêque, R. J. Naiman, A.-H. Prieur-Richard, D. Soto, M. L. J. Stiassny et C. A. Sullivan (2006). « Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges », *Biological Reviews*, vol. 81, p. 163–182.
- Eros, T., J. R. O'Hanley, et I. Czegledi (2018). « A unified model for optimizing riverscape conservation », *Journal of Applied Ecology*, vol. 55, p. 1871–1883.
- Fagan, W. F., et J. M. Calabrese (2006). *Quantifying connectivity: balancing metric performance with data requirements*, Cambridge University Press. Sur Internet : [/core/books/connectivity-conservation/quantifying-connectivity-balancing-metric-performance-with-data-requirements/9D5DCB2A5313F6E1929EFE02F9CA35EE](https://doi.org/10.1017/9781107305440.009).

- Forman, R. T. T., et L. E. Alexander (1998). « Roads and Their Major Ecological Effects », *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 29, p. 207–231.
- Gosset, C., J. Rives et J. Labonne (2006). « Effect of habitat fragmentation on spawning migration of brown trout (*Salmo trutta L.*) », *Ecology of Freshwater Fish*, vol. 15, p. 247–254.
- Grill, G., B. Lehner, M. Thieme, B. Geenen, D. Tickner, F. Antonelli, S. Babu, P. Borrelli, L. Cheng, H. Crochetiere, H. E. Macedo, R. Filgueiras, M. Goichot, J. Higgins, Z. Hogan, B. Lip, M. E. McClain, J. Meng, M. Mulligan, C. Nilsson, J. D. Olden, J. J. Opperman, P. Petry, C. R. Liermann, L. Sáenz, S. Salinas-Rodríguez, P. Schelle, R. J. P. Schmitt, J. Snider, F. Tan, K. Tockner, P. H. Valdujo, A. van Soesbergen et C. Zarfl (2019). « Mapping the world's free-flowing rivers », *Nature*, vol. 569, p. 215.
- Grill, G., C. Ouellet Dallaire, E. Fluet Chouinard, N. Sindorf et B. Lehner (2014). « Development of new indicators to evaluate river fragmentation and flow regulation at large scales: A case study for the Mekong River Basin », *Ecological Indicators*, vol. 45, p. 148–159.
- Henriques-Silva, R., M. Logez, N. Reynaud, P. A. Tedesco, S. Brosse, S. R. Januchowski-Hartley, T. Oberdorff et C. Argillier (2019). « A comprehensive examination of the network position hypothesis across multiple river metacommunities », *Ecography*, vol. 42, p. 284–294.
- Hydro-Québec (2020). *Plan stratégique 2020–2024 : Voir grand avec notre énergie propre.*
- Jelks, H. L., S. J. Walsh, N. M. Burkhead, S. Contreras-Balderas, E. Diaz-Pardo, D. A. Hendrickson, J. Lyons, N. E. Mandrak, F. McCormick, J. S. Nelson, S. P. Platania, B. A. Porter, C. B. Renaud, J. J. Schmitter-Soto, E. B. Taylor et M. L. Warren (2008). « Conservation Status of Imperiled North American Freshwater and Diadromous Fishes », *Fisheries*, vol. 33, p. 372–407.
- Letcher, B. H., K. H. Nislow, J. A. Coombs, M. J. O'Donnell et T. L. Dubreuil (2007). *Population Response to Habitat Fragmentation in a Stream-Dwelling Brook Trout Population*, PLOS ONE 2, e1139.
- Lytle, D. A., et N. L. Poff (2004). « Adaptation to natural flow regimes », *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 19, p. 94–100.

- McNamanay, R. A., T. J. Young et D. J. Orth (2012). « Spawning of White Sucker (*Catostomus commersoni*) in a Stormwater Pond Inlet », *The American Midland Naturalist*, vol. 168, p. 466–476.
- Neville, H., J. Dunham et M. Peacock (2006). « Assessing connectivity in salmonid fishes with DNA microsatellite markers », *Connectivity conservation*, Kevin R. Crooks et M. Sanjayan, M. (dir.), New York, Cambridge University Press, p. 318-342.
- Nilsson, C., C. A. Reidy, M. Dynesius et C. Revenga (2005). « Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems », *Science*, vol. 308, p. 405–408.
- O'Hanley, J. R., J. Wright, M. Diebel, M. A. Fedora et C. L. Soucy (2013). « Restoring stream habitat connectivity: A proposed method for prioritizing the removal of resident fish passage barriers », *Journal of Environmental Management*, vol. 125, p. 19–27.
- Palmer, M. A., H. L. Menninger et E. Bernhardt (2010). « River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: a failure of theory or practice? », *Freshwater Biology*, vol. 55, p. 205–222.
- Pêches et Océans Canada (2016). *Meunier noir*. Gouvernement du Canada. Sur Internet : <https://dfo-mpo.gc.ca/species-especes/profiles-profil/white-sucker-meunier-noir-eng.html>
- Perkin, J. S., et K. B. Gido (2012). « Fragmentation alters stream fish community structure in dendritic ecological networks », *Ecological Applications*, vol. 22, p. 2176–2187.
- Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks et J. C. Stromberg (1997). « The Natural Flow Regime », *BioScience*, vol. 47, p. 769–784.
- Pracheil, B. M., P. B. McIntyre et J. D. Lyons (2013). « Enhancing conservation of large-river biodiversity by accounting for tributaries », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 11, p. 124–128.
- Radinger, J., et C. Wolter (2015). « Disentangling the effects of habitat suitability, dispersal, and fragmentation on the distribution of river fishes », *Ecological Applications*, vol. 25, p. 914–927.

- Ricciardi, A., et J. B. Rasmussen (1999). « Extinction Rates of North American Freshwater Fauna », *Conservation Biology*, vol. 13, p. 1220–1222.
- Tonkin, J. D., F. Altermatt, D. S. Finn, J. Heino, J. D. Olden, S. U. Pauls et D. A. Lytle (2018). « The role of dispersal in river network metacommunities: Patterns, processes, and pathways », *Freshwater Biology*, vol. 63, p. 141–163.
- Zarfl, C., A. E. Lumsdon, J. Berlekamp, L. Tydecks et K. Tockner (2015). « A global boom in hydropower dam construction », *Aquatic Sciences*, vol. 77, p. 161–170.