

Effets du réseau routier sur la connectivité des frayères du grand brochet (*Esox lucius*) au lac Saint-Pierre (fleuve Saint-Laurent, Canada)

Céline Le Pichon, Marc Mingelbier, Maëlle Legros, Aline Foubert and Philippe Brodeur

Volume 142, Number 1, Winter 2018

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1042016ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1042016ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

La Société Provancher d'histoire naturelle du Canada

ISSN

0028-0798 (print)

1929-3208 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Le Pichon, C., Mingelbier, M., Legros, M., Foubert, A. & Brodeur, P. (2018). Effets du réseau routier sur la connectivité des frayères du grand brochet (*Esox lucius*) au lac Saint-Pierre (fleuve Saint-Laurent, Canada). *Le Naturaliste canadien*, 142(1), 78–91. <https://doi.org/10.7202/1042016ar>

Article abstract

To help complete the picture of the pressures affecting the diverse aquatic habitats of the Lake St-Pierre floodplain (Québec, Canada), an advanced geomatics analysis was used to assess the effects of the adjacent road network on the connectivity of spawning and nursery grounds of the northern pike (*Esox lucius*). The results revealed adverse effects on high potential habitat when the water flow at Sorel exceeded $12,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (recurrence interval of 1 to 2 years). Once this flow rate was reached, there was a direct habitat loss along roads (maximum: 142 ha) and fragmentation of habitat transected by roads (maximum: 39 ha). These effects, which were most marked around the northwestern part of the lake, depended largely on the hydrological conditions between spawning and the first week of larval life. Connectivity measurements highlighted the importance of functional culverts and of the hydrologic network of the littoral zone as being essential for habitat connectivity. The effects of the road network, although smaller than those caused by intensive agricultural practices or by the regulation of water flow, remained non-negligible. This study identified high-potential habitats and connectivity corridors as priority areas for protection or restoration.

Effets du réseau routier sur la connectivité des frayères du grand brochet (*Esox lucius*) au lac Saint-Pierre (fleuve Saint-Laurent, Canada)

Céline Le Pichon¹, Marc Mingelbier^{2*}, Maëlle Legros¹, Aline Foubert^{2, 3} et Philippe Brodeur⁴

Résumé

Afin de compléter le portrait des pressions agissant sur les habitats aquatiques de la plaine d'inondation du lac Saint-Pierre, une analyse géomatique avancée évalue les effets du réseau routier sur la connectivité des frayères et des nourriceries du grand brochet (*Esox lucius*). Les résultats révèlent des effets négatifs sur les habitats à fort potentiel lorsque le débit à Sorel dépasse 12 000 m³.s⁻¹ (récurrence : de 1 à 2 ans), créant des pertes directes au niveau des emprises (maximum : 142 ha) et de la fragmentation entre les habitats situés de part et d'autre des routes (maximum : 39 ha). Ces effets, principalement circonscrits dans la région nord-ouest du lac, dépendent largement des conditions hydrologiques entre la période de fraie et la première semaine de vie des larves. Les mesures de connectivité soulignent l'importance des ponceaux fonctionnels et du réseau hydrographique de la zone littorale, éléments essentiels à l'interconnexion des habitats. Il apparaît que les répercussions du réseau routier, bien qu'elles soient moindres que celles provoquées par les pratiques agricoles intensives ou encore par la régularisation du débit, demeurent non négligeables. La présente étude identifie les habitats à fort potentiel et des corridors de connectivité constituant des milieux prioritaires à protéger ou à restaurer.

MOTS CLÉS : connectivité, fraie, nourricerie, ponceau, réseau routier

Abstract

To help complete the picture of the pressures affecting the diverse aquatic habitats of the Lake St-Pierre floodplain (Québec, Canada), an advanced geomatics analysis was used to assess the effects of the adjacent road network on the connectivity of spawning and nursery grounds of the northern pike (*Esox lucius*). The results revealed adverse effects on high potential habitat when the water flow at Sorel exceeded 12,000 m³.s⁻¹ (recurrence interval of 1 to 2 years). Once this flow rate was reached, there was a direct habitat loss along roads (maximum: 142 ha) and fragmentation of habitat transected by roads (maximum: 39 ha). These effects, which were most marked around the northwestern part of the lake, depended largely on the hydrological conditions between spawning and the first week of larval life. Connectivity measurements highlighted the importance of functional culverts and of the hydrologic network of the littoral zone as being essential for habitat connectivity. The effects of the road network, although smaller than those caused by intensive agricultural practices or by the regulation of water flow, remained non-negligible. This study identified high-potential habitats and connectivity corridors as priority areas for protection or restoration.

KEYWORDS: connectivity, culvert, nursery, road network, spawning

Introduction

Intégrité et fonction de la plaine d'inondation du lac Saint-Pierre

Les fonctions écologiques associées aux plaines inondables sont essentielles à la santé et à l'intégrité des écosystèmes, à la qualité de l'eau, à la productivité des populations fauniques, à la conservation de la biodiversité

ainsi qu'à la pérennité des usages associés aux ressources en eau (Wilcox et Murphy, 1985). Le lac Saint-Pierre est le plus grand lac fluvial du fleuve Saint-Laurent et représente la plus grande plaine inondable d'eau douce du Québec, reconnu au niveau international comme site protégé par la Convention de Ramsar en 1998 et désigné Réserve mondiale de la Biosphère par l'UNESCO en 2000. Une partie de cette plaine inondable

1. Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, 1, rue Pierre-Gilles de Gennes, CS10030, 92761 Antony cedex, France.
2. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'expertise sur la faune aquatique, 880, chemin Sainte-Foy, Québec (Québec) G1S 4X4, Canada.
3. Université du Québec à Chicoutimi, 555, boul. de l'Université, Chicoutimi (Québec) G7H 2B1, Canada.
4. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la gestion de la faune de la Mauricie et du Centre-du-Québec, 100, rue Laviolette, bureau 207, Trois-Rivières (Québec) G9A 5S9, Canada.

Céline Le Pichon est hydro-écologue, chercheuse à l'IRSTEA d'Antony, France.

Marc Mingelbier est biologiste, chercheur en écologie aquatique à la Direction de l'expertise sur la faune aquatique du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

Maëlle Legros a réalisé un stage à l'IRSTEA en 2016 sous la supervision de Céline Le Pichon. Aline Foubert est étudiante au doctorat à l'Université du Québec à Chicoutimi. Philippe Brodeur est biologiste à la Direction de la gestion de la faune de la Mauricie et du Centre-du-Québec du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

marc.mingelbier@mffp.gouv.qc.ca

est caractérisée par la présence de milieux humides (marais, marécages et prairies humides) qui profitent à de nombreuses espèces. En particulier, on y trouve environ 70 % des espèces de poissons d'eau douce du Québec, dont la moitié utilise les milieux humides pour se reproduire et s'alimenter au printemps (Dauphin et Jobin, 2016; MDDEFP, 2013).

Les espèces de poissons qui utilisent la plaine d'inondation pour se reproduire sont exposées à divers effets anthropiques exercés dans ces habitats temporaires, situés à l'interface entre les milieux terrestres et aquatiques. Parmi ces espèces, on trouve le grand brochet (*Esox lucius*), une espèce qui a connu une baisse d'abondance au lac Saint-Pierre (Magnan et collab., 2017). Le grand brochet a souvent été sélectionné comme espèce modèle (par ex. Mingelbier et collab., 2008), car il est le premier à frayer au printemps dans la végétation de la plaine d'inondation, généralement très productive et où l'eau se réchauffe rapidement. Une fois les œufs éclos, les larves se dispersent vers des habitats de nourricerie (équivalant ici aux « aires d'alevinage ») qui présentent des conditions favorables à l'alimentation et à la survie des jeunes larves (présence de végétation, faible courant, faible profondeur; Foubert et collab., 2017a). Dans le fleuve Saint-Laurent, les meilleurs succès de reproduction du grand brochet surviennent lorsque le niveau d'eau est élevé et stable durant l'incubation des œufs (Armellin, 2004) et lorsque les niveaux d'eau élevés sont combinés à de fortes températures en période de croissance des jeunes stades, au mois de juin (Hudon et collab., 2009). Ces connaissances soulignent l'importance pour le grand brochet d'avoir accès à de vastes habitats lors de la reproduction et du développement des premiers stades de vie.

Le lac Saint-Pierre sous de multiples pressions

Du fait du climat tempéré, de la fertilité des sols et de la proximité de la voie navigable du fleuve Saint-Laurent, le sud du Québec est devenu la zone où se concentrent la majeure partie de la population québécoise ainsi que les activités économiques et industrielles (Latendresse et collab., 2008). Bien que le lac Saint-Pierre jouisse de plusieurs reconnaissances internationales en matière de conservation de ses milieux humides (Convention de Ramsar en 1998) et qu'il ait été reconnu par l'UNESCO en 2000 comme zone modèle conciliant la conservation de la biodiversité et le développement durable, il reste soumis à de multiples pressions associées aux activités humaines, qui s'accumulent avec le temps.

Au cours des derniers siècles, le paysage et l'utilisation du sol ont profondément changé avec la disparition des forêts décidues et mélangées au profit des systèmes agroforestiers. La plaine d'inondation du lac Saint-Pierre a été progressivement occupée par l'agriculture. On a assisté, entre les années 1960 et 1990, au remplacement des cultures pérennes par de grandes monocultures annuelles et après les années 1990, à l'intensification des pratiques (Richard et collab., 2011; TCRLSP, 2017). Les labours associés aux cultures annuelles font disparaître la végétation propice pour la fraie et créent au printemps des champs dénudés, sans support pour déposer

les œufs. Ces pratiques agricoles ont donc entraîné la perte directe de plusieurs milliers d'hectares d'habitats propices à la reproduction des poissons (p. ex., le brochet et la perchaude, *Perca flavescens*) et la détérioration de la qualité de l'eau en lien avec la dispersion des pesticides, des fertilisants et des matières en suspension (Latendresse et collab., 2008). Cette situation requiert aujourd'hui le déploiement d'efforts importants de restauration (de la Chenelière et collab., 2014; Foubert et collab., 2017a).

Les habitats aquatiques du lac Saint-Pierre (et le fleuve Saint-Laurent dans son ensemble) ont aussi subi de nombreuses transformations reliées aux besoins de la navigation, avec l'aménagement par dragage d'un chenal large (~250 m) et profond (~11,3 m), déplaçant dans d'autres habitats aquatiques des volumes importants de sédiments dragués, et aussi la construction de barrages de pierres dans l'archipel de Sorel pour relever le niveau d'eau jusqu'au port de Montréal (Morin et Côté, 2003; Villeneuve, 2001). La construction de nombreux ouvrages de génie civil le long du fleuve Saint-Laurent (ponts, tunnels, métro, îles de l'Expo 1967), ainsi que l'artificialisation des rives ont entraîné des changements profonds dans le paysage fluvial et sa dynamique d'écoulement.

Bien que le climat influence de manière prépondérante le régime hydrologique du système Saint-Laurent, la régularisation de son débit (qui vise à réduire le débit au printemps et à l'augmenter en automne afin de limiter les inondations printanières dans la grande région de Montréal, faciliter le passage des bateaux en été et favoriser la production d'hydroélectricité) a modifié significativement la disponibilité des habitats de reproduction des poissons au lac Saint-Pierre (Foubert et collab., 2017a; Mingelbier et collab., 2008). Cette régularisation a débuté dès 1911 avec le premier d'une série de barrages importants dans la rivière des Outaouais, et au début des années 1960 dans le fleuve Saint-Laurent avec le barrage Moses-Saunders. Il faut savoir que les effets de la régularisation du débit de la rivière des Outaouais ressentis au lac Saint-Pierre sont 10 fois plus grands que ceux de la régularisation du débit des Grands Lacs (Morin et Bouchard, 2000).

Enfin, le développement urbain et celui des infrastructures de transport ont entraîné des pressions supplémentaires sur l'environnement sous forme de rejets ou de modifications physiques du territoire et des milieux. Celles-ci peuvent alors engendrer une fragmentation des habitats ou encore la perte d'habitats naturels par leur conversion en surfaces imperméables (Jobin et collab., 2007).

Fragmentation des habitats par les infrastructures routières

Le développement des activités humaines et l'intensification des usages du sol sont les principales causes de la fragmentation du paysage. Celle-ci se traduit par la perte d'habitats naturels, la dégradation de la qualité ainsi que l'isolement accru des parcelles d'habitat (« patchs », Andren, 1994; Fahrig, 2003). Les infrastructures de transport contribuent fortement à la perte et à la dégradation des habitats naturels (Geneletti, 2003). Les routes sont une des sources principales

de la fragmentation anthropique et sont associées à des pertes de connectivité (Pépino et collab., 2012). Une étude globale aux États-Unis a montré que la présence de routes et de voies ferrées dans les plaines alluviales modifie, à court terme, le régime des crues et à long terme, l'alluvionnement (Blanton et Marcus, 2009). En particulier, la présence des infrastructures de transport dans les plaines alluviales peut avoir des effets directs ou indirects sur les habitats et les espèces aquatiques.

En effet, l'emprise des infrastructures de transport remplace les lieux potentiels d'habitats favorables à diverses espèces (effet direct) et peut aussi avoir un effet sur les habitats adjacents. Ainsi, des travaux effectués à proximité ou sur des zones humides peuvent avoir des conséquences irréversibles en modifiant l'hydraulique du secteur (p. ex., la baisse de la nappe phréatique, l'assèchement de certaines zones humides adjacentes). Au printemps, elles perturbent aussi la connectivité des habitats aquatiques situés entre le fleuve et son littoral (effet indirect; Brodeur et Dumas, 2006; Brodeur et collab., 2004). Le passage d'une route au croisement d'un cours d'eau agit comme une digue ou un barrage, en interrompant les crues et les échanges d'eau, de sédiments et d'organismes vivants (Blanton et Marcus, 2013; Januchowski-Hartley et collab., 2013). La présence de ponceaux de drainage et des infrastructures de traverses de cours d'eau peut rétablir ponctuellement des connexions et faciliter le déplacement des organismes aquatiques. Cependant, s'ils sont mal conçus, en mauvais état ou bloqués, ils nuisent à l'habitat aquatique et à sa productivité (Bourgeois et collab., 2005). Certains ponceaux peuvent créer une chute empêchant le déplacement du poisson ou de la larve (Bouska et Paukert, 2010; Jackson, 2004; Pépino et collab., 2012).

Sur la rive nord du lac Saint-Pierre, l'autoroute 40 et diverses routes régionales et municipales ont été construites directement dans la plaine d'inondation. Pour des raisons d'empiètement important, le secteur de Maskinongé a fait l'objet d'une attention particulière dans la présente étude. La superficie de toutes les emprises routières dans la zone en eau de récurrence 0-100 ans représente 16 km² (figure 1). La construction de l'autoroute 40 a aussi nécessité l'aménagement de 300 ponceaux dans le littoral du lac, dont 102 donnent accès à des zones de reproduction de la perchaude (de la Chenelière et collab., 2014). Les habitats situés au nord de l'autoroute 40, notamment dans des bancs d'emprunts et des fossés, sont des sites privilégiés pour la reproduction, l'alevinage, l'alimentation et le repos de nombreuses espèces de poissons, à condition qu'ils soient connectés au fleuve (Bélangier, 1981; Brodeur et collab., 2014). En 2014, un inventaire préliminaire de ces 102 conduites a révélé qu'au moins 14 ponceaux présentaient une entrave à la libre circulation du poisson (p. ex., la présence d'une chute infranchissable en aval, l'obstruction du ponceau par des débris, un faible diamètre de l'ouvrage; P. Brodeur, comm. pers.). Aux ponceaux de l'autoroute s'ajoutent au moins 350 conduites supplémentaires, situées sur des réseaux routiers municipaux et à l'intérieur de champs agricoles, affichant fréquemment des caractéristiques limitatives pour la libre circulation des poissons.

Objectifs

Afin de compléter le portrait des pressions agissant sur les habitats aquatiques de la plaine d'inondation du lac Saint-Pierre, qui couvrait l'agriculture et la régularisation du débit du fleuve Saint-Laurent, la présente étude évalue et met en perspective les effets du réseau routier sur la connectivité des frayères et des nourriceries du grand brochet. Le premier objectif de ce projet était de cartographier et de quantifier les effets du réseau routier, en particulier ceux de l'autoroute 40, sur la connectivité des frayères et des nourriceries au lac Saint-Pierre. Le deuxième objectif était d'évaluer si le nombre de ponceaux et de ponts est suffisant pour assurer une connectivité optimale entre le lac et la zone littorale de la rive nord.

Les objectifs spécifiques suivants ont été formulés pour comprendre l'influence du réseau routier : a) quantifier les pertes directes d'habitats liées aux infrastructures de transport, b) cartographier et quantifier les habitats de fraie et de nourricerie les plus susceptibles d'être déconnectés par les infrastructures de transport, et c) localiser les zones de la plaine inondable où il serait bénéfique de rétablir la connectivité.

Aire d'étude et méthodes

Cette étude fait partie d'un programme de recherche plus large. Les analyses géomatiques ont été réalisées en utilisant les résultats de plusieurs modélisations spatiales à haute définition des habitats de fraie et de nourriceries (Foubert et collab., 2017a; Mingelbier et collab., 2008). Ces modélisations ont aussi été couplées à des bases de données complémentaires permettant d'analyser spécifiquement l'effet des infrastructures routières sur les habitats des jeunes stades de vie du grand brochet. L'étendue de la zone d'étude pour le lac Saint-Pierre est délimitée par la zone en eau de récurrence 0-100 ans, correspondant à un débit maximal de 20 000 m³.s⁻¹ à Sorel (figure 1).

Modélisation des habitats

Les habitats potentiels de fraie et de nourricerie du brochet ont été simulés pour chaque année de la période 1965-2013. Ces habitats modélisés correspondent à un scénario de plaine d'inondation naturelle appelée ici « plaine d'inondation vierge », car on a exclu volontairement les pertes reliées à l'agriculture et au réseau routier, afin d'en connaître le plein potentiel. Pour les mêmes raisons, les marais aménagés présents dans l'aire d'étude ont aussi été considérés comme milieux naturels. Les potentiels de frayères (Mingelbier et collab., 2008) et de nourriceries (Foubert et collab., 2017a) ont été estimés à l'aide d'indices de qualité d'habitat (IQH) combinant les variables suivantes : le type de végétation, la profondeur, la vitesse du courant et la température. Ces variables sont issues de modèles hydrodynamiques et biologiques, dont les résultats sont exportés sur une grille carrée régulière de mailles de 40 m × 40 m (Mingelbier et collab., 2005). Les valeurs des IQH ont été classées en 4 catégories (0, 1, 2 et 3), reflétant la qualité des habitats. Dans le cadre de cette étude, seules les valeurs d'IQH maximales égales à 3 au moins une fois au cours de la période 1965-2013 ont été conservées, afin de ne considérer que

les meilleurs potentiels d'habitats prioritaires pour la protection et la restauration de l'écosystème. Afin d'établir un lien entre les frayères disponibles et l'accès aux nourriceries, la période étudiée couvrait les 5 premières semaines entre le maximum de fraie (semaine 0; date variable dépendant de la température et calculée selon Mingelbier et collab., 2008) et le début de la période de nourricerie, une semaine après l'éclosion des œufs (semaine 5).

Variabilité hydrologique

Une analyse détaillée des niveaux d'eau (débits) journaliers durant chaque printemps de la période 1965-2013 a permis d'identifier 4 profils hydrologiques représentatifs de la variabilité du fleuve Saint-Laurent, survenus en 1965, 1973, 1983 et 1998, entre la semaine 0 et la semaine 5 (figure 2). L'année 1965 correspond à un niveau d'eau stable (variation $< 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ entre les semaines 0 et 5) et bas durant ces 5 semaines. L'année 1973 correspond à un niveau d'eau stable et haut (la fréquence relative combinée des profils hydrologiques stables hauts et bas correspond à 47 % des années durant la période 1965-2013). Le niveau d'eau de l'année 1983 est moyen au début et augmente ensuite (fréquence relative : 11 %); enfin, celui de 1998 est élevé au début et diminue ensuite (fréquence relative : 42 %).

Sources de données

Infrastructures routières

Les données linéaires et surfaciques d'emprise des routes et de l'autoroute 40 considérées dans l'analyse proviennent du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification et d'Adresses Québec (<http://adressesquebec.gouv.qc.ca>) pour une zone dans les limites d'une inondation de $20000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Sorel. À partir d'un débit de $12000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, les étendues inondées sont visibles au-delà de l'autoroute 40 (figure 3). Pour les routes nationales et locales, une largeur de 10 m a été attribuée permettant les calculs de pertes directes de frayères et de nourriceries modélisées dans le scénario « plaine d'inondation vierge ». Pour les années à fort débit durant la 5^e semaine (1973 et 1983), seules les routes exondées ont été considérées comme barrières au déplacement des larves. Le contour précis des zones inondées a été obtenu

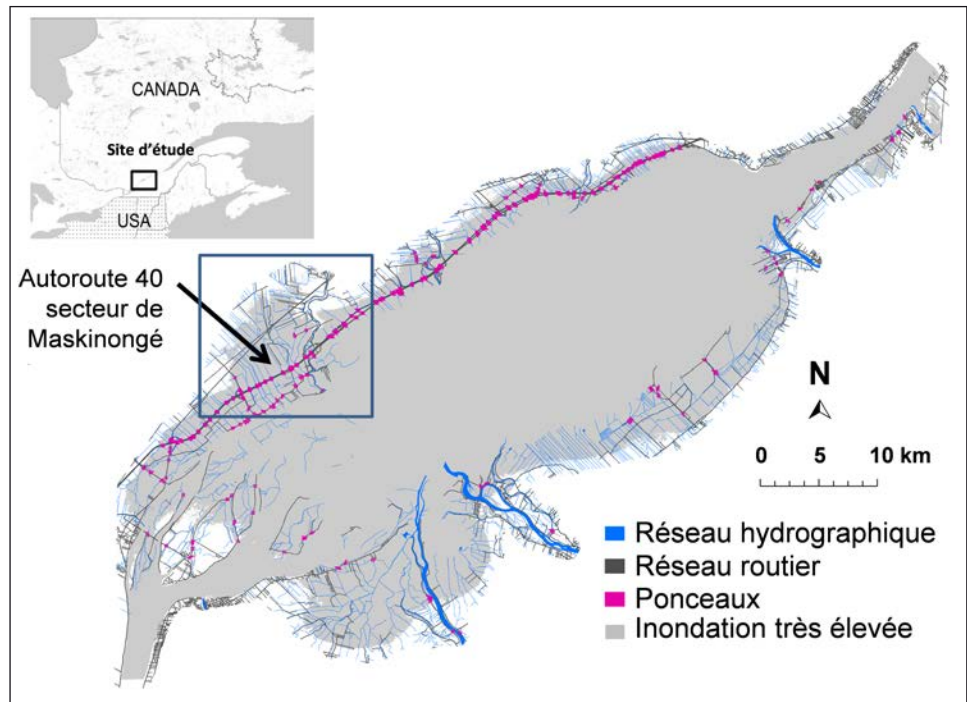


Figure 1. Le lac Saint-Pierre, reconnu internationalement pour ses milieux humides, sa biodiversité et sa productivité, est le plus grand des 3 lacs fluviaux du fleuve Saint-Laurent. La vaste plaine du lac est illustrée ici en gris par une inondation très élevée ($20000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Sorel), correspondant à une période de récurrence supérieure à 1/100 ans (Morin et Bouchard, 2000). Les réseaux hydrographique et routier ainsi que les ponceaux sont représentés. Sur la rive nord, l'autoroute 40 a été construite dans la plaine d'inondation, avec un empiètement particulièrement important dans le secteur de Maskinongé.

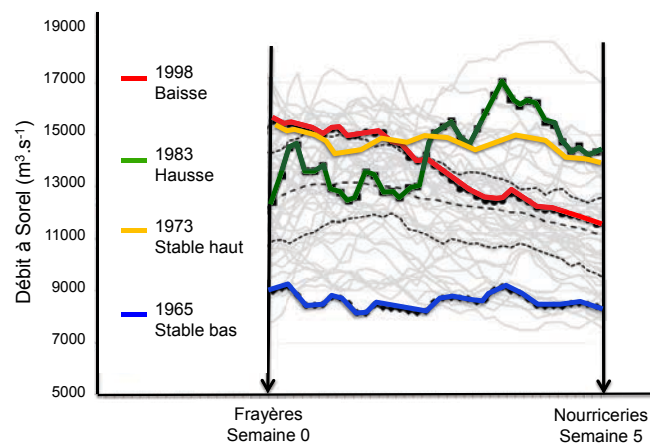


Figure 2. Profils hydrologiques entre les périodes de fraie et de nourricerie (1965-2013, lignes en gris). En pointillé sont représentés la moyenne et les quartiles 25 et 75 %. Quatre profils hydrologiques typiques ont été identifiés en couleur entre le maximum de fraie (semaine 0) et le début de la période de nourricerie (semaine 5) : stable bas et haut (1965 et 1973; fréquence de 47 %), en hausse (1983; 11 %) et en baisse (1998; 42 %). Les fréquences d'apparition (%) de ces profils correspondant à la période contemporaine (1962-2016) incluent la régularisation de la rivière des Outaouais et du fleuve Saint-Laurent. Avant ces régularisations (1883-1910), on n'observait que des situations de hausse (61 %) ou de niveau stable (39 %) entre les semaines 0 et 5.

en utilisant des données complémentaires LIDAR décrivant l'élévation de la plaine d'inondation à une résolution élevée (pixel de 5 m de côté) (Ouellet et collab., 2003).

Réseau hydrographique

La base de données vectorielles du réseau hydrographique provient du Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ, 2015). Elle référence en particulier les ponceaux, dont 110 ont été sélectionnés parce qu'ils sont inclus dans la limite de l'inondation de $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ à Sorel. Nous avons aussi ajouté des connexions vraisemblables sous forme de ponceaux à chaque croisement du réseau hydrographique et des routes, dont certains correspondent à des ponts (P. Brodeur, comm. pers.). Au niveau de l'archipel, le réseau hydrographique a été complété avec des éléments linéaires correspondant au type « ruisseau » dans Richard et collab. (2011). Une largeur fixe de 20 m a été attribuée à chacun des ponceaux, signifiant que l'analyse n'a pas considéré des effets potentiels liés aux caractéristiques des ponceaux (p. ex., le diamètre, la longueur, le type, la pente et l'élévation). Tous les ponceaux ont été considérés comme pleinement opérationnels et non obstrués par des débris ou des sédiments.

Analyse des données

Analyse fréquentielle des habitats du brochet (1965-2013)

Pour chaque maille du modèle, la fréquence annuelle relative (% des années) des valeurs d'IQH = 3 a été calculée sur la période 1965-2013; les valeurs ont ensuite été réparties en 4 classes (< 5%; 5-25%; 25-50%; > 50%) afin d'en visualiser la répartition spatiale des milieux les plus propices pour les poissons et d'en quantifier la proportion. Cette analyse, réalisée séparément pour les frayères et les nourriceries dans une plaine d'inondation « vierge », identifie clairement les milieux possédant les plus forts potentiels.

Évaluation de la connectivité des habitats selon divers scénarios

Le logiciel Anaqualand 2.0 permet d'évaluer la connectivité dans les cours d'eau entre les différentes parcelles d'habitats selon le principe de la modélisation du moindre coût (Le Pichon et collab., 2006; Le Pichon et collab., 2007). Les « distances fonctionnelles » calculées correspondent aux chemins de moindre coût, multipliant pas à pas la « distance géographique » (distance minimale dans les limites du cours d'eau) et la « résistance du milieu » pour laquelle on détermine une valeur dans chaque pixel de l'aire d'étude. Dans la présente étude, ce sont la vitesse du courant (qui peut freiner ou faciliter le déplacement des jeunes larves) et la mortalité des larves par exondation (lorsque le niveau d'eau baisse entre les périodes de fraie et de nourricerie) qui ont servi à générer la carte des résistances (figure 4). En considérant l'ensemble des habitats de l'aire d'étude, il devient possible de calculer la résistance cumulée minimale (RCM) pour atteindre l'habitat cible le plus

proche et de cartographier les probabilités d'atteindre ceux-ci. La probabilité calculée dépend de la mobilité des larves après l'éclosion des œufs, qui a été fixée à 3 000 m dans la plupart des analyses pour obtenir une image du plein potentiel de connectivité dans le lac Saint-Pierre. Cette mobilité tient compte de la distance maximale parcourue pendant la 5^e semaine par une larve entraînée passivement par un faible courant (Foubert et collab., 2017a). Dans le cas particulier des corridors de connectivité (voir la page suivante), ce coefficient de mobilité a été diminué à 150 et 600 m afin de cibler les régions prioritaires à restaurer, permettant de restreindre la largeur des corridors et de connaître plus précisément leurs formes et leur orientation.

Le calcul de connectivité peut se faire des frayères vers les nourriceries et inversement (voir le schéma conceptuel; figure 5). En se posant la question « D'où doit partir une larve pour atteindre une nourricerie ? », on détermine une enveloppe spatiale représentant les frayères qui sont connectées, appelées « frayères effectives ». La question complémentaire suivante, « À partir d'une frayère, jusqu'où une larve peut-elle aller ? », permet de déterminer l'enveloppe spatiale représentant les nourriceries qui sont connectées, appelées « nourriceries effectives ». Ces deux questions permettent de mieux cibler sur le terrain si ce sont des frayères ou bien des nourriceries qui sont limitantes et qu'on doit restaurer. On peut aller plus loin lorsqu'on considère l'intersection entre ces deux enveloppes spatiales, qui fournit les zones où la connectivité est possible dans les deux sens et qu'on appelle « corridors de connectivité ». Ces corridors représentent des accès privilégiés pour les larves et donc, des priorités de conservation.

Le scénario « plaine d'inondation vierge » correspond au plein potentiel d'habitat sans les effets de l'agriculture, du réseau hydrographique et du réseau routier. Les mesures de connectivité ont été calculées entre les frayères et les nourriceries pour les 4 profils hydrologiques types : stable (1965, 1973), en hausse (1983) et en baisse (1998). La carte de résistance/facilitation du milieu au déplacement des larves lors de la 5^e semaine a été définie en fonction des vitesses de courant correspondant à cette période, ainsi que les zones asséchées entre le maximum de fraie et la période de nourricerie. Les valeurs de résistance vers l'amont et vers l'aval ont été attribuées selon la méthode de Foubert et collab. (2017a). Une résistance maximale a été attribuée pour les vitesses du courant $> 12\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (mortelle pour les larves; Peake, 2004) et pour les habitats asséchés au cours des 5 semaines étudiées. Les vitesses d'écoulement inférieures à $12\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ facilitent les déplacements vers l'aval; les mouvements potentiels des larves vers l'amont ont été autorisés seulement pour la classe $0-2\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ comme sur la figure 4.

Le scénario « réseau routier seul » vise à estimer les pertes directes des emprises routières ainsi que la fragmentation reliée aux routes. Ce scénario utilise les habitats modélisés pour le scénario « plaine d'inondation vierge » moins ceux qui se trouvent sur l'emprise des routes. La carte de résistance est comparable et intègre les routes, qui prennent une valeur de résistance élevée (10 000) induisant une barrière physique infranchissable. Lorsque les routes étaient inondées

à la 5^e semaine, elles n'ont pas été considérées comme une barrière à la connectivité.

Le scénario « ponceaux et réseau hydrographique » est une variante du scénario « réseau routier seul » qui inclut le réseau hydrographique et les ponceaux dans la carte des résistances (figure 4). Le réseau hydrographique est considéré comme neutre vis-à-vis des déplacements amont et aval (valeur = 1). Alors que les déplacements dans les ponceaux sont 2 fois plus difficiles (valeur = 2).

Pertes directes par les routes, frayères et nourriceries effectives et corridors de connectivité

Les infrastructures routières ont été superposées aux habitats modélisés permettant l'analyse des superficies d'habitats potentiels remplacés par des routes. L'analyse des pertes directes liées au réseau routier porte sur les 4 années particulières étudiées. Les cartes montrant d'où doivent partir les larves pour atteindre une nourricerie ont été combinées aux frayères pour identifier les frayères effectives (figure 5) pour les 3 scénarios. De la même façon, les cartes montrant où les larves peuvent aller en partant d'une frayère ont été combinées aux nourriceries pour identifier les nourriceries effectives pour les 3 scénarios. Celles-ci ont été comparées, pour évaluer spatialement et quantitativement l'effet des divers scénarios sur la connectivité. Enfin, des corridors de connectivité ont été calculés en superposant les cartes d'où doivent partir les larves pour atteindre une nourricerie et les cartes où les larves peuvent aller en partant d'une frayère.

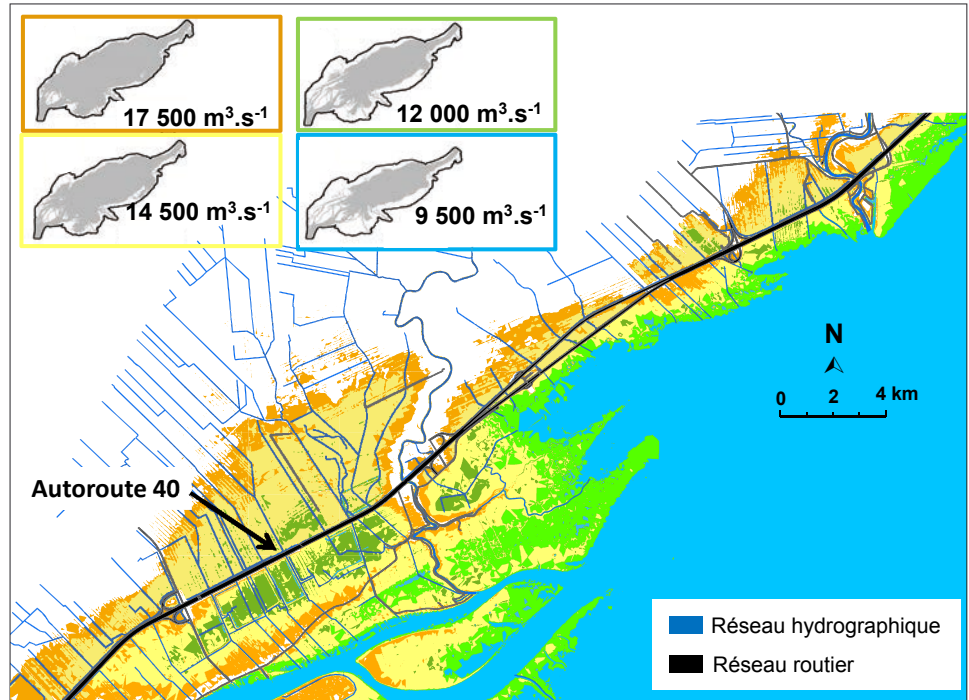


Figure 3. Étendue de l'inondation au lac Saint-Pierre en fonction du débit variant de 9 500 à 17 500 m³.s⁻¹, avec un détail du secteur de Maskinongé (figure 1). Les couleurs associées à chaque débit correspondent à celles de la carte détaillée. Les effets du réseau routier sont perceptibles lorsque le débit à Sorel dépasse 12 000 m³.s⁻¹. Les réseaux hydrographique et routier sont représentés.

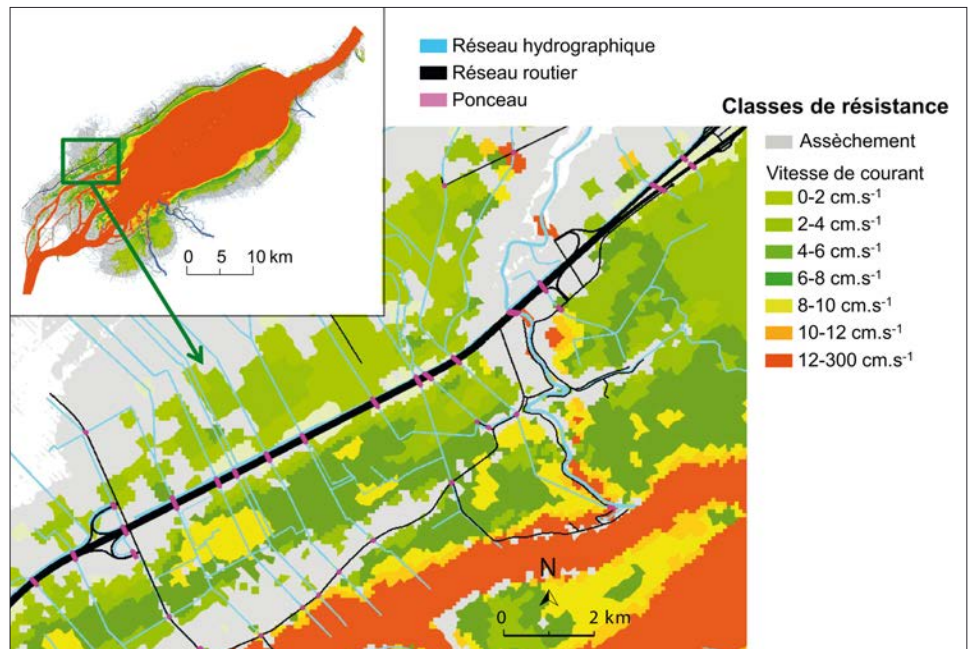


Figure 4. Carte des classes de résistance au cours des 5 semaines de développement des larves du grand brochet, exemple de l'année 1983. L'assèchement pendant cette période correspond à une valeur maximale de résistance, car il entraîne la mort des larves. La vitesse du courant pendant la 5^e semaine (les larves deviennent mobiles) est répartie en plusieurs classes: les faibles valeurs facilitent le déplacement des larves (0-12 cm.s⁻¹), et les plus élevées entraînent leur mortalité (>12 cm.s⁻¹). Les réseaux hydrographique et routier ainsi que les ponceaux sont représentés.

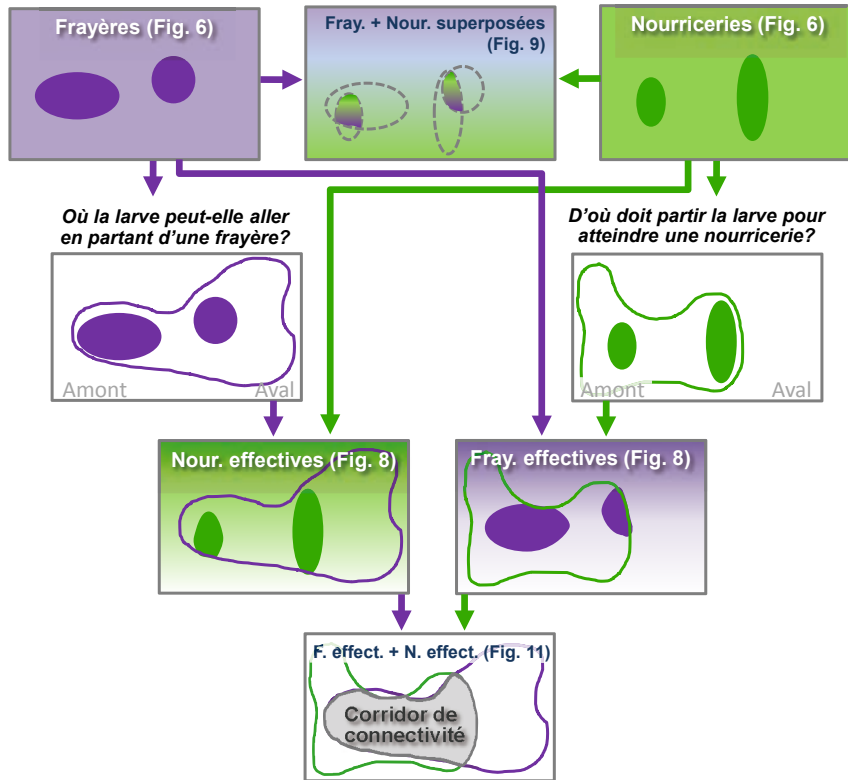


Figure 5. Schéma conceptuel présentant les étapes des analyses de connectivité, produisant les cartes des frayères et nourriceries superposées, des frayères effectives, des nourriceries effectives et des corridors de connectivité.

Résultats et discussion

Détermination des meilleurs habitats de fraie et de nourricerie

Les cartes des meilleures frayères potentielles et des meilleures nourriceries potentielles pour chaque année de la période 1965-2013 constituent les données de bases de l'étude. Les analyses fréquentielles effectuées séparément sur les 2 types d'habitats ont identifié les secteurs qui sont le plus souvent favorables à la fraie ou à la nourricerie compte tenu de la topographie du lac et de la variabilité hydrologique observée durant la période d'étude (figure 6). On constate que les frayères et les nourriceries les plus fréquentes sont réparties de façon variable autour du lac et qu'elles sont présentes de part et d'autre de l'autoroute 40. On voit aussi que les deux types d'habitats ne sont pas concentrés aux mêmes lieux et qu'ils ne présentent pas la même stabilité temporelle : les frayères apparaissent plus fréquemment aux mêmes endroits (25 % de la superficie potentielle des frayères sont situées plus d'une année sur deux aux mêmes endroits), alors que les surfaces couvertes par les nourriceries sont un peu plus étendues mais avec des fréquences plus faibles que les frayères (tous les habitats de nourriceries sont situés moins d'une année sur deux aux mêmes lieux). Ces cartes, représentant la fréquence des meilleurs habitats, pourraient être très utiles pour guider les priorités de conservation, de restauration ou d'aménagement faunique.

Pertes directes reliées au réseau routier

La superficie totale des emprises routières dans la plaine inondable du lac Saint-Pierre (récurrence 0-100 ans; figure 1) est de 1 607 ha. Pour les 4 années étudiées, les superficies perdues à cause des emprises routières varient de 2 à 143 ha, selon le régime hydrologique (tableau 1). Les pertes d'habitats potentiels sont faibles les années où le débit est faible, car les emprises routières commencent à être inondées lorsque le débit à Sorel dépasse $12\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui correspond à une récurrence comprise entre 1 et 2 ans (Morin et Bouchard, 2000). Plus précisément, lorsque l'on considère l'ensemble des profils hydrologiques de la période 1965-2013, des frayères ou des nourriceries peuvent être perdues à cause de l'emprise du réseau routier pour les trois quarts des années.

À ces pertes directes liées aux emprises du réseau routier peuvent s'ajouter des pertes non quantifiées dans cette étude sur les habitats potentiels adjacents. En particulier, lors de la phase de chantier, le surcreusement et la déstructuration des sols causés par

le passage des engins transforment les bords de route et modifient l'hydrologie du secteur. Ces modifications favorisent l'implantation des espèces envahissantes, à laquelle s'ajoute la perturbation du couvert végétal lors des fauches. À ces effets pérennes s'ajoutent des nuisances découlant de l'utilisation du réseau routier, en particulier les émissions polluantes (p. ex., les particules, les huiles, le sel) qui peuvent influencer la qualité des habitats adjacents.

Tableau 1. Superficie des meilleurs habitats (IQH = 3) perdus directement à cause des emprises routières pour les 4 profils hydrologiques typiques. Les débits à Sorel ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) sont documentés pour décrire la dynamique hydrologique des 4 années types.

Profils hydrologiques	Frayères perdues		Nourriceries perdues	
	Débit ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Superficie (ha)	Débit ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Superficie (ha)
1965: stable basse	8 315	2	8 455	7
1973: stable haute	14 853	118	14 920	103
1983: hausse	12 021	13	14 905	143
1998: baisse	15 296	142	11 532	6

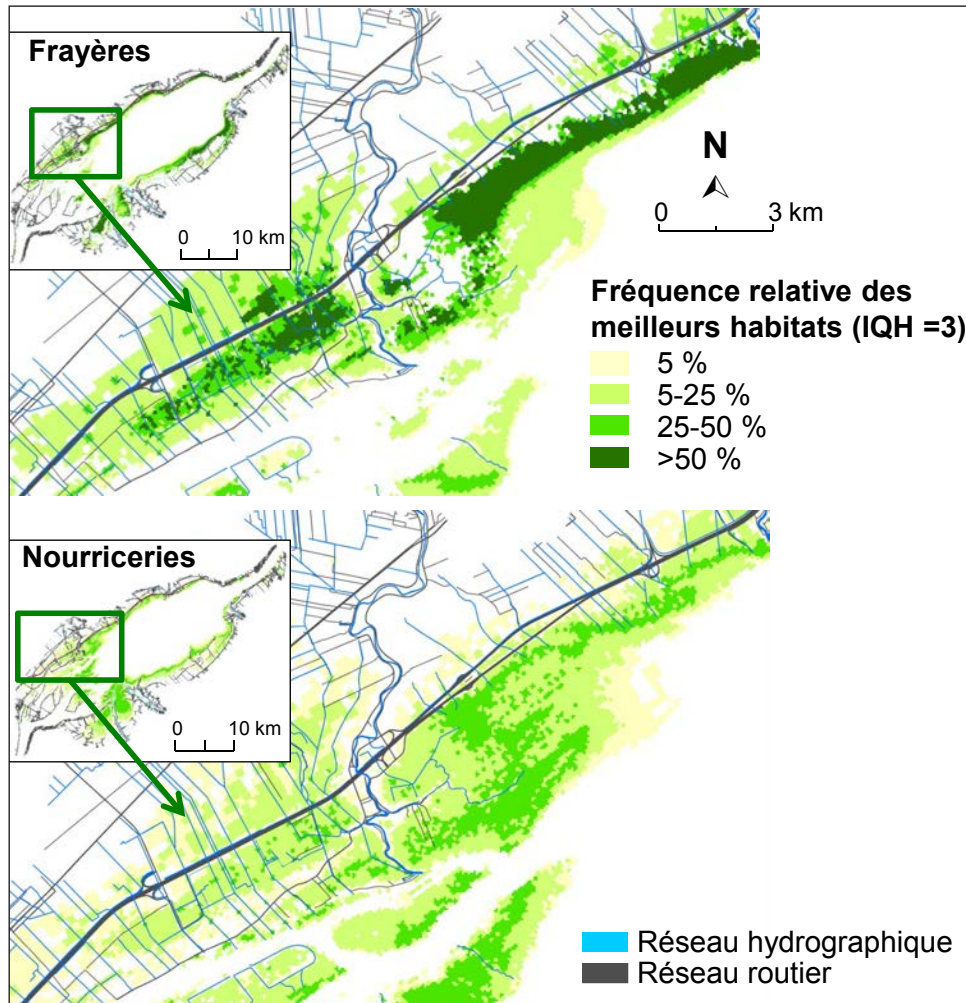


Figure 6. Carte de la fréquence relative des frayères et des nourriceries de bonne qualité (IQH = 3) pour la période 1965-2013. Les meilleures frayères apparaissent fréquemment aux mêmes lieux, contrairement aux meilleures nourriceries qui sont réparties sur un plus large territoire. Les réseaux hydrographique et routier sont représentés.

Connectivité des habitats

Les superficies de frayères et de nourriceries effectives varient en fonction des profils hydrologiques et des scénarios (figure 7). De plus, la proportion des habitats effectifs par rapport aux superficies des habitats potentiels varie selon les années. Les années où le niveau d'eau est stable, plus de 80 % des habitats potentiels sont connectés alors que les années instables, l'un ou les deux habitats potentiels sont connectés à moins de 80 % (seulement 30 % pour les frayères en 1998). La situation la plus favorable pour la reproduction du brochet dans le lac Saint-Pierre est représentée par l'année de niveau d'eau haut et stable (1973) avec une proportion importante de frayères et de nourriceries effectives par rapport aux frayères et aux nourriceries potentielles. L'année de niveau d'eau bas et stable (1965) est la seule qui présente plus de nourriceries effectives. Les hausses et les baisses de débit durant la période critique provoquent des situations contrastées : en situation de hausse (1983), les surfaces de frayères effectives sont majoritaires,

alors qu'on observe l'inverse en situation de baisse (1998). L'analyse de sensibilité de Foubert et collab. (2017a) a montré que l'augmentation de la mobilité des larves améliore la connectivité, qui atteint un plateau à 3 000 mètres fonctionnels; en dessous de 600 mètres fonctionnels, la connectivité des habitats diminue fortement. Cette analyse met l'accent sur l'importance de la dispersion des larves par de faibles courants dans la connexion des frayères et des nourriceries dans ce vaste lac fluvial. À titre indicatif et sans disposer d'une base de comparaison calibrée et validée sur le terrain, les résultats de la présente étude suggèrent que la mobilité potentielle des larves dans le lac Saint-Pierre pourrait être 5 fois plus grande que celle des larves provenant de lacs non fluviaux (Cucherousset et collab., 2009; Skov et collab., 2011). Cette différence est vraisemblablement attribuable au courant.

Les routes seules affectent surtout les nourriceries effectives en situation de fort débit (hausse : 1983 ou stabilité : 1973) (figure 7), en lien avec l'emplacement des habitats et des routes à ces débits dans la plaine alluviale (figure 3). Les

frayères subissent des effets légers lors des années de niveau d'eau stable (1965 et 1973); dans le premier cas, c'est le réseau routier secondaire qui est concerné; dans le second, ce sont principalement des pertes directes (tableau 1). L'effet des routes sur la déconnexion des nourriceries en 1983 est surtout marqué sur la rive nord du lac, en particulier tout le long de l'autoroute 40, alors que la rive sud n'est que très peu concernée (figure 8). Sur cette figure, on remarque les frayères et les nourriceries qui sont effectives et qui correspondent à des secteurs prioritaires à conserver ou à restaurer. De manière plus générale, l'effet des routes peut être plus important lorsque le régime hydrologique génère des frayères et des nourriceries situées de part et d'autre de l'autoroute 40, c'est-à-dire lorsque le débit à l'une des 2 périodes est supérieur à $12\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

La comparaison des 3 scénarios pour les 4 années types permet d'évaluer les facteurs influençant la connectivité des frayères et des nourriceries et d'identifier plusieurs catégories d'habitats (figure 9). Certains habitats ne sont jamais connectés, quel que soit le scénario, et correspondent donc à des habitats

asséchés ou qui se retrouvent isolés du réseau hydrographique. La quantité de nourriceries toujours isolées est comparable pour les années de niveau d'eau stable (730-760 ha), d'une part, et pour les années de niveau d'eau instable (1 120-1 480 ha), d'autre part. Concernant les frayères toujours isolées, l'amplitude de variation est forte: de 107 ha (4%) pour l'année de niveau d'eau stable (1965) à 4 700 ha (70%) l'année de débit décroissant (1998). À l'opposé, d'autres habitats sont toujours connectés, parmi lesquels on trouve les régions où les frayères et les nourriceries sont superposées. Cette superposition des frayères et des nourriceries est maximale pour les années de niveau d'eau stable (1 500 ha). Lors des années de niveau d'eau instable, selon le sens et l'ampleur de la variation du débit, on a pu en observer de 0,9 ha en 1983 à 480 ha en 1998. Ces zones de superposition favorisent la survie et la croissance des larves et contribuent au succès de reproduction des espèces qui exploitent le haut des plaines inondables (Schiemer et collab., 2001). Ainsi, ces habitats superposés et connectés pour tous les scénarios sont ceux qu'il faudrait préserver en priorité.

Pour toutes les années, on note un effet positif du réseau hydrographique permanent et des ponceaux, permettant la reconnexion des habitats qui étaient isolés par l'assèchement de la plaine alluviale au cours des premières semaines (de 10 à 870 ha, en bleu sur la figure 9). Cet effet positif est surtout observé en 1983 pour les nourriceries, car la hausse du débit distribue les frayères en deçà de l'autoroute 40 alors que les nourriceries sont au-delà de celle-ci. Cela est d'autant plus crucial que c'est une année où quasiment aucun des habitats ne se superposait. De même, on observe un gain de 500 ha de frayères effectives en 1998, année pour laquelle de nombreux habitats se trouvaient déconnectés du fait de la baisse de débit et de l'assèchement de la plaine alluviale. Des pêches réalisées en amont de certains ponceaux situés dans la plaine inondable du lac Saint-Pierre, notamment sous l'autoroute 40, démontrent que les poissons comme le grand brochet utilisent ces structures pour accéder aux habitats de reproduction et d'alimentation (Brodeur et collab., 2014; Brodeur et Auclair, 2016). Cette observation confirme l'importance d'un réseau hydrographique fonctionnel dans les divers types de paysages agricoles pour connecter les habitats et soutenir la biodiversité (Clarke, 2015; Herzon et Helenius, 2008; Washitani, 2007). Dans quelques secteurs le long de l'autoroute et de routes secondaires (surfaces en rouge, figure 10), la déconnexion des nourriceries persiste même en présence du réseau hydrographique et des ponceaux. Une étude plus locale permettrait d'identifier les possibilités d'ajouter des ponceaux et de restaurer ainsi leur connexion à des frayères. Il faut aussi rappeler que dans cette étude, on présume que tous les ponceaux existants et théoriques sont parfaitement opérationnels. Or, une inspection sur le terrain faite en 2015 pour la perchaude indiquait qu'environ 10 % des ponceaux limitaient totalement ou partiellement la libre circulation des poissons (P. Brodeur, comm. pers.). Cela signifie que les résultats de la présente étude surestiment la connectivité, et qu'avant d'installer de nouveaux ponceaux, il serait nécessaire de remettre en fonction ceux qui sont actuellement défectueux.

La carte des corridors de connectivité est présentée pour l'année 1983 (débit en hausse) pour le scénario « ponceaux et réseau hydrographique » (figure 11). Dans cet exemple, on peut visualiser les secteurs qui permettent de connecter les frayères et les nourriceries en fonction de deux coefficients de mobilité, soit 150 et 600 mètres fonctionnels. Le secteur détaillé de la rive nord permet de visualiser l'effet direct du réseau hydrographique (cours d'eau et fossés) et des ponceaux qui contribuent à former des corridors linéaires essentiels à la connectivité des habitats. Compte tenu de l'influence de l'hydrologie sur ces corridors de connectivité, il serait très utile, dans des études futures, de produire des cartes représentant la fréquence d'apparition de ces corridors et d'identifier les secteurs prioritaires à conserver ou à restaurer.

Comparaison avec d'autres pressions et pistes de solutions

En terminant, il nous apparaît pertinent de comparer les effets du réseau routier sur les habitats de reproduction des poissons utilisant la plaine d'inondation du lac Saint-Pierre au regard des pratiques agricoles intensives et de la régularisation du débit du système Saint-Laurent. Nous proposons des pistes de solutions afin d'alléger les pressions reliées au réseau routier et au régime hydrologique. Les pistes concrètes de restauration des habitats, soit par des aménagements fauniques, soit par le développement de pratiques agricoles compatibles avec les besoins des poissons, sont présentées dans Foubert et collab. (2017b) et dans la fiche synthèse produite par la Table de concertation régionale du lac Saint-Pierre (TCRLSP, 2017).

La présente étude a mis en évidence que le réseau routier engendre des effets négatifs sur l'habitat de reproduction du grand brochet lorsque le débit à Sorel dépasse $12\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui arrive très souvent au printemps (1-2 ans; Morin et Bouchard, 2000). Ces effets sont presque exclusivement confinés à la portion nord-ouest du lac Saint-Pierre et se traduisent par des pertes directes d'habitats atteignant des superficies maximales de l'ordre de 143 ha (pour les 4 années étudiées). Il en résulte des pertes de connectivité entre les frayères et les nourriceries, particulièrement lorsque celles-ci se trouvent de part et d'autre des routes (superficie maximale de 39 ha pour les 4 années étudiées). Dans une étude sur la reproduction du grand brochet au lac Saint-Pierre, on indique qu'en débit stable haut (1973; 1 des 4 années étudiées ici), environ 1 400 ha de frayères connectées aux nourriceries ont été perdus à cause des pratiques agricoles dans la plaine d'inondation; ces fortes pertes d'habitats surviennent principalement lorsque le débit à Sorel est supérieur à $14\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Foubert et collab., 2017a). Récemment, dans une étude concernant l'habitat de reproduction de la perchaude, une autre espèce indicatrice utilisant la plaine d'inondation, de la Chenelière et collab. (2014) ont estimé que 5 000 ha des meilleurs habitats printaniers de la perchaude étaient inutilisables pour la reproduction, principalement à cause des pratiques agricoles. Pour mettre ces chiffres en perspective, il s'agit donc de pertes d'habitats dont les superficies sont de 10 à 35 fois plus grandes

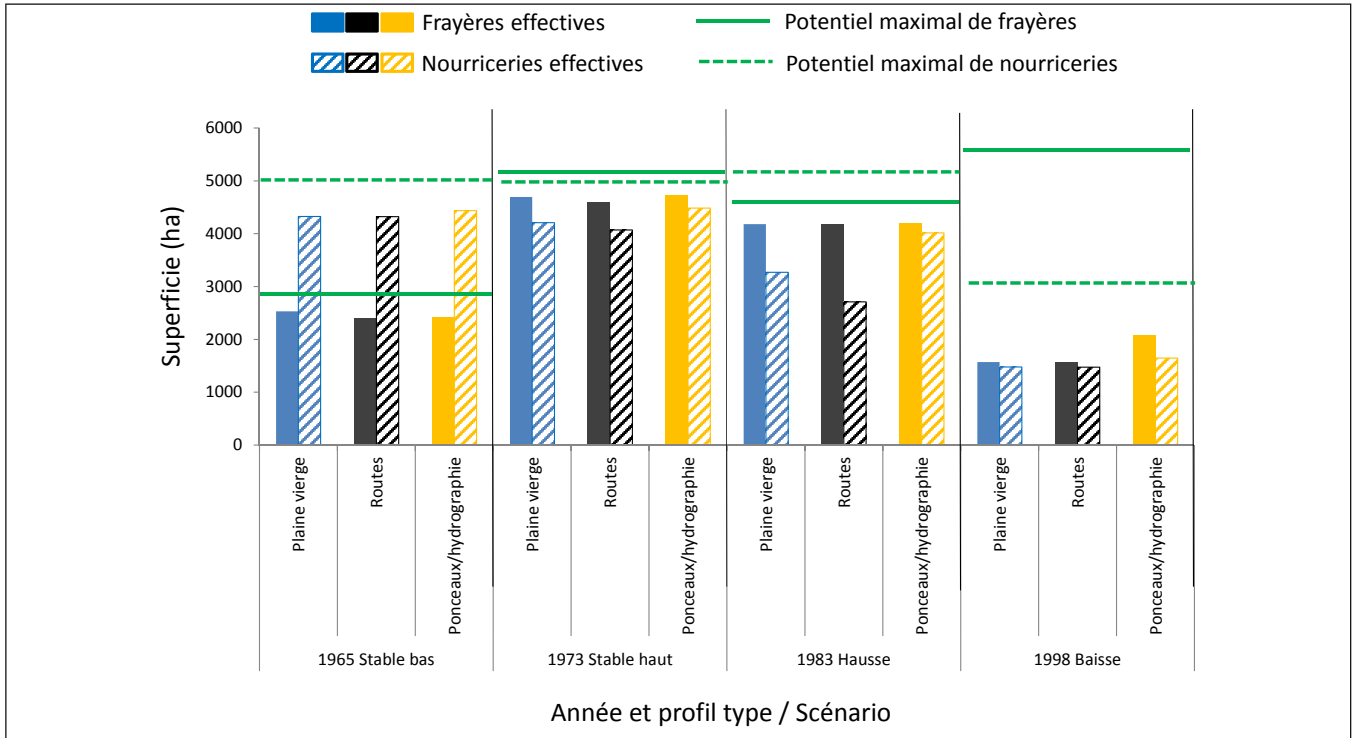


Figure 7. Superficie des frayères effectives et des nurseries effectives en fonction des 3 scénarios: « plaine d'inondation vierge » (dans la figure: plaine vierge), « réseau routier seul » (routes) et « ponceaux et réseau hydrographique » (ponceaux/hydrographie). La dynamique hydrologique est décrite pour les 4 profils types. Les superficies potentielles maximales des frayères (trait plein vert) et des nurseries (trait pointillé vert) sont représentées pour chaque année, donnant une base de comparaison pour les 3 scénarios.

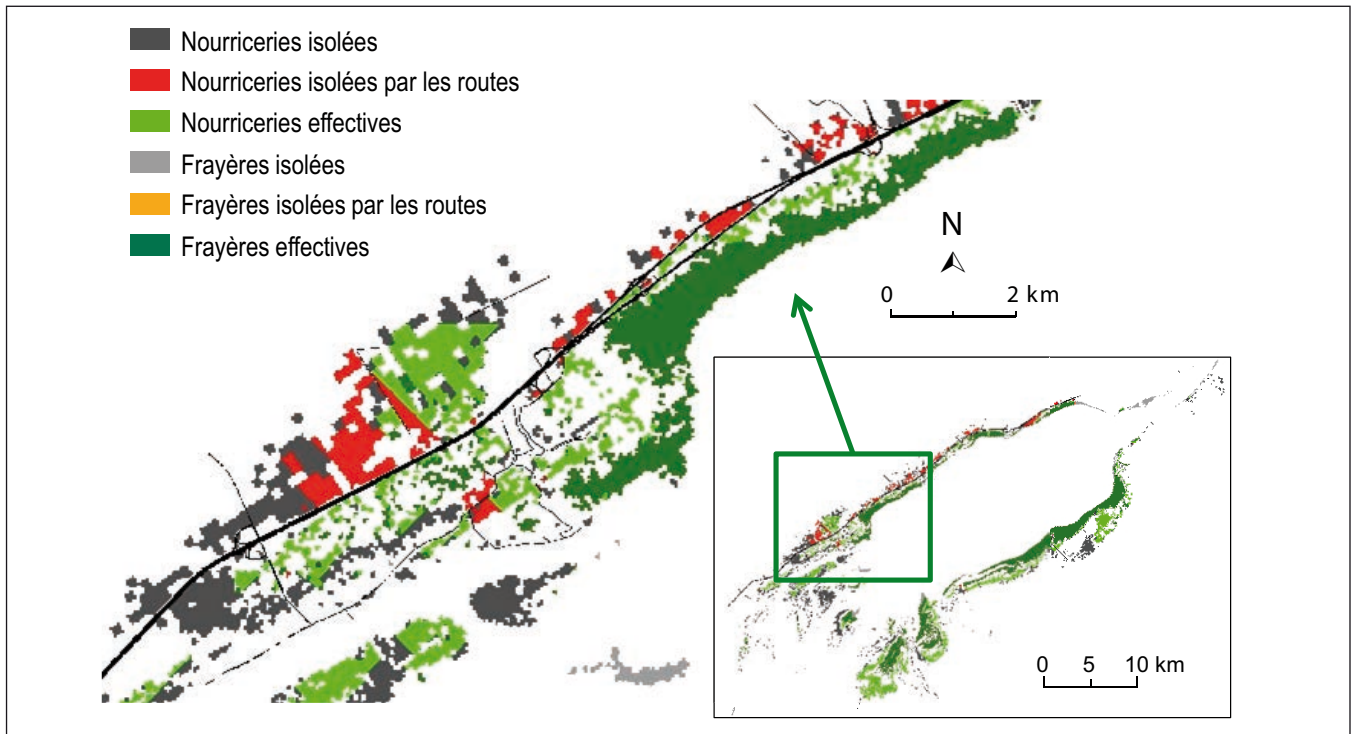


Figure 8. Illustration du scénario « réseau routier seul » pour l'année 1983 (débit en hausse). Les habitats isolés dans le scénario « plaine d'inondation vierge », les habitats isolés par les routes et les habitats effectifs sont représentés. N. B. À cette échelle de représentation et pour cette année en particulier, la carte ne montre aucune frayère isolée par les routes.

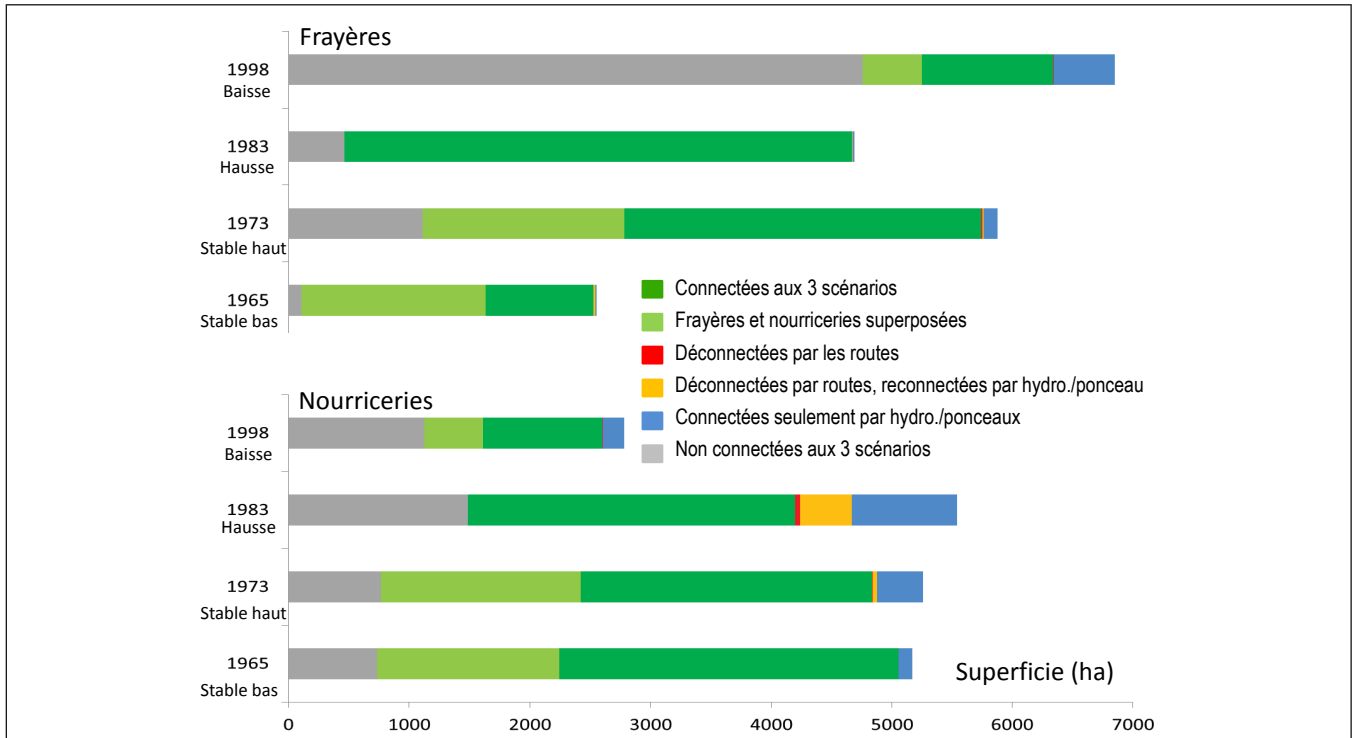


Figure 9. Superficie des frayères et des nourriceries effectives intégrant les 3 scénarios « plaine d'inondation vierge », « réseau routier seul » et « ponceaux et réseau hydrographique » pour chacun des 4 profils hydrologiques types.

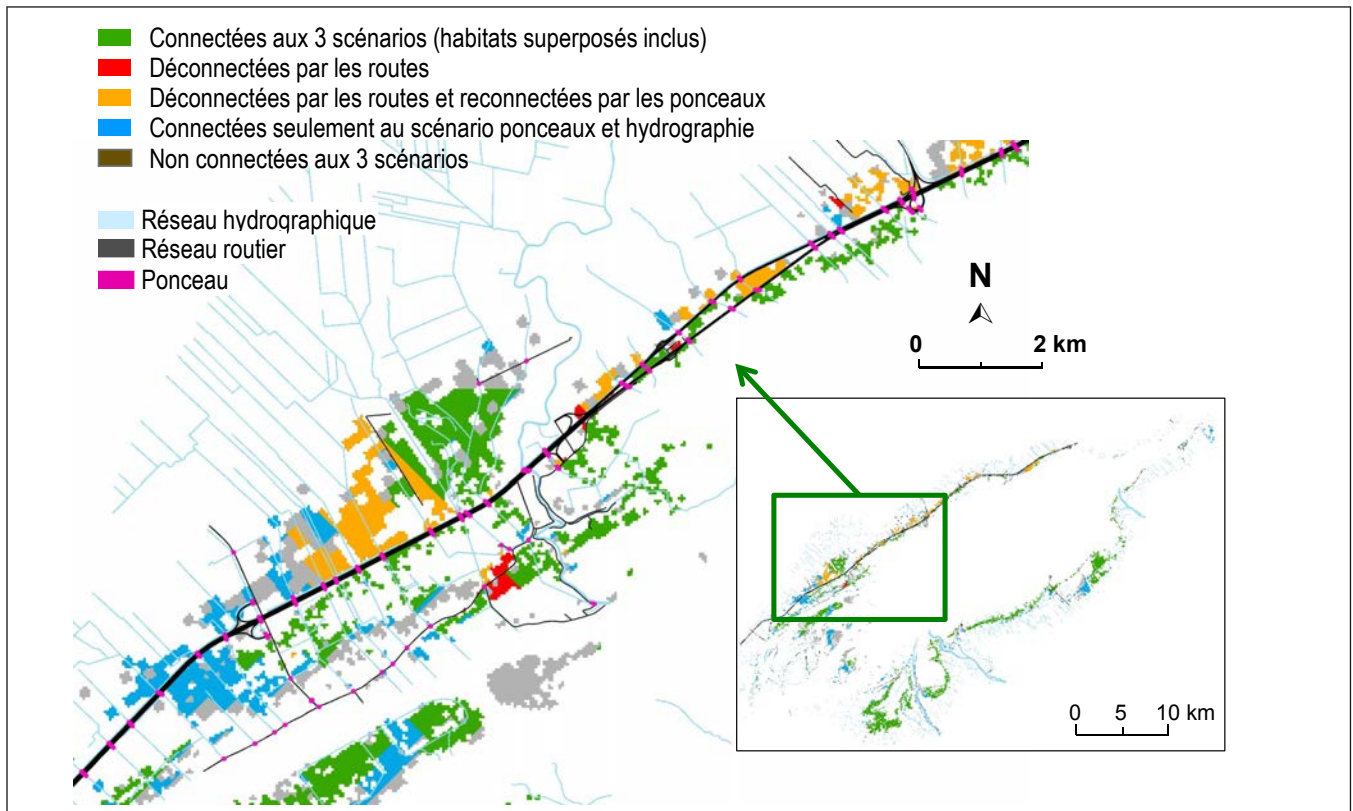


Figure 10. Carte des nourriceries effectives en 1983 (débit en hausse) intégrant les 3 scénarios « plaine d'inondation vierge », « réseau routier seul » et « ponceaux et réseau hydrographique ». Les réseaux hydrographique et routier ainsi que les ponceaux sont représentés.

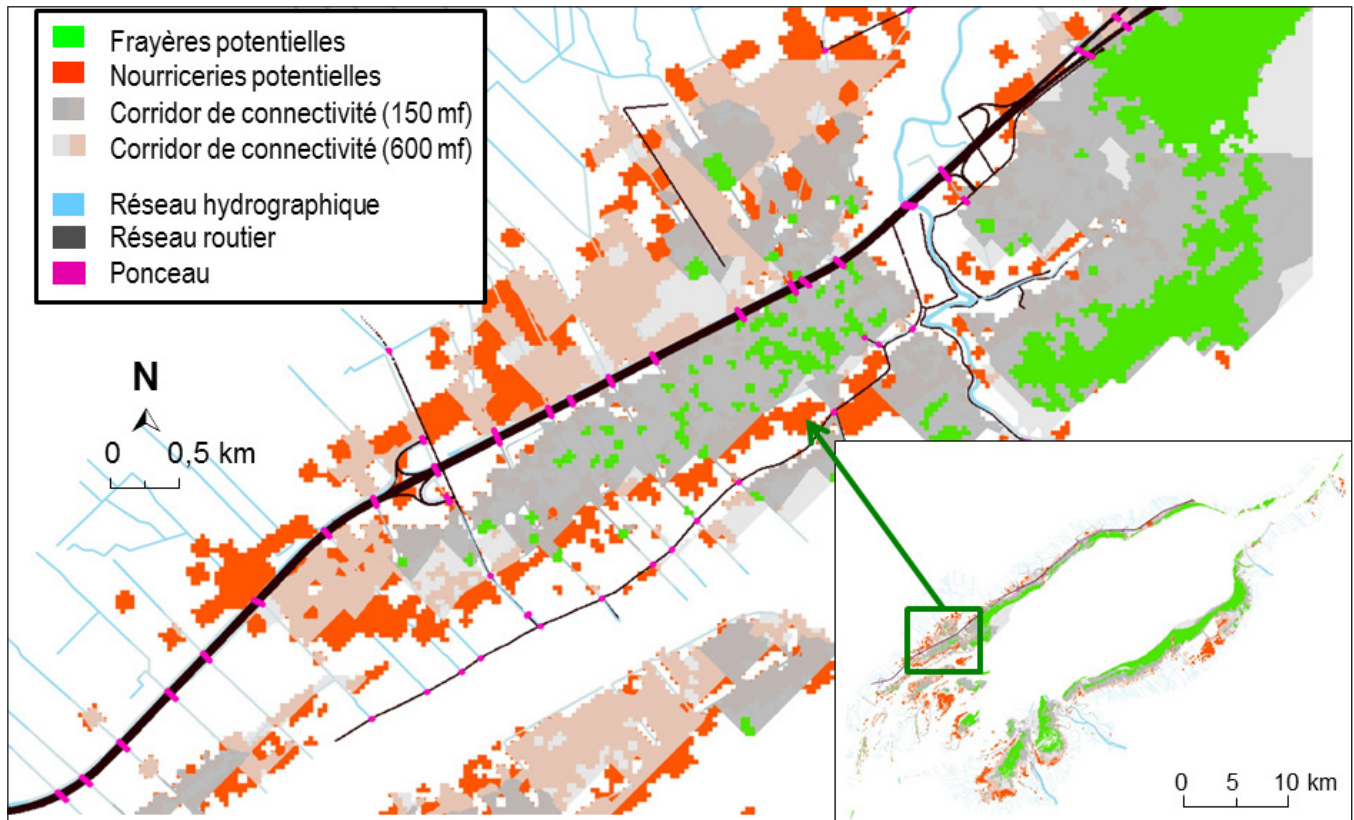


Figure 11. Exemple de corridors de connectivité en 1983 (débit en hausse) pour le scénario «ponceaux et réseau hydrographique». Le gris foncé représente les zones de corridors pour une mobilité de 150 mètres fonctionnels; le gris clair et l'orange clair (superposition du gris clair sur l'orange) représentent les corridors pour une mobilité de 600 mètres fonctionnels. Le réseau routier et les ponceaux sont aussi représentés.

que celles occasionnées par le réseau routier. Bien que les effets du réseau routier apparaissent relativement faibles, il faut se rappeler que ces milieux aquatiques cumulent déjà de nombreuses pressions. Les surfaces d'habitats perdus estimées dans cette étude représentent les meilleurs potentiels pour la reproduction (valeur maximale des IQH), et la connectivité des habitats des premiers stades de vie est cruciale. Toute action visant leur restauration ne peut avoir que des effets bénéfiques sur les espèces qui utilisent la plaine d'inondation. Les fortes productions observées dans les marais aménagés pour les poissons en témoignent (Tardif et collab., 2005).

L'entretien et le remplacement de ponceaux afin d'assurer leur bon fonctionnement (éviter de percher les ponceaux s'ils doivent être remplacés), l'ajout de ponceaux pour améliorer la connectivité, ainsi que la cartographie des corridors de connectivité sont des outils d'aide à la décision et des pistes concrètes de restauration à explorer. Les gains associés à la réfection des ponceaux ont été documentés au lac Saint-Pierre (p. ex., Marais Saint-Eugène; Brodeur et Auclair, 2016) et d'autres secteurs d'intervention ont été suggérés tels que l'Île du Milieu et des sites endigués comme celui du cours d'eau Cloutier-Lefrançois, à Louiseville (Brodeur et Dumas, 2006; de la Chenelière et collab., 2014; TCRLSP, 2017).

Concernant la régularisation des débits du système Saint-Laurent, une analyse sommaire des débits hebdomadaires du fleuve Saint-Laurent et de la rivière des

Outaouais (obtenus à partir de Marceau et Morin, 2008 et Morin et Bouchard, 2000) révèle que des changements importants sont survenus durant la période critique entre le 15 avril (fraie \approx semaine 0) et le 21 mai (nourricerie \approx semaine 5). Avant la régularisation du débit de la rivière des Outaouais (1883-1910), seuls des profils hydrologiques en hausse (61 %) ou stables (39 %) étaient observés. Depuis la régularisation (1962-2016), la fréquence des profils hydrologiques en hausse est de 11 %, celle des débits stables est de 47 % et celle des baisses, de 42 %. Conséquemment, la hauteur moyenne de la crue à Sorel est maintenant plus basse d'environ 0,75 m et sa durée, plus courte d'environ 3 semaines. Il va sans dire que ces modifications ont encore aujourd'hui des répercussions majeures sur la quantité d'habitats disponibles durant la crue printanière, leur connectivité et l'assèchement des œufs. Pour faire un lien avec le réseau routier, il apparaît donc que si le régime hydrologique était naturel (c'est-à-dire non régularisé), l'effet négatif des routes serait certainement plus important. Il en serait de même pour les effets négatifs des pratiques agricoles.

Si le plan de régularisation de la rivière des Outaouais était révisé tel qu'il l'a été pour le système Lac Ontario-Saint-Laurent, il serait certainement bénéfique d'ajuster les débits aux fins de la restauration et de la conservation des habitats et du fleuve Saint-Laurent. Une solution qui mériterait d'être étudiée consisterait à s'assurer que les régions déjà concernées

par la crue soient inondées d'une façon stable suffisamment longtemps (30-40 jours) pour augmenter la superposition des frayères et des nourriceries, assurer le développement des larves et limiter l'assèchement des œufs. Par ailleurs, il y a fort à parier que les changements climatiques contribueront aussi à modifier le régime hydrologique, notamment en avançant la crue printanière et en augmentant le débit hivernal (Boyer et collab., 2010; CEHQ, 2015; Mortsch et collab., 2000;).

Dans leur conclusion, Foubert et collab. (2017b) indiquent que la combinaison de l'agriculture et de l'altération du régime hydrologique ont conduit à une réduction générale du potentiel de production du lac Saint-Pierre, créant une situation paradoxale. En effet, les forts débits d'eau sont maintenant associés à un potentiel de production inférieur à celui des débits faibles. Alors que les habitats de reproduction générés lors des faibles crues sont presque tous fonctionnels et efficaces pour favoriser la survie des larves, ceux générés lors des fortes crues sont perdus à cause d'une baisse trop rapide du débit ou en raison des pratiques agricoles actuelles qui détruisent le substrat végétal. Depuis que le débit de la rivière des Outaouais est régularisé, une telle situation est beaucoup plus fréquente dans le fleuve Saint-Laurent.

Conclusion

En ajoutant les effets du réseau routier, cette étude élargit l'analyse des pressions dans la plaine d'inondation du lac Saint-Pierre. Les résultats soulignent que le réseau routier qui se trouve dans la plaine d'inondation a des répercussions négatives sur les habitats de reproduction des poissons tels que le grand brochet lorsque le débit à Sorel dépasse $12\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Au lac Saint-Pierre, ces répercussions sont particulièrement observables dans la portion nord-ouest, là où l'autoroute 40 et certaines routes municipales empiètent sur les habitats aquatiques. Sur la rive nord du lac Saint-Pierre, les résultats surestiment la connectivité, car potentiellement 10 % des ponceaux ne sont pas pleinement fonctionnels et devraient être entretenus ou aménagés. Dans l'étude, on identifie des corridors de connectivité, connexions privilégiées à double sens entre les frayères et les nourriceries effectives. Ils constituent des milieux prioritaires à protéger ou à restaurer, car ils sont essentiels pour les premiers stades de vie des poissons. Il apparaît que les répercussions du réseau routier, bien qu'elles soient moindres que celles provoquées par les pratiques agricoles intensives ou encore par la régularisation du débit, demeurent non négligeables. Les outils d'aide à la décision et les pistes concrètes de solutions proposées ici mériteraient d'être intégrés à un plan global d'interventions au lac Saint-Pierre pour la conservation et la restauration de ces importants milieux aquatiques.

Remerciements

La présente étude est le fruit d'une collaboration initiée en 2012 par CLP et MM dans le cadre de la 64^e session de la Commission permanente de coopération Franco-Québécoise (CPCFQ), entre l'actuel ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) et l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA, Anthony, Paris, France), dont le titre était « Intégration de la

connectivité hydraulique et biologique dans la modélisation des habitats fonctionnels des poissons ». Nous remercions la CPCFQ qui a financé plusieurs missions en France et au Québec. Nous remercions l'IRSTEA et le MFFP qui ont financé cette étude et ont accueilli les auteurs dans leurs bureaux lors de ces échanges. Le Plan Saint-Laurent a aussi contribué au financement de ce travail. Nous adressons nos remerciements aux éditeurs et à trois réviseurs anonymes pour leurs commentaires constructifs qui ont amélioré la qualité et la clarté du manuscrit. ◀

Références

- ANDRÉN, H., 1994. Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos*, 71 (3): 355-366. doi: 10.2307/3545823.
- ARMELLIN, A., 2004. Importances des facteurs hydrologiques et climatiques dans la détermination des classes d'âge du grand brochet (*Esox lucius* L.) du Saint-Laurent. Rapport produit pour la Commission mixte internationale par Environnement Canada-Région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent. Rapport scientifique et technique, 47 p.
- BÉLANGER, L., 1981. Utilisation des bancs d'emprunts de la rive Nord du lac Saint-Pierre par la faune ichtyologique. Université du Québec à Trois-Rivières, Rapport technique, 60 p. + annexes.
- BLANTON, P. et W.A. MARCUS, 2009. Railroads, roads and lateral disconnection in the river landscapes of the continental United States. *Geomorphology*, 112: 212-227. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.06.008.
- BLANTON, P. et W.A. MARCUS, 2013. Transportation infrastructure, river confinement, and impacts on floodplain and channel habitat, Yakima and Chehalis rivers, Washington, U.S.A. *Geomorphology*, 189: 55-65. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.01.016.
- BOURGEOIS, L., D. KNEESHAW et G. BOISSEAU, 2005. Les routes forestières au Québec: Les impacts environnementaux, sociaux et économiques. *VertigO*, 6 (2): 1-9.
- BOUSKA, W.W. et C.P. PAUKERT, 2010. Road crossing designs and their impact on fish assemblages of Great Plains streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, 139 (1): 214-222. doi: 10.1577/T09-040.1.
- BOYER, C., P.M. VERHAAR, A.G. ROY, P.M. BIRON et J. MORIN, 2010. Impacts of environmental changes on the hydrology and sedimentary processes at the confluence of St. Lawrence tributaries: Potential effects on fluvial ecosystems. *Hydrobiologia*, 647: 163-183. doi: 10.1007/s10750-009-9927-1.
- BRODEUR, P. et N. AUCLAIR, 2016. Restauration du marais Saint-Eugène, suivi environnemental – année 2. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la gestion de la faune de la Mauricie et du Centre-du-Québec, Trois-Rivières, 59 p. + annexes.
- BRODEUR, P. et R. DUMAS, 2006. Utilisation de trois voies d'accès par les poissons au marais de l'Île du Milieu; recommandations visant la réfection du ponceau de la route 158. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction de l'aménagement de la Mauricie et Centre-du-Québec, Direction de l'aménagement de Lanaudière, Trois-Rivières, 16 p.
- BRODEUR, P., M. MINGELBIER et J. MORIN, 2004. Impacts des variations hydrologiques sur les poissons des marais aménagés le long du Saint-Laurent fluvial. *Le Naturaliste canadien*, 128 (2): 66-77.
- BRODEUR, P., R. BACON et M. THÉBERGE, 2014. Acquisition de connaissances pour minimiser l'impact de l'agriculture sur l'écosystème du littoral du lac Saint-Pierre – volet agriculture-faune. Rapport d'opération 2014. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Directions de la gestion de la faune de la Mauricie et du Centre-du-Québec et de Lanaudière et des Laurentides, Trois-Rivières, 19 p. + annexes.
- [CEHQ] CENTRE D'EXPERTISE HYDRIQUE DU QUÉBEC, 2015. Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 81 p.
- CLARKE, S.J., 2015. Conserving freshwater biodiversity: The value, status and management of high quality ditch systems. *Journal for Nature Conservation* 24 (2015) 93-100.

- [CRHQ] CADRE DE RÉFÉRENCE HYDROLOGIQUE DU QUÉBEC, guide de l'utilisateur 2015. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale de l'écologie et de la conservation, Québec, 34 p.
- CUCHEROUSSET, J., J.M. PAILLISSON, A. CUZOL et J.M. ROUSSEL, 2009. Spatial behaviour of young-of-the-year northern pike (*Esox lucius* L.) in a temporarily flooded nursery area. *Ecology of Freshwater Fish*, 18: 314-322. doi: 10.1111/j.1600-0633.2008.00349.x.
- DAUPHIN, D. et B. JOBIN, 2016. Changement de l'occupation du sol dans la plaine inondable du lac Saint-Pierre entre 1950 et 1997. *Le Naturaliste canadien*, 140 (1): 42-52. doi: 10.7202/1034097ar.
- DE LA CHENELIÈRE, V., P. BRODEUR et M. MINGELBIER, 2014. Restauration des habitats du lac Saint-Pierre: un prérequis au rétablissement de la perchaude. *Le Naturaliste canadien*, 138 (2): 50-61. doi: 10.7202/1025070ar.
- FAHRIG, L., 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34: 487-515. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419.
- FOUBERT, A., C. LE PICHON, F. LECOMTE, J.M. FARRELL, J. MORIN et M. MINGELBIER, 2017a. The many facets of connectivity: modeling the effective spawning and nursery habitats within a large spatio-temporally variable river landscape (St. Lawrence River, Canada). Thèse de doctorat Aline Foubert, 2017. Caractérisation de l'organisation des communautés de poissons et de leurs habitats dans le fleuve Saint-Laurent (Canada) en vue d'en améliorer la gestion, chapitre 2, Université du Québec à Chicoutimi, 183 p.
- FOUBERT, A., M. MINGELBIER, P. BRODEUR, C. LE PICHON et F. LECOMTE, 2017b. Effective fish spawning habitats in anthropised floodplain ecosystems: the paradox of the most productive years. Thèse de doctorat Aline Foubert, 2017. Caractérisation de l'organisation des communautés de poissons et de leurs habitats dans le fleuve Saint-Laurent (Canada) en vue d'en améliorer la gestion, chapitre 3, Université du Québec à Chicoutimi, 183 p.
- GENELETTI, D., 2003. Biodiversity impact assessment of roads: An approach based on ecosystem rarity. *Environmental Impact Assessment Review*, 23: 343-365. doi: 10.1016/S0195-9255(02)00099-9.
- HERZON, I. et J. HELENIUS, 2008. Agricultural drainage ditches, their biological importance and functioning. *Biological conservation*, 141: 1171-1183. doi: 10.1016/j.biocon.2008.03.005.
- HUDON, C., A. ARMELLIN, P. GAGNON et A. PATOINE, 2009. Variations in water temperatures and levels in the St. Lawrence River (Québec, Canada) and potential implications for three common fish species. *Hydrobiologia*, 647: 145-161. doi: 10.1007/s10750-009-9922-6.
- JACKSON, S.D., 2004. Design and construction of aquatic organism passage at road-stream crossings: Ecological considerations in the design of river and stream crossings. *Proceedings of the 2003 International Conference on Ecology and Transportation*. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh, p. 20-29.
- JANUCHOWSKI-HARTLEY, S.R., P.B. MCINTYRE, M. DIEBEL, P.J. DORAN, D.M. INFANTE, C. JOSEPH et J.D. ALLAN, 2013. Restoring aquatic ecosystem connectivity requires expanding inventories of both dams and road crossings. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11 (4): 211-217. doi: 10.1890/120168.
- JOBIN, B., C. LATENDRESSE, C. MAISONNEUVE, A. SEBBANE et M. GRENIER, 2007. Changements de l'occupation du sol du sud du Québec pour la période 1993-2001. Série de rapports techniques n° 483, Environnement Canada, Service canadien de la faune, région du Québec, Québec, 112 p. + annexes.
- LATENDRESSE, C., B. JOBIN, C. MAISONNEUVE, A. SEBBANE et M. GRENIER, 2008. Changements de l'occupation du sol dans le Québec méridional entre 1993 et 2001. *Le Naturaliste canadien*, 132 (1): 14-23. doi: 10.7202/1034097ar.
- LE PICHON, C., G. GORGES, T. FAURE et H. BOUSSARD, 2006. Anaqualand 2.0: Freeware of distances calculations with frictions on a corridor. *Irstea - Antony*; <https://www6.rennes.inra.fr/sad/Outils-Produits/Outils-informatiques/Anaqualand>.
- LE PICHON C., G. GORGES, J. BAUDRY, H. BOUSSARD, F. GOREAUD, T. FAURE, et P. BOËT, 2007. Méthodes et outils d'analyse spatiale des habitats des poissons en contexte fluvial anthropisé. *Ingénieries – EAT*, 50: 21-33.
- MAGNAN, P., P. BRODEUR, É. PAQUIN, N. VACHON, Y. PARADIS, P. DUMONT et Y. MAILHOT, 2017. État du stock de perchaudes du lac Saint-Pierre en 2016. Comité scientifique sur la gestion de la perchaude du lac Saint-Pierre. Chaire de recherche du Canada en écologie des eaux douces, Université du Québec à Trois-Rivières et ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Trois-Rivières, vii + 34 p. + annexes.
- MARCEAU, E. et J. MORIN, 2008. Reconstitution des débits de la rivière des Outaouais à Grenville : période 1882 à 1960. Rapport Technique RT-142, Service Météorologique du Canada, Environnement Canada, Sainte-Foy, 29 p. + annexes.
- [MDDEFP] MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA FAUNE ET DES PARCS, 2013. Le lac Saint-Pierre: un joyau à restaurer. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 28 p.
- MINGELBIER M., P. BRODEUR et J. MORIN, 2005. Recommandations concernant les poissons et leurs habitats dans le Saint-Laurent fluvial et évaluation des critères de régularisation du système lac Ontario-Saint-Laurent. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche sur la faune, Québec, 141 p.
- MINGELBIER, M., P. BRODEUR et J. MORIN, 2008. Spatially explicit model predicting the spawning habitat and early stage mortality of Northern pike (*Esox lucius*) in a large system: The St. Lawrence River between 1960 and 2000. *Hydrobiologia*, 601 (1): 55-69. doi: 10.1007/s10750-007-9266-z.
- MORIN, J. et A. BOUCHARD, 2000. Les bases de la modélisation du tronçon Montréal/Trois-Rivières. Rapport scientifique SMC-Hydrrométrie RS-100. Environnement Canada, Sainte-Foy, 56 p.
- MORIN, J. et J.-P. CÔTÉ, 2003. Modifications anthropiques sur 150 ans au lac Saint-Pierre: une fenêtre sur les transformations de l'écosystème du Saint-Laurent. *Vertigo*, 4 (3): 1-10.
- MORTSCH, L., H. HENGEVELD, M. LISTER, L. WENGER, B. LOFGREN, F. QUINN et M. SLIVITZKY, 2000. Climate change impacts on the hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence system. *Canadian Water Resources Journal*, 25: 153-179. doi: 10.4296/cwrj2502153.
- OUELLET, V., J. MORIN, O. CHAMPOUX et S. MARTIN, 2003. Validation des données LIDAR du tronçon Montréal/Trois-Rivières, pour la modélisation de la végétation émergente. Note technique RT-130, Service Météorologique du Canada, Environnement Canada, Sainte-Foy, 25 p.
- PEAKE, S., 2004. Effect of approach velocity on impingement of juvenile Northern pike at water intake screens. *North American Journal of Fisheries Management*, 24: 390-396. doi: 10.1577/M02-010.1.
- PÉPINO, M., M.A. RODRIGUEZ et P. MAGNAN, 2012. Impacts of highway crossings on density of brook charr in streams. *Journal of Applied Ecology*, 49 (2): 395-403. doi: 10.1111/j.1365-2664.2012.02108.x.
- RICHARD, G., D. CÔTÉ, M. MINGELBIER, B. JOBIN, J. MORIN et P. BRODEUR, 2011. Utilisation du sol dans la plaine inondable du lac Saint-Pierre (fleuve Saint-Laurent) durant les périodes 1950, 1964 et 1997: interprétation de photos aériennes, numérisation et préparation d'une base de données géoréférencées. Rapport technique préparé pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune et Environnement Canada, Gouvernement du Québec, Québec, 42 p.
- SCHIEMER, F., H. KECKEIS, W. RECKENDORFER et G. WINKLER, 2001. The "inshore retention concept" and its significance for large rivers. *River Systems*, 12 (2-4): 509-516. doi: 10.1127/lr/12/2001/509.
- SKOV, C., A. KOED, L. BAASTRUP-SPOHR et R. ARLINGHAUS, 2011. Dispersal, growth, and diet of stocked and wild northern pike fry in a shallow natural lake, with implications for the management of stocking programs. *North American Journal of Fisheries Management*, 31 (6): 1177-1186. doi: 10.1080/02755947.2011.646452.
- TARDIF, D., H. GLÉMET, P. BRODEUR et M. MINGELBIER, 2005. RNA/DNA ratio and total length of yellow perch (*Perca flavescens*) in managed and natural wetlands of a large fluvial lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62: 2211-2218. doi: 10.1139/f05-137.
- [TCRLSP] TABLE DE CONCERTATION RÉGIONALE DU LAC SAINT-PIERRE, 2017. Cohabitation agriculture-faune en zone littorale au lac Saint-Pierre. Fiche Synthèse, Trois-Rivières, 28 p. + annexes.
- VILLENEUVE, S., 2001. Les répercussions environnementales de la navigation commerciale sur le Saint-Laurent. *Le Naturaliste canadien*, 125 (2): 49-67.
- WASHITANI, I., 2007. Restoration of biologically-diverse floodplain wetlands including paddy fields. *Global Environmental Research*, 11: 135-140.
- WILCOX, B.A. et D.D. MURPHY, 1985. Conservation strategy, the effects of fragmentation on extinction. *The American Naturalist*, 125 (6): 879-887. doi: 10.1086/284386.