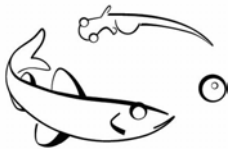


Chaire de recherche
sur les espèces
aquatiques exploitées

Documentation de la chronologie et de la dynamique de montaison des espèces fréquentant la passe migratoire Vianney-Legendre de 2007 à 2019

Anna-Ève Lafrenière, Marc-Antoine Couillard, Nathalie Vachon,
Daniel Hatin, Olivier Morissette



UQAC

**Chaire de recherche sur les espèces
aquatiques exploitées (CREAE)**
Université du Québec à Chicoutimi

Référence à citer :

Lafrenière, A.-È., Couillard, M.-A., Vachon, N., Hatin D. et Morissette, O. (2024). Documentation de la chronologie et de la dynamique de montaison des espèces fréquentant la passe migratoire Vianney-Legendre de 2007 à 2019. Chaire de recherche sur les espèces aquatiques exploitées. Université du Québec à Chicoutimi.

Rapport de recherche

Chaire de recherche
sur les espèces
aquatiques exploitées

Université du Québec à Chicoutimi

**Documentation de la chronologie et de la dynamique de montaison des
espèces fréquentant la passe migratoire Vianney-Legendre de 2007 à
2019**

Anna-Ève Lafrenière, Marc-Antoine Couillard, Nathalie Vachon, Daniel Hatin,
Olivier Morissette

En partenariat avec :



Département des sciences fondamentales
Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, G7H 2B1

NOTES SUR LES AUTEURS

Anna-Ève Lafrenière est étudiante en biologie sous la supervision d'Olivier Morissette. Les travaux rassemblés dans ce rapport ont été menés dans le cadre du projet de fin d'études du baccalauréat en biologie de l'Université du Québec à Chicoutimi. Elle débute présentement une maîtrise en ressources renouvelables.

Marc-Antoine Couillard est biologiste au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, à la Direction principale de l'expertise sur la faune aquatique. Il coordonne le dossier des espèces aquatiques en situation précaire.

Nathalie Vachon est biologiste au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs à la Direction de la gestion de la faune de l'Estrie, de Montréal, de la Montérégie et de Laval. Elle chargée de projet de la reproduction assistée du chevalier cuirré, répondante du Réseau suivi ichtyologique du fleuve Saint-Laurent et des espèces aquatiques exotiques et envahissantes.

Daniel Hatin est biologiste au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs à la Direction de la gestion de la faune de l'Estrie, de Montréal, de la Montérégie et de Laval. Il est responsable de la gestion des espèces de poissons d'intérêt sportif et commercial, de la gestion des barrages et de la connectivité des habitats aquatiques.

Olivier Morissette est professeur au département des sciences fondamentales de l'Université du Québec à Chicoutimi. Il est cotitulaire de la Chaire de recherche sur les espèces aquatiques exploitées.

REMERCIEMENTS

Anna-Ève Lafrenière tient à remercier son superviseur, Olivier Morissette, pour son indéniable dévouement dans la réussite de ce projet, que ce soit par ses judicieux conseils ou par sa disponibilité. Elle le remercie également d'avoir eu la gentillesse de croire en elle.

Elle remercie aussi Nathalie Vachon, biologiste en faune aquatique au MELCCFP, de l'avoir si bien accueillie lors de sa visite à la passe migratoire Vianney-Legendre et Daniel Hatin, également biologiste en faune aquatique au MELCCFP, pour son implication dans le projet. Elle les remercie également d'avoir accepté de lui confier les données sur lesquelles ce projet est basé. Elle remercie aussi Marc-Antoine Couillard, biologiste en faune aquatique au MELCCFP, sans qui ce projet n'aurait pas été possible. Elle les remercie tous pour leur assiduité irréfutable lors des rencontres, en plus de leurs judicieux conseils qui lui ont permis de cheminer et de se surpasser.

RÉSUMÉ

La perte de connectivité dans les milieux naturels peut entraîner des conséquences sévères et irréversibles sur des écosystèmes entiers, affectant de manière importante les espèces qui s’y trouvent. Afin de pallier la fragmentation de l’habitat engendrée par la construction du barrage de Saint-Ours, sur la rivière Richelieu, et assurer la libre circulation des poissons, une passe migratoire multiespèces fut construite en aval du barrage en 2001. Celle-ci assure l’accessibilité à des sites de reproduction et d’alimentation primordiale dans le cycle de vie de nombreuses espèces, dont plusieurs sont à statut ou en situation précaire. Depuis le début d’opération de la passe migratoire Vianney-Legendre, une diminution du nombre de captures et d’espèces semble toutefois avoir été observée, laissant croire à une possible défaillance de celle-ci. L’objectif de cette étude est donc d’évaluer la dynamique de montaison des espèces fréquentant la passe migratoire Vianney-Legendre, en plus de tester l’influence de variables environnementales sur la communauté d’espèces de la passe. Une diminution significative du nombre de captures et d’espèces a bel et bien été mesurée entre le début et la fin des travaux. Durant cette même période, un changement dans la communauté d’espèces, influencé par les variables environnementales, a également été analysé. Ces résultats confirment que l’efficacité de la passe migratoire Vianney-Legendre est influencée par les variables environnementales, en plus de témoigner une possible défaillance de celle-ci, en raison de la diminution de l’effectif des populations qui a été recensée depuis le début des travaux.

TABLE DES MATIÈRES

NOTES SUR LES AUTEURS.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES ANNEXES.....	vii
INTRODUCTION	9
MATÉRIEL ET MÉTHODES	12
Site d'étude	12
Collecte de données	12
Traitement des données.....	13
Analyse statistique	14
RÉSULTATS	16
DISCUSSION	25
Constats sur les données de capture	25
Suggestions	29
CONCLUSION.....	32
RÉFÉRENCES.....	33
ANNEXES	37

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Nombre moyen de captures par unité d'effort (CPUE) total et richesse spécifique totale recensés dans la cage, par heure et en fonction des années d'opération de la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre, sur la rivière Richelieu. 17
- Figure 2 : Nombre moyen de captures de barbue de rivière (*Ictalurus punctatus*), de chevalier blanc (*Moxostoma anisurum*), de chevalier de rivière (*Moxostoma carinatum*) et de chevalier rouge (*Moxostoma macrolepidotum*), par unité d'effort (heure), en fonction des années d'opération de la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre, sur la rivière Richelieu. 18
- Figure 3 : Nombre de degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC) en fonction de la date, pour les dix années d'inventaire (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019), en plus de l'étendue de la période d'échantillonnage réalisée (début et fin) pour chaque année..... 19
- Figure 4 : Nombre total de captures par unité d'effort (CPUE) par heure, en fonction du nombre de degrés-jour de croissance au-dessus de 5° Celsius (DJC) recensé dans la passe migratoire Vianney-Legendre pour les années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019)..... 20
- Figure 5 : Abondance des espèces les plus communes de la base de données, la barbue de rivière (*Ictalurus punctatus*), le chevalier blanc (*Moxostoma anisurum*), le chevalier de rivière (*Moxostoma carinatum*) et le chevalier rouge (*Moxostoma macrolepidotum*) en fonction des degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC) recensés dans la passe migratoire Vianney-Legendre, pour les années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019)..... 21
- Figure 6 : Analyse de redondance (RDA) de type 2, montrant l'influence des cinq variables environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC)) sur la communauté d'espèces (transformation de Hellinger) recensée dans la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre, au cours des années. 23

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Nombre d'individus par espèce recensés dans la passe migratoire Vianney-Legendre, pour les années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019), incluant leur abondance relative (%) et le code de l'espèce.	16
--	----

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Liste des espèces de poisson exclues de la banque de données de la passe migratoire Vianney-Legendre en raison de leur taille.	38
Annexe 2 : Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) effectuée sur le nombre de captures par unité d'effort (CPUE) effectué dans la passe migratoire Vianney-Legendre et en fonction des années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).	39
Annexe 3 : Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) effectuée sur le nombre d'espèces capturé dans la passe migratoire Vianney-Legendre et en fonction des années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).	40
Annexe 4 : Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du nombre de captures par unité d'effort (CPUE), par heure, pour chacune des quatre espèces majoritaires de l'échantillonnage (ICPU, MOAN, MOCA et MOMA) capturées dans la passe migratoire Vianney-Legendre lors des années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).	41
Annexe 5 : Périodes d'opération de la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre (début et fin) associées à la valeur des degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC), en fonction des années.	42
Annexe 6 : Résultats de l'analyse post-hoc Tukey HSD issue d'une analyse de variance (ANOVA) de l'abondance des espèces en fonction des degrés-jour de croissance au-dessus de 5° Celsius (DJC) pour les années d'opération de la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).	43
Annexe 7 : Résultats de l'analyse de variance multivariée (MANOVA) montrant les effets des conditions environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et DJC au-dessus de 5° Celsius) sur le taux de captures par unité d'effort (CPUE) recensé par heure dans la cage de capture de la passe migratoire Vianney-Legendre pour la période d'échantillonnage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).	44
Annexe 8 : Résultats de l'analyse de variance multivariée (MANOVA) montrant les effets des conditions environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et DJC au-dessus de 5° Celsius) sur la richesse spécifique recensée par heure dans la cage de capture de la passe migratoire Vianney-Legendre pour la période d'échantillonnage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).	45
Annexe 9 : Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) montrant la significativité des cinq variables environnementales utilisées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC)) dans l'analyse de redondance (RDA) de type 2.	46
Annexe 10 : Résultats de l'analyse multivariée permutationnelle de la variance (PERMANOVA) montrant l'effet de la période (2007 à 2012 et 2013 à 2019) et des cinq variables environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC)) sur la communauté d'espèces recensée dans la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre pour la période d'inventaire (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).	47
Annexe 11 : Résultats de l'analyse de variance multivariée (MANOVA) montrant les effets des conditions environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et DJC au-dessus de 5° Celsius) et de la période (2007 à 2012 et 2013 à 2019) sur	

le nombre de captures par unité d'effort (heure) recensé dans la cage de capture de la passe migratoire Vianney-Legendre pour la période d'échantillonnage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).....	48
--	----

INTRODUCTION

La perte et la fragmentation des milieux naturels sont des phénomènes omniprésents et en croissance partout sur le globe, affectant tous les types de biotopes (Fuller et coll. 2015 ; Rahel et McLaughlin 2020). Dans les systèmes fluviaux, les conséquences liées à la fragmentation de l'habitat sont multiples et vont de la diminution du nombre d'habitats de reproduction disponibles, à l'augmentation du risque d'extinction des espèces locales (Pelicie et Agostinho 2008 ; Fuller et coll. 2015). Au cours des dernières décennies, près de 30 espèces se seraient éteintes, en raison de l'altération de leur habitat, de l'introduction de nouvelles espèces, de la pollution et de la surexploitation (Miller et coll. 1989). Les barrages et les digues peuvent facilement constituer des obstacles infranchissables pour les espèces aquatiques, les empêchant d'accéder à des sites primordiaux dans leur cycle de vie et contribuant ainsi à la fragmentation de l'habitat (Pelicie et Agostinho 2008). Toutefois, la construction de ces ouvrages ne semble pas être en diminution (Chen et coll. 2016).

Dès la moitié du XIX^e siècle, un premier barrage-écluse fut construit sur la rivière Richelieu, à la hauteur de la ville de Saint-Ours. La rivière Richelieu est le tributaire le plus important de la rive sud du fleuve Saint-Laurent, où elle s'y jette à la hauteur de Sorel-Tracy (Simoneau et Thibault 2009). D'une longueur de 124 km, elle représente une voie de navigation importante entre le fleuve Saint-Laurent et sa source, le lac Champlain, qui est bordé par les états du Vermont et de New York (Thiem et coll. 2012). Depuis l'édification de cette première écluse, faite de caissons de bois remplis de roches, en 1849, plusieurs modifications y ont été apportées, dont sa reconstruction en 1933 et en 1967 (Dumont et coll. 1997).

D'une longueur de 180 m, le barrage actuel de Saint-Ours, construit en 1967, traverse la rivière Richelieu et relie le village de Saint-Roch-de-Richelieu à l'île Darvard. Il sert à maintenir, par l'entremise de ses portes mobiles, un niveau d'eau moyen en amont de 6,8 m, assurant ainsi une profondeur d'eau minimale de 3,6 m jusqu'à la ville de Chambly, localisée à près de 50 km en amont. Cette profondeur minimale a été établie afin de permettre la navigation de plaisance sur la rivière Richelieu jusqu'à Chambly (Dumont et coll. 1997). Dû à cette contrainte, le dénivelé entre l'amont et l'aval du barrage peut être de 25 cm à plus de 2 mètres, dépendamment des conditions hydrologiques de la rivière Richelieu (Poulin 1995). Le barrage de Saint-Ours n'est donc pas franchissable par le poisson, sauf en période de crue, soit majoritairement de la fin avril au début du mois de mai, selon les précipitations. Or, peu d'espèces sont présentes en abondance dans ce secteur pendant cette période. Le barrage de Saint-Ours a donc contribué

à fragmenter l'habitat des espèces fréquentant la rivière Richelieu pendant plus de 30 ans (Dumont et coll. 1997).

La passe migratoire Vianney-Legendre fut donc construite en 2001, à la suite des recommandations émises dans le Plan d'intervention pour la survie du suceur cuivré (actuellement le chevalier cuivré) et dans le but d'assurer la libre circulation du poisson dans la rivière Richelieu (Comité d'intervention 1995). Ce plan visait essentiellement à empêcher l'extinction de l'espèce qui démontrait déjà un très faible effectif de reproducteurs (Dumont et coll. 1997). Parmi les facteurs expliquant son déclin, la dégradation de son habitat fut particulièrement pointée du doigt (Gariépy et Vachon 2005). Le chevalier cuivré (*Moxostoma hubbsi*) est la seule espèce de vertébré endémique au Québec et dispose du statut d'espèce menacée, depuis 1999, selon la Loi sur les espèces menacées ou vulnérables du Québec, ainsi que la désignation d'espèce en voie de disparition, depuis 2007, selon la Loi sur les espèces en péril du Canada (Gouvernement du Canada 2012). Bien que l'espèce fréquente le fleuve Saint-Laurent et les embouchures de certains des principaux affluents, la rivière Richelieu constitue le seul endroit de reproduction connu pour l'espèce. De surcroît, seules deux frayères y sont actuellement identifiées, soit celle en aval du barrage de Saint-Ours et celle dans l'archipel de Chambly (Gouvernement du Canada 2014; Équipe de rétablissement du chevalier cuivré du Québec 2012). Outre le chevalier cuivré, la passe migratoire Vianney-Legendre fut également conçue afin de favoriser le libre passage des autres espèces fréquentant la rivière Richelieu, dont plusieurs d'entre elles sont désignées menacées ou vulnérables au Québec. Il est notamment possible d'y retrouver le chevalier de rivière (*Moxostoma carinatum*), l'alse savoureuse (*Alosa sapidissima*), l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) et l'esturgeon jaune (*Acipenser fulvescens*; Dumont et coll. 1997).

De nos jours, une trentaine d'espèces fréquentent en moyenne, la passe migratoire multispécifique (Vachon 2018). Celle-ci assure aux diverses espèces une accessibilité à des sites de fraye et d'alimentation primordiale et supplémentaires dans leur cycle vital. Cela est notamment vrai pour le chevalier cuivré, dont l'accessibilité à sa plus importante frayère connue et active dépend de l'efficacité de la passe migratoire Vianney-Legendre. Cependant, depuis le début de l'opération de la passe migratoire, une diminution du nombre d'espèces et de captures totales semble avoir été constatée, laissant croire à une possible défaillance de celle-ci (Vachon 2011). Afin de maintenir son rôle de conservation en assurant la libre circulation des poissons et d'explorer le potentiel de la passe migratoire comme indicateur de tendance de la communauté de poissons de la Richelieu, la variation temporelle de

l'efficacité de la passe migratoire en fonction des conditions hydrauliques (ex. débits, niveau de l'eau, etc.) doit être étudiée.

L'objectif de ce travail est donc de documenter la chronologie et la dynamique de montaison des différentes espèces fréquentant la passe migratoire Vianney-Legendre, en plus de tester l'influence des facteurs environnementaux sur l'abondance et la diversité des montaisons enregistrées lors de la période d'opération de la cage de 2007 à 2019. En fonction des informations disponibles et des tendances environnementales globales liées aux changements climatiques, il est possible d'émettre la première hypothèse que le nombre d'espèces et de captures totales aura diminué depuis le début d'opération de la cage et que ce nombre d'espèces et de captures sera influencé par les conditions hydrologiques de la rivière et du fleuve Saint-Laurent. Il est également possible d'émettre comme deuxième hypothèse que la communauté d'espèces fréquentant la passe migratoire, à la fin de la période d'échantillonnage, sera caractérisée par de nouvelles espèces fréquentant des eaux plus chaudes, en réponse à l'élévation des températures annuelles observées lors de la dernière décennie.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Site d'étude

La passe migratoire multiespèces Vianney-Legendre est située en rive gauche de la rivière Richelieu et s'étend sur près de 50 m en aval du barrage de Saint-Ours. Cette infrastructure en béton est composée de 16 bassins successifs à fentes verticales simples, en plus d'un bassin d'attraction, plus grand, localisé en avant de l'installation (Fournier et Desrochers 2009). L'ouvrage est sous la responsabilité de Parcs Canada, qui en assure l'opération et l'entretien selon le manuel d'opération et d'entretien de Fournier et Desrochers (2009). Pour permettre la progression des espèces ne pouvant pas sauter d'obstacles, un dénivelé maximum de 15 cm doit être retrouvé entre les bassins de la passe (Fournier et Desrochers 2009). Deux entrées, une de surface (vanne 3) et une de fond (vanne 8), ainsi qu'une sortie (vanne 4), permettent aux poissons ayant des capacités natatoires différentes de circuler de l'aval vers l'amont de la rivière. Le degré d'ouverture des huit vannes de la passe migratoire est adapté aux conditions hydrologiques de la rivière Richelieu, afin d'obtenir un débit combiné de 7,5 à 8,0 m³·s⁻¹, soit de 1 m³·s⁻¹ dans la passe et de 4 à 7 m³·s⁻¹ dans le bassin 17 (Fournier et Desrochers 2009). Ces débits précis sont essentiels à la production d'un courant d'appel optimal à l'entrée de la passe, et donc à son efficacité (Desrochers 2008).

Collecte de données

Depuis 2006, les données de captures dans la cage de la passe migratoire sont recueillies par le personnel du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), conformément à la méthodologie établie par Vachon (2018) et dans le cadre du plan de rétablissement du chevalier cuivré (Équipe de rétablissement du chevalier cuivré du Québec 2012). Dans ce contexte, l'opération de la cage est effectuée dans le seul but de capturer des géniteurs de chevaliers cuivrés afin de procéder à des activités de reproduction assistée. Toutefois, tous les poissons capturés lors de cette période sont identifiés à l'espèce et mesurés avant d'être immédiatement remis à l'eau en amont du barrage (Vachon et Sirois 2019). La cage de capture, qui possède un espacement de 40 mm entre ces barreaux, est donc opérée chaque année pour les besoins du programme de reproduction artificielle dans le bassin 1 durant le mois de juin. Cette période couvre, en partie, la période de montaison et de déplacement de fraye du chevalier cuivré, maximisant les captures de géniteurs (Leclerc et Vachon 2008). Durant cette période, la cage est levée une à deux fois par jour, en avant-midi et vers la fin de l'après-midi, pour un temps de pêche approximatif de 23 heures par jour. Durant la journée, la pose d'un

filet maillant dans le bassin 17 est également effectuée pour augmenter la capture du chevalier cuivré (Leclerc et Vachon 2008). Lorsqu'il est déployé, ce filet aux mailles de 5 pouces est sous la supervision constante d'une équipe technique, afin de procéder au démaillage des poissons dans les minutes suivant la capture.

Traitement des données

Dans le but d'annuler l'effet du filet positionné dans le bassin 17 et d'évaluer l'efficacité de la passe, les données obtenues lors de la levée du soir (fin d'après-midi) ont été exclues de l'échantillonnage. Les espèces rares, soit celles représentant moins de 5% des occurrences (soit moins de 7 observations sur toute la période analysée) ont également été exclues des analyses subséquentes, afin d'annuler leurs effets sur la variation des captures et le calcul des indices de richesse et de diversité. Les espèces de petites tailles ont également été exclues de l'échantillonnage, puisque la cage ne permet pas leur rétention, et qu'elles ont été observées comme voyageant librement entre les barreaux de celle-ci, à partir de l'amont comme de l'aval (Marc-Antoine Couillard, communication personnelle, 2023). Leur abondance est donc assurément biaisée, et donc inutilisable dans les analyses (annexe 1).

Pour évaluer l'impact des conditions hydrologiques et de la température de la rivière Richelieu sur l'efficacité de la passe, les données de montaison nocturnes et crépusculaires ont été comparées aux débits, et à la température de l'eau (°C) obtenue à la station hydrométrique des rapides Fryers à Carignan (030401, rivière Richelieu), ainsi qu'au niveau d'eau mesuré à la station de la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu (Gouvernement du Québec 2023; Environnement Changement climatique, données non publiées). Afin de représenter la température exerçant une influence biologique sur la phénologie des poissons, les degrés-jour de croissance (DJC) cumulés ont été calculés à partir du mois de mai, avec une température de référence établie à 5° Celsius. Cette température de référence est couramment utilisée pour représenter l'effet de la température saisonnière chez la croissance, la maturité et le comportement des poissons d'eau douce nord-américains (Chu et coll. 2003; Alofs et coll. 2013; Venturelli et coll. 2010). Puisque les conditions hydrologiques du fleuve Saint-Laurent peuvent également avoir un impact sur les régimes migratoires et l'efficacité de la passe, nous avons également compilé la hauteur d'eau et les débits à la station hydrométrique de LaSalle (02OA016) durant la période de l'étude (Gouvernement du Canada 2024).

La valeur des captures par unité d'effort (CPUE) quotidien fait dans la cage a été calculée en divisant le nombre de captures recensé dans la cage, lors de chaque levée, par le nombre d'heures de pêche de la cage, soit le temps (heures) entre la pose de la cage dans le bassin 1, en fin d'après-midi, et la levée effectuée le lendemain matin. La richesse spécifique, quant à elle, fut calculée en compilant le nombre d'espèces recensées dans la cage à chaque levée. Puisqu'une relation linéaire semblait exister entre le nombre d'espèces observées et la durée de la pêche, la richesse spécifique fut également divisée par l'effort de pêche en heures, afin d'en normaliser la valeur et permettre la comparaison entre les levées.

À partir de 2013, plusieurs mentions quant à des dérogations aux procédures du manuel d'opération et d'entretien de la passe migratoire Vianney-Legendre concernant l'entretien et la gestion du barrage et de la passe migratoire ont été relatées (Fournier et Desrochers 2009; Vachon 2021 ; Vachon et Sirois 2019). Comme cela pourrait affecter l'efficacité de la passe migratoire, l'effet de la période, soit de 2007 à 2012 et de 2013 à 2019, a été testé sur le nombre de captures par unité d'effort et sur la communauté d'espèces retrouvée dans la cage.

Analyse statistique

Les analyses statistiques suivantes ont été effectuées avec le logiciel R, version 4.4.1 (R Core Team 2023). Les variations annuelles du nombre de captures totales (CPUE) et de la richesse spécifique totale recensée ont été analysées par régression linéaire avec les années d'échantillonnage (variable indépendante). La significativité des régressions par rapport à un modèle nul a été testée à l'aide d'une analyse de la variance (ANOVA) et d'un seuil de significativité de $p = 0,05$. Pour chaque modèle, la prémisse de normalité des résidus a été validée grâce à la visualisation des résidus en fonction des données prédites, et ce, pour les deux analyses. Une régression linéaire fut également utilisée pour analyser les tendances temporelles dans les CPUE des quatre espèces les plus abondantes de la banque de données. Finalement, la saisonnalité dans la présence de ces quatre espèces fut testée par une analyse de variance à un facteur (degrés-jour de croissance, DJC).

Étant un système ouvert, l'influence des cinq variables environnementales (le débit du fleuve Saint-Laurent, le débit de la rivière, la hauteur de la rivière, la hauteur du fleuve et la somme des DJC au-dessus de 5° Celsius) ainsi que l'interaction de ces variables entre elles ont été corrélées aux CPUE totales et à la richesse spécifique totale dans la cage grâce à une analyse de variance multivariée (MANOVA). Le seuil de significativité fut, encore une fois, établi à 0,05. L'impact de ces cinq variables

environnementales sur les communautés d'espèces de poissons observées dans la cage de la passe Vianney-Legendre a été testé grâce à une analyse de redondance de type 2 (RDA, 999 permutations). Avant l'analyse, une transformation de Hellinger a été appliquée sur la matrice d'espèce, qui représente une approche privilégiée afin de limiter l'influence des espèces rares avant de tester l'influence des conditions environnementales (Legendre et Gallagher 2001). La significativité de la RDA, de chaque variable utilisée et de chaque axe a été analysée à l'aide d'une ANOVA (1000 permutations).

Finalement, l'effet de la période (2007 à 2012 et 2013 à 2019) sur les CPUE totales et la richesse spécifique totale a été analysé à l'aide d'une MANOVA, tandis que l'effet de la période sur la distance entre les communautés d'espèces, qui fut analysé par l'indice de dissimilarité de Bray-Curtis, a été testé à l'aide d'une analyse multivariée permutationnelle de la variance (PERMANOVA).

RÉSULTATS

Dix-neuf espèces observées dans la cage ont été conservées après le tri des données, dont quatre caractérisent 70% des captures. Ces espèces, soit la barbue de rivière (*Ictalurus punctatus*), le chevalier de rivière, le chevalier blanc (*Moxostoma anisurum*) et le chevalier rouge (*Moxostoma macrolepidotum*), représentent respectivement 35, 15, 10 et 10% de l'abondance relative des captures (tableau 1).

Tableau 1 : Nombre d'individus par espèce recensés dans la passe migratoire Vianney-Legendre, pour les années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019), incluant leur abondance relative (%) et le code de l'espèce.

Espèces	Code	Nombre	Abondance relative (%)
Barbue de rivière	ICPU	837	34,6
Chevalier de rivière	MOCA	351	14,5
Chevalier blanc	MOAN	252	10,4
Chevalier rouge	MOMA	244	10,1
Meunier noir	CACO	160	6,6
Esturgeon jaune	ACFU	118	4,9
Doré noir	SACA	67	2,8
Tanche	TITI	64	2,6
Achigan à petite bouche	MIDO	59	2,4
Meunier rouge	CACA	55	2,3
Barbotte brune	AMNE	45	1,9
Doré jaune	SAVI	43	1,8
Lépisosté osseux	LEOS	34	1,4
Malachigan	APGR	24	1,0
Carpe commune	CYCA	18	0,7
Chevalier jaune	MOVA	14	0,6
Couette	CACY	12	0,5
Saumon atlantique	SASA	12	0,5
Grand brochet	ESLU	8	0,3
Total		2417	100

De manière générale, une diminution significative des captures moyennes, de l'ordre de 0,11 capture par unité d'effort par année, a été observée depuis le début de l'inventaire (figure 1; annexe 2). Les années 2010 et 2007 ont montré le nombre de captures par unité d'effort (CPUE) le plus élevé, tandis que l'année 2019, suivie de l'année 2011, montra les CPUE les plus faibles. Le coefficient de détermination (R^2), pour cette régression, a été estimé à 0,11 (figure 1). En ce qui concerne la richesse spécifique, une diminution moyenne et significative de 0,2 espèce par année par heure a été calculée (figure 1; annexe 3). L'année 2007 se caractérise par la plus forte richesse spécifique, suivie des années 2010 et 2009. L'année 2019, quant à elle, est caractérisée par le taux de richesse spécifique le plus faible recensé, suivie de 2011. Le coefficient de régression, pour cette droite, a été estimé à 0,22.

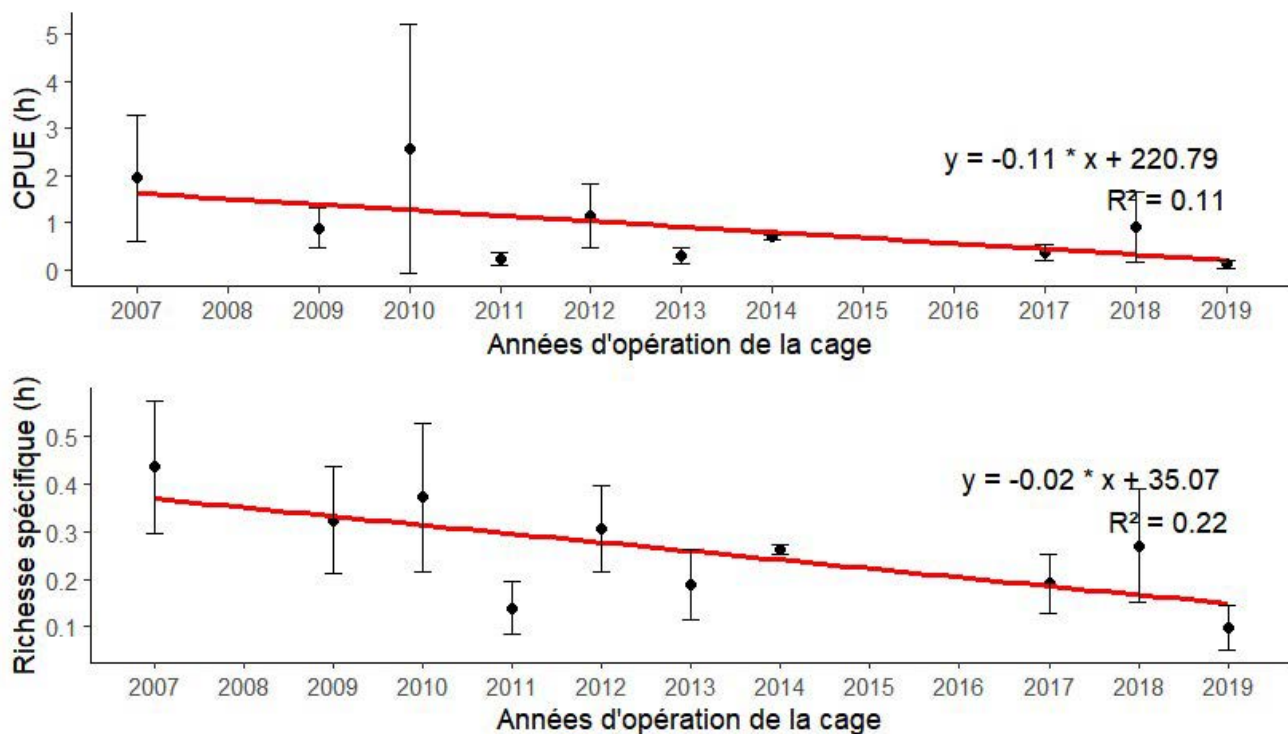


Figure 1 : Nombre moyen de captures par unité d'effort (CPUE) total et richesse spécifique totale recensés dans la cage, par heure et en fonction des années d'opération de la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre, sur la rivière Richelieu.

Le même constat a été observé chez les quatre espèces les plus abondantes dans la banque de données, qui affichent toutes une diminution significative de leur valeur de CPUE pour la période des travaux (figure 2; annexe 4). Le chevalier de rivière est l'espèce affichant la diminution la plus importante, soit de 0,75 capture par unité d'effort, par année. La barbue de rivière et le chevalier blanc affichent une diminution du nombre de captures similaire, soit d'environ 0,59 CPUE par année. Finalement, le chevalier rouge affiche la diminution la moins prononcée, soit de 0,32 CPUE par année. Cette espèce partage, avec la barbue de rivière, le coefficient de détermination (R^2) le plus faible, soit de 0,04, alors que le chevalier blanc et le chevalier de rivière affichent un R^2 de 0,11. L'année 2007 a été majoritairement marquée par une forte abondance de chevalier blanc et de chevalier de rivière, tandis que la barbue de rivière et le chevalier rouge ont été particulièrement présents lors de l'année 2012. L'année 2010, quant à elle, est marquée par une forte abondance des quatre espèces (figure 2).

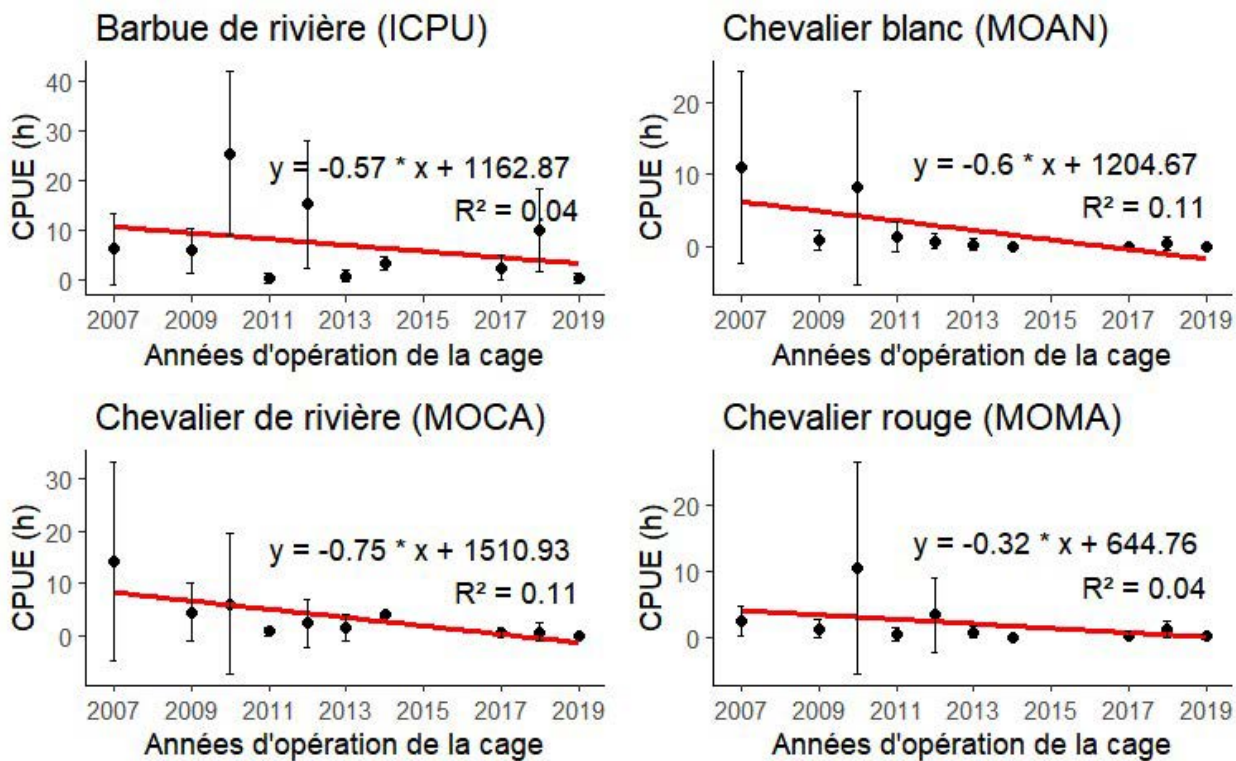


Figure 1 : Nombre moyen de captures de barbue de rivière (*Ictalurus punctatus*), de chevalier blanc (*Moxostoma anisurum*), de chevalier de rivière (*Moxostoma carinatum*) et de chevalier rouge (*Moxostoma macrolepidotum*), par unité d'effort (heure), en fonction des années d'opération de la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre, sur la rivière Richelieu.

Dans la banque de données analysée, les périodes d'opération de la cage ont débuté, en moyenne, le 4 juin à 311 DJC et se sont terminées, en moyenne, le 23 juin à 579 DJC (figure 3; annexe 5). Cependant, la variation saisonnière a, en général, décalé les saisons d'opération lorsqu'on considère les DJC mesurés. Notamment, l'année 2011 est caractérisée par un début d'inventaire le plus hâtif où le nombre de DJC cumulé était inférieur à 200. À l'exception de 2014, qui est composée uniquement de deux jours d'échantillonnage, l'année 2011 possède également le nombre de DJC le plus faible en fin d'inventaire (484 DJC), bien que la date de fin des travaux soit équivalente à la moyenne calculée (23 juin). Trois années d'échantillonnage (2007, 2009 et 2014) sur dix ont débuté alors que le nombre de DJC cumulés était supérieur à 300, d'au moins 60 DJC. Pour ce qui est de l'étendue de la période des travaux, celle-ci est en moyenne de 22 jours, en excluant l'année 2014 qui est atypique. Finalement, la période des travaux s'est étendue au-delà de 600 DJC pendant cinq ans (2009, 2010, 2012, 2013 et 2018), tandis que l'année 2018 est caractérisée par un nombre de DJC cumulé, en fin de l'inventaire, le plus élevé (653), par rapport aux autres années.

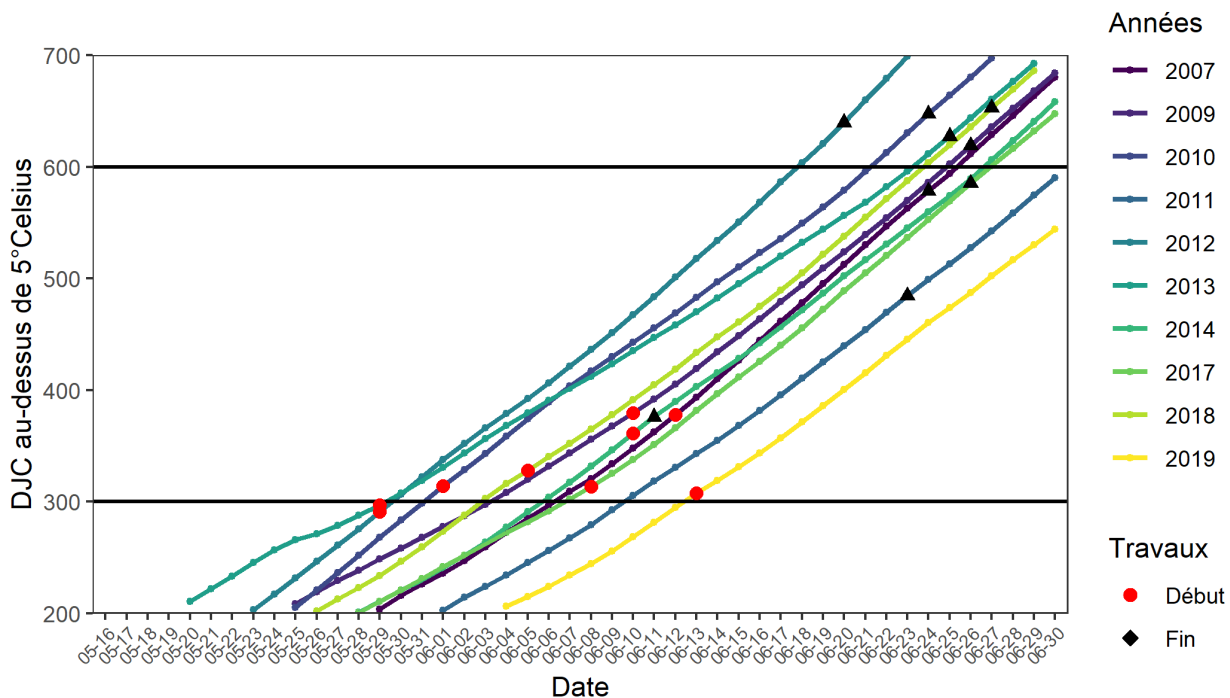


Figure 2 : Nombre de degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC) en fonction de la date, pour les dix années d'inventaire (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019), en plus de l'étendue de la période d'échantillonnage réalisée (début et fin) pour chaque année.

Le nombre de CPUE (h) total dans la cage s'est avéré être maximal entre 350 et 600 degrés-jour de croissance au-dessus de 5° Celsius (DJC), pour la période d'échantillonnage, bien que plusieurs captures aient été réalisées au-delà de cette période (figure 4). Les captures des quatre espèces majoritaires se sont avérées être, quant à elles, concentrées entre 300 et 600 DJC, bien que toutes ces espèces aient été recensées au-delà de cette période (figure 5). Les analyses ont également montré une influence significative des degrés-jour mesurés sur la présence de ces quatre espèces dans la cage de capture (ANOVA, $F_{3,1675} = 122,73$, $p < 2,2E-16$). Deux périodes de migration significativement différentes ont été observées chez ces quatre espèces (annexe 6). La première période (A) est composée des espèces migratrices les plus hâtives (DJC plus faible), soit celles du genre *Moxostoma* (chevaliers) (figure 5). Bien que ces trois espèces aient été observées dans la cage sensiblement au même moment, le chevalier de rivière (MOCA) est caractérisé par la saisonnalité la plus restreinte, suivi du chevalier blanc (MOAN). Le chevalier rouge (MOMA), quant à lui, est caractérisé par la fenêtre de DJC la plus étendue de son groupe, soit d'environ 300 à plus de 450 DJC. Certains individus de cette espèce ont d'ailleurs été recensés au-delà de 600 DJC (figure 5). La barbue de rivière (ICPU) compose la deuxième période de migration (B), qui est caractérisée par une migration plus tardive, dont une fréquence maximale dans la cage aux alentours de 400 à 475 DJC.

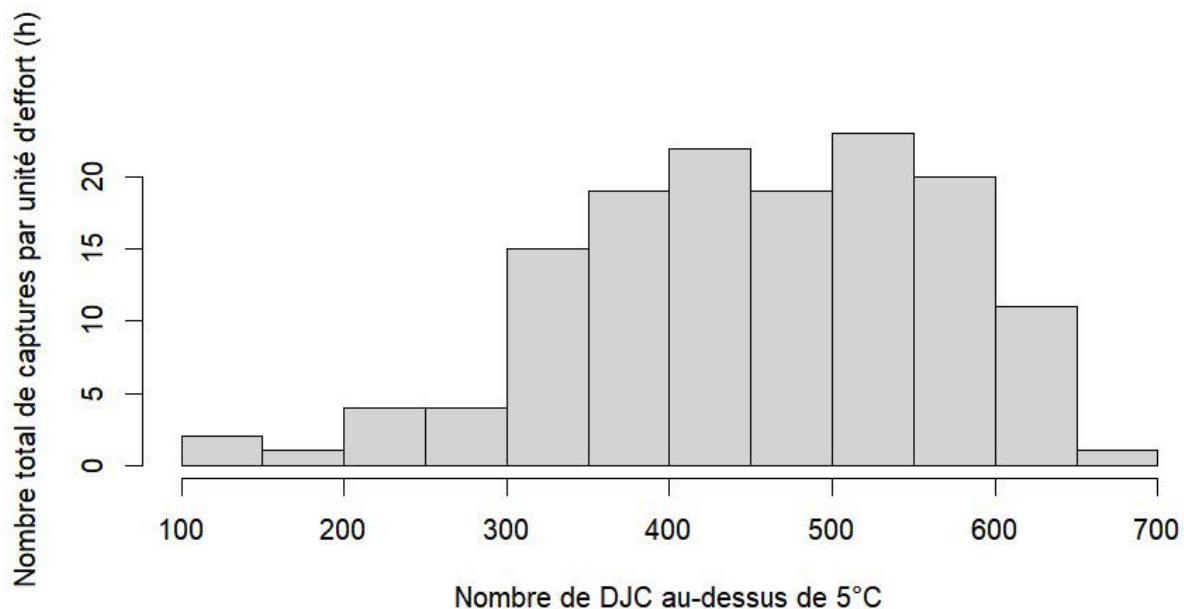


Figure 3 : Nombre total de captures par unité d'effort (CPUE) par heure, en fonction du nombre de degrés-jour de croissance au-dessus de 5° Celsius (DJC) recensé dans la passe migratoire Vianney-Legendre pour les années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

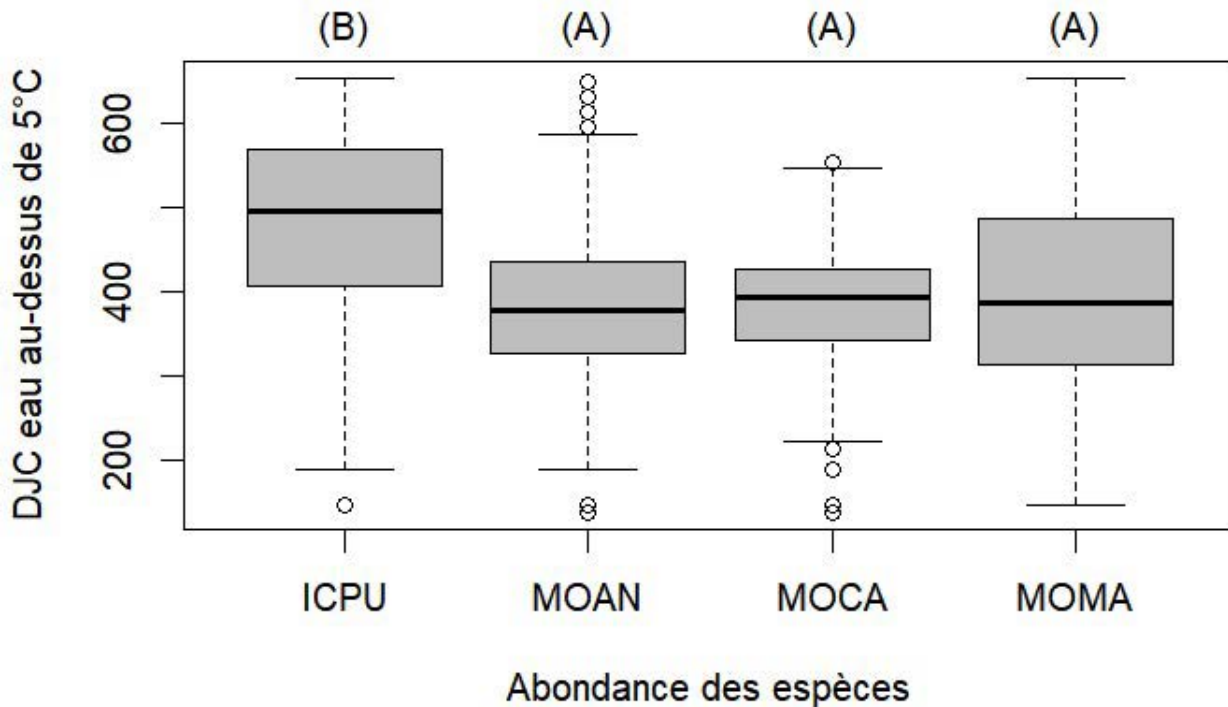


Figure 4 : Abondance des espèces les plus communes de la base de données, la barbue de rivière (*Ictalurus punctatus*), le chevalier blanc (*Moxostoma anisurum*), le chevalier de rivière (*Moxostoma carinatum*) et le chevalier rouge (*Moxostoma macrolepidotum*) en fonction des degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC) recensés dans la passe migratoire Vianney-Legendre, pour les années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

L'influence de cinq variables environnementales sur le nombre de captures total par unité d'effort (CPUE) a été analysée, ainsi que sur la richesse spécifique totale observée par unité d'effort. Seul le débit du fleuve n'a pas démontré une relation significative avec les CPUE, tandis que les quatre autres variables : débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve et DJC au-dessus de 5° Celsius, ont tous démontré une relation significative avec les CPUE (annexe 7). Ces cinq variables ont également montré une influence significative sur la richesse spécifique totale observée dans la cage (annexe 8).

Par la suite, les variables environnementales ont été utilisées dans une analyse de redondance (RDA) de type 2, afin d'illustrer leurs impacts sur les communautés d'espèces de poissons observées dans la cage durant toute la période de l'étude. La RDA a montré une corrélation significative entre les communautés observées et les conditions environnementales (ANOVA, $F_{5,134} = 7,8484$, $p = 0,000999$). Selon l'analyse, les conditions environnementales expliquent 23% de la variation dans la composition en espèces

observées dans la cage (figure 6). L'axe 1 de la RDA est positivement influencé par les variables de débits et de hauteur du fleuve/rivière Richelieu et négativement par les degrés-jour. L'axe 2, quant à lui, est positivement influencé par le débit et la hauteur du fleuve Saint-Laurent ainsi que les degrés-jour. L'axe 2 semble aussi être responsable de la variation interannuelle des communautés observées.

Un changement dans la communauté d'espèces recensée dans la cage est perceptible entre 2007 et 2019. En début d'inventaire, la communauté se distingue par une abondance plus marquée en chevaliers (MOAN et MOCA), qui sont également associés à de fortes conditions hydrologiques dans la rivière Richelieu, des conditions hydrologiques du fleuve Saint-Laurent plus faible et à des valeurs de DJC plus faibles (figure 6). Cette communauté transite ensuite vers des espèces associées à des DJC plus élevés et à des conditions hydrologiques moyennes, comme la barbue de rivière (ICPU), pour ensuite être caractérisées par l'esturgeon jaune (ACFU) et l'achigan à petite bouche (*Micropterus dolomieu* ; MIDO). Ces deux dernières sont associées à des DJC plus élevés et à des conditions hydrologiques plus faibles dans la rivière Richelieu au détriment du fleuve Saint-Laurent, pour les années plus récentes de l'inventaire. Toutes les variables utilisées dans cette RDA ont affiché une influence significative (figure 6; annexe 9).

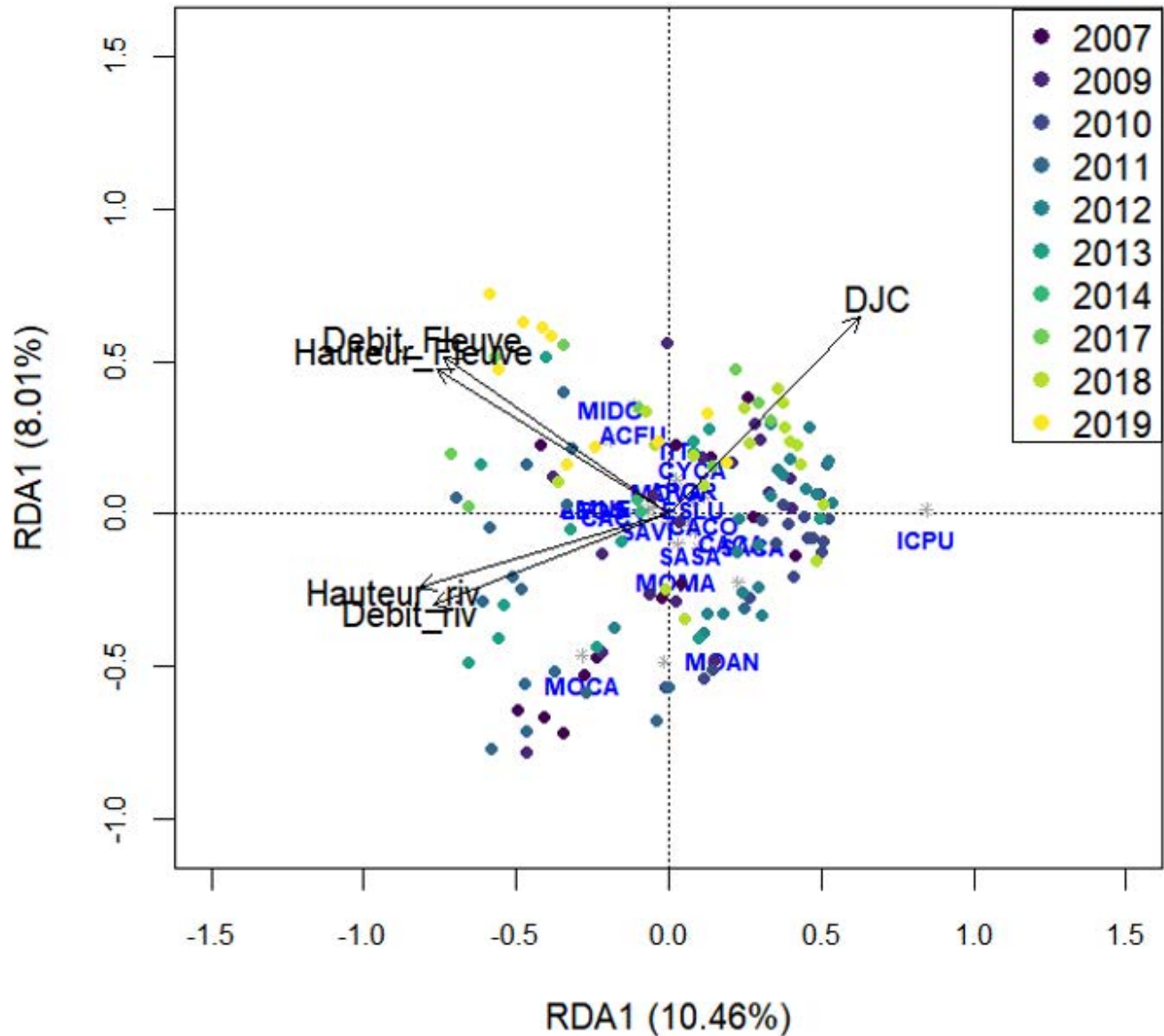


Figure 5 : Analyse de redondance (RDA) de type 2, montrant l'influence des cinq variables environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC)) sur la communauté d'espèces (transformation de Hellinger) recensée dans la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre, au cours des années.

Finalement, la période d'opération de la cage (la première étant de 2007 à 2012 et la deuxième de 2013 à 2019) a également montré une influence significative sur la communauté d'espèces ayant fréquenté la passe migratoire Vianney-Legendre lorsqu'elle fut testée par l'analyse multivariée permutationnelle de la variance (PERMANOVA, $F_{1,139} = 2,2533$, $R^2 = 0,0128$, $p = 0,013$; annexe 10). Une différence significative de la communauté d'espèces entre ces deux périodes est donc perceptible. Il est toutefois

important de mentionner que le nombre de jours de pêche s'élève à 84 de 2007 à 2012, contre 46 de 2013 à 2019. L'effet de la période sur les CPUE totales et la richesse spécifique totale a également été analysé grâce à une analyse de la variance multivariée (MANOVA). Une influence non significative de la période sur les CPUE totales et la richesse spécifique totale a toutefois été mesurée, à l'aide de cette analyse (annexes 11 et 12).

DISCUSSION

Constats sur les données de capture

Notre étude avait comme objectif de faire une description des facteurs influençant les assemblages de poissons observés dans la cage de capture de la passe Vianney-Legendre. Ces analyses tentaient également de dégager des constats sur l'efficacité de la passe, par l'entremise des analyses de captures. Les résultats obtenus ont permis de documenter la chronologie et la dynamique de montaison de 19 espèces recensées dans la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre lors de la levée du matin. L'influence de cinq variables environnementales, telles que le débit de la rivière Richelieu, la hauteur de la rivière, le débit du fleuve Saint-Laurent, la hauteur du fleuve et les degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC), a également été testée sur l'abondance et la diversité des captures effectuées dans la cage, lors des années d'opération de celle-ci. Les résultats obtenus ont permis de soutenir les hypothèses de départ, offrant une vision intéressante de l'utilisation qu'il est possible de faire des données de captures.

La première hypothèse soutenue par les résultats est celle de la diminution du nombre d'espèces et de captures totales observées pendant la période analysée. En effet, une diminution significative du nombre de captures par unité d'effort (CPUE, captures par heure) total, ainsi qu'une diminution significative de la richesse spécifique totale, par heure, ont été observées depuis 2007 (figure 1). Une diminution significative des CPUE pour les quatre espèces majoritaires dans la passe migratoire Vianney-Legendre a également été mesurée (tableau 1; figure 2; annexes 4). Le chevalier de rivière, espèce désignée vulnérable selon la Loi sur les espèces menacées ou vulnérables du Québec (Gouvernement du Québec 2024a) et désignée espèce préoccupante selon la Loi sur les espèces en péril du Canada (Gouvernement du Canada 2016), affiche la plus forte diminution du nombre de CPUE des quatre espèces. En vertu de sa situation, il est difficile d'exclure que la diminution des CPUE ne reflète pas tout simplement l'état global du stock de cette population. Toutefois, la barbue de rivière et le chevalier blanc affichent également une diminution moyenne de 0,59 CPUE par année dans les données de capture, tout comme le chevalier rouge, qui affiche une diminution de 0,32 CPUE par année (figure 2). Selon Magnan et coll. (2022), l'abondance de ces trois espèces serait en augmentation dans le lac Saint-Pierre, depuis 2002, un habitat qui est localisé à seulement 30 km en aval de l'embouchure de la rivière Richelieu. Plus particulièrement, la barbue de rivière affiche l'augmentation des CPUE la plus prononcée des 14 espèces dénombrées dans le lac. Pour ce qui est du secteur Montréal-Sorel, soit en amont du lac Saint-Pierre, les résultats obtenus à la suite de l'échantillonnage du secteur par le Réseau de suivi ichtyologique (RSI)

montrent des abondances similaires entre 2001 et 2015 pour ces trois espèces (Bernatchez et coll. 2020). Ces deux résultats d'inventaire suggèrent donc que les populations de ces trois espèces sont, minimalement, à l'équilibre et probablement à la hausse dans l'écosystème du fleuve Saint-Laurent et de l'aval de la rivière Richelieu. Ces constats sont donc contraires à ce qui est observé dans la cage de capture de la passe. À l'exception du chevalier de rivière, la diminution des CPUE recensée dans la cage pour ces trois espèces pourrait donc résulter d'une problématique plutôt liée à l'efficacité ou à la fréquentation de la passe migratoire Vianney-Legendre, et non en lien avec l'abondance des stocks des espèces. Ce décalage souligne déjà que les données de captures dans la cage sont probablement un indicateur très imparfait de l'état des stocks de ces espèces.

Compte tenu du fait que la période d'opération de la cage est ajustée à la période de juin afin de maximiser la capture du chevalier cuivré dans le cadre du programme de reproduction artificielle du chevalier cuivré, la différence interannuelle dans la saisonnalité (ex. départ des glaces, dates et intensité de la crue, réchauffement de l'eau) de la période échantillonnée peut aussi affecter l'abondance et le type de captures (Équipe de rétablissement du chevalier cuivré du Québec 2012). Il est démontré que l'activité métabolique des poissons, ce qui inclut la migration, est influencée par la photopériode et le nombre de degrés-jour de croissance (Venturelli et coll. 2010). Nos résultats ont montré que les CPUE dans la cage avaient majoritairement lieu entre 350 et 600 DJC (base 5°C). Toutefois, les périodes d'opération de la cage ont débuté, en moyenne, à 311 DJC et se sont terminées, en moyenne, à 579 DJC (annexe 5). L'augmentation rapide des CPUE totales après 300 DJC, tout comme la diminution rapide des CPUE totales après 600 DJC suggère que les périodes d'opération de la cage ont débuté et se sont terminées alors que la période de migration de plusieurs espèces était déjà débutée. Il est à noter que le faible nombre de CPUE observé en deçà de 300 et au-delà 600 DJC n'est probablement pas représentatif de la moyenne des captures dans la cage, mais représente plutôt un artéfact, puisque seulement deux années d'opération ont débuté en deçà de 300 DJC (2011 et 2012), tandis que seules trois années d'opération se sont terminées bien au-delà de 600 DJC, soit 2010, 2012 et 2018 (figure 3; annexe 5). Ainsi, nos résultats suggèrent que les données de captures matinales dans la cage ne permettent pas d'évaluer la dynamique migratoire de la communauté d'espèces crépusculaires ou nocturnes fréquentant la passe migratoire Vianney-Legendre, puisque la période d'opération de la cage trop courte et commence probablement trop tard, un phénomène qui semble s'amplifier avec les printemps de plus en plus hâtifs observés à l'échelle du Québec méridional.

Nos résultats ont également mis en évidence l'effet des conditions environnementales sur les assemblages de poissons observés dans la cage, en plus de soutenir la première et la deuxième hypothèse de départ. En effet, les cinq variables environnementales ont un effet significatif sur les CPUE, la richesse spécifique et la communauté d'espèces observées dans la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre (annexes 7, 8 et 9). Plus précisément, 23% de la variance observée est expliquée par ces cinq variables environnementales. En plus de l'augmentation globale du nombre de DJC, lors des périodes d'échantillonnage, un découplage entre l'hydraulicité du fleuve Saint-Laurent et l'hydraulicité de la rivière Richelieu est observé dans certaines années couvertes par l'analyse (ex. 2007 et 2019). Ainsi, les années 2007 à 2009 ont été caractérisées par une rivière Richelieu en forte hydraulicité, par rapport aux autres années dans la banque de données, tandis que l'hydraulicité du fleuve Saint-Laurent est plus faible. Au contraire, les années plus récentes d'inventaire sont, quant à elles, caractérisées par une hydraulicité du fleuve Saint-Laurent plus élevée, ainsi que d'une hydraulicité de la rivière Richelieu plus faible (figure 6).

Deux principaux bassins hydrographiques régularisés, soit les Grands Lacs et la rivière des Outaouais, alimentent le fleuve Saint-Laurent et ont, par le fait même, un effet régulateur sur celui-ci. Toutefois, l'hydraulicité du fleuve Saint-Laurent démontre tout de même une cyclicité naturelle dans la variation temporelle des débits et de la hauteur d'eau, associée à des périodes de faible hydraulicité, suivies de périodes de forte hydraulicité (Bouchard et Cantin 2015; Cantin et coll. 2021). Notamment, la première décennie des années 2000 a été caractérisée par une période de très basse hydraulicité du fleuve Saint-Laurent. À partir de 2015, une tendance à l'augmentation de l'hydraulicité du fleuve a été observée, notamment en lien avec des pics d'hydraulicité en 2017 et en 2019 (Cantin et coll. 2021). Cette variabilité dans l'hydraulicité du fleuve Saint-Laurent transparaît dans le résultat de la RDA qui affiche la même tendance. Au niveau des espèces, les années de faible hydraulicité du fleuve sont caractérisées par une abondance marquée de chevaliers (MOAN, MOCA et MOMA) dans la cage de la passe migratoire, tandis que les années de forte hydraulicité du fleuve sont caractérisées par une abondance accrue de l'esturgeon jaune (ACFU) et de l'achigan à petite bouche (MIDO; figure 6). Le lien entre les espèces observées dans la cage de capture et les régimes hydrauliques de la Richelieu et du fleuve Saint-Laurent pourrait témoigner de l'influence de ces conditions sur l'efficacité de la passe migratoire Vianney-Legendre.

Il est important de rappeler que la validation de l'efficacité de la passe migratoire, l'optimisation de l'ouvrage et la rédaction du manuel d'opération et d'entretien de la passe migratoire ont toutes été

réalisées entre les années 2002 et 2009. Cette période coïncide donc avec des années de très faible hydraulité du fleuve Saint-Laurent (Fournier et Desrochers 2009; Cantin et coll. 2021). La passe migratoire étant localisée en aval du barrage de Saint-Ours, celle-ci peut être grandement influencée par les conditions hydrologiques du fleuve. Ainsi, nous posons l'hypothèse que l'ajustement de la passe et du barrage ne soit pas optimal en période de forte hydraulité du fleuve Saint-Laurent, en raison de l'absence de conditions hydrologiques similaires testées lors de la période de validation de l'efficacité de la passe (2002 à 2009). La forte hydraulité récente du fleuve pourrait donc modifier les conditions hydrologiques retrouvées dans la passe, comme le courant d'appel d'eau en aval de celle-ci, ainsi que les débits retrouvés dans la passe et ses bassins, qui sont essentielles à son efficacité (Fournier et Desrochers 2009). Les espèces aquatiques pouvant être très sensibles aux conditions hydrologiques, un changement minime dans l'ajustement du barrage et de la passe peut engendrer de grandes conséquences sur la communauté d'espèces qui y est retrouvée (Leclerc et Vachon 2008; Vachon 2010). Les prochaines années, marquées par une nouvelle diminution de l'hydraulité du fleuve pourront peut-être répondre à ce questionnement.

Finalement, l'effet de la période, soit de 2007 à 2012 et de 2013 à 2019, a été testé sur les CPUE totales, la richesse spécifique totale, ainsi que sur la communauté d'espèces de la rivière Richelieu, afin de détecter la présence d'un changement dans l'opération ou l'entretien de la passe, comme il fut relaté dans plusieurs rapports (Vachon 2021 ; Vachon et Sirois 2019). Les analyses de variance multivariée (MANOVA) n'ont pas montré un effet significatif de la période sur les CPUE et sur la richesse spécifique totale observée dans la cage (annexes 11 et 12). Toutefois, l'analyse multivariée permutationnelle de la variance (PERMANOVA) a bel et bien montré un effet significatif de la période sur la communauté d'espèces de la passe migratoire Vianney-Legendre (annexe 10). Cette analyse prend en considération l'influence générale des variables environnementales sur la communauté d'espèces observées dans la cage, ce qui permet d'affirmer qu'en plus de ces variables, la « période » affecte également la communauté d'espèces à la baisse. Cependant, pour cette analyse et en fonction des coefficients de détermination, 25% de la variance dans la communauté est expliquée par ces six variables, dont seulement 1% était lié à l'effet de la période (annexe 10). Un mode opératoire ou un entretien de la passe et du barrage différent, entre ces deux périodes, a peut-être pu causer une différence dans la communauté d'espèces, mais de faible ampleur comparée aux autres facteurs en place. Cette analyse demeure toutefois rudimentaire, surtout en raison de la différence importante du nombre de jours de pêche entre les deux

périodes et du peu d'informations liées aux changements suspectés dans l'entretien et l'opération du barrage ou de la cage entre ces deux périodes.

Suggestions

Pour donner suite aux résultats, quatre éléments principaux seront suggérés, dans le but de maximiser l'efficacité de la passe migratoire Vianney-Legendre. Le premier est en lien avec le traitement des données qui sont déjà disponibles. Comme ce travail exclut les données relatives à la levée de la cage effectuée le jour, cela peut entraîner un biais quant à l'évaluation de la communauté d'espèces fréquentant celle-ci. En effet, plusieurs rapports témoignent de l'influence du patron d'activité des espèces (nocturne, diurne, crépusculaire, etc.) sur leur présence et abondance dans la cage de captures (Hatry et coll. 2014; Thiem et coll. 2012). Ainsi, il serait intéressant d'ajouter les données relatives à la deuxième levée de la cage, tout en considérant l'influence du filet dans le bassin 17, afin d'avoir une vision plus complète de la communauté d'espèces fréquentant la passe migratoire Vianney-Legendre.

Deuxièmement, il est suggéré d'étendre la période d'opération de la cage sur toute la saison estivale, afin d'avoir une vision plus complète de la communauté d'espèces fréquentant la passe migratoire. Comme il fut précédemment démontré, selon son mode d'opération actuel (levée de cage couvrant spécifiquement la période de reproduction artificielle du chevalier cuivré), la passe migratoire Vianney-Legendre ne peut servir d'indicateur de tendance de la communauté de poissons fréquentant la cage (figure 4). Étant une infrastructure permettant l'ascension des poissons en amont du barrage de Saint-Ours (avec l'écluse de Saint-Ours dont on ignore l'utilisation par les poissons), pour la majeure partie de la saison estivale, la passe migratoire Vianney-Legendre possède un immense potentiel quant au suivi de l'abondance relative des populations des espèces fréquentant la passe (Dumont et coll. 1997). De plus, l'opération de la cage de mai à septembre, comme il est recommandé dans le manuel d'opération et d'entretien de la passe de Fournier et Desrochers (2009), pourrait également servir de moyen de surveillance des espèces envahissantes qui tenteraient de coloniser le bief amont du barrage. Par exemple, deux carpes de roseau (*Ctenopharyngodon idella*) ont été identifiées dans la passe migratoire, lors de la saison d'opération de la cage de l'année 2023 (Nathalie Vachon, communication personnelle, 2024). La prévention et la surveillance sont cruciales dans la gestion des espèces aquatiques envahissantes et l'opération de la cage de la passe migratoire, durant toute la saison estivale, serait un moyen de prévention et de surveillance efficace, en plus de participer au suivi des espèces de la Richelieu. Il faut cependant

rester conscient que ce moyen serait imparfait, considérant que l'écluse (et le barrage dans certaines conditions hydrologiques) sont aussi des voies de colonisation de la rivière Richelieu.

Troisièmement, il est recommandé de réévaluer l'exactitude du manuel d'opération et d'entretien de la passe en condition de forte hydraulité du fleuve. Comme celui-ci fut conçu en période de faible hydraulité du fleuve, les recommandations émises quant à l'opération de la passe migratoire et du barrage pourraient être inadéquates en période de forte hydraulité (Fournier et Desrochers 2009). Plus particulièrement, il est conseillé d'effectuer une analyse courantologique à l'intérieur de la passe migratoire en période de forte hydraulité du fleuve, comme ce fut effectué par le Groupe conseil Génivar lors des premiers rapports portant sur l'efficacité de la passe (Génivar 2002). Cela permettrait de déterminer l'influence de l'hydraulité du fleuve sur l'ouvrage, en plus d'apporter les correctifs nécessaires aux degrés d'ouverture des vannes de la passe et du barrage s'il y a lieu, afin de maximiser l'efficacité de la passe migratoire. Il a été démontré que certaines espèces de poissons peuvent être très sensibles à la variation des courants à l'extérieur et à l'intérieur de la passe, qui sont également garants de l'efficacité de celle-ci (figure 6). Comme une diminution significative du nombre de captures et de la richesse spécifique globale est observée depuis le début des travaux, il pourrait être plus que bénéfique de réévaluer le mode opératoire de la passe et du barrage, d'autant plus qu'il a été prouvé que les conditions environnementales influencent significativement la communauté d'espèces (figures 1 et 2; annexes 2, 3, 4, 7, 8 et 9). Bien qu'il soit difficile de prédire l'hydraulité du fleuve dans les prochaines années, les prédictions des modèles numériques prenant en considération les changements climatiques projettent une augmentation de l'écart entre les niveaux (hauteur et débits) extrêmes bas et hauts, qui sont présentement recensés dans le fleuve (Cantin et coll. 2021). Face à cette nouvelle réalité, l'évaluation de l'efficacité de la passe migratoire sous toutes les conditions hydrologiques est nécessaire, afin d'effectuer une gestion durable de l'infrastructure.

Finalement, la dernière recommandation est en lien avec l'effet significatif de la période sur la communauté d'espèces (annexe 10). Comme plusieurs dérogations quant à l'entretien et à l'opération du barrage et de la passe migratoire ont été relevées, à partir de 2013 et par rapport à ce qui est inscrit dans le manuel d'opération et d'entretien de celle-ci, il est recommandé de se conformer aux suggestions émises dans le manuel en attendant la réévaluation de celui-ci (Fournier et Desrochers 2009; Vachon 2021 ; Vachon et Sirois 2019). Ces suggestions ont été émises dans le but de maximiser l'efficacité de la passe, en plus de permettre de réduire le bruit relatif à un fonctionnement différent de la passe sur la base

de données. Notamment, Fournier et Desrochers (2009) suggèrent d'effectuer deux nettoyages en période d'opération, dans le but de limiter le colmatage dans la passe migratoire. Il est donc recommandé de se conformer au manuel d'opération de la passe, en plus d'effectuer au moins un nettoyage de celle-ci, en début de saison. Ce nettoyage permettrait de minimiser l'ensablement amené par la crue printanière, qui pourrait influencer l'hydraulicité de la passe migratoire et nuire au déplacement des poissons dans celle-ci.

CONCLUSION

L'évaluation de l'efficacité de la passe migratoire est primordiale, afin de maintenir le rôle de conservation de la passe, en assurant la libre circulation des poissons. Les résultats ont démontré une diminution significative et globale du nombre de captures par unité d'effort, ainsi que de la richesse spécifique totale observée dans la passe depuis le début des travaux (figures 1 et 2, annexes 2 et 3). Actuellement, les données récoltées à la passe migratoire Vianney-Legendre ne permettent pas d'effectuer un suivi exhaustif de la communauté d'espèces fréquentant la passe migratoire, en raison de la période d'échantillonnage trop courte (figures 3, 4 et 5). Toutefois, la dynamique de montaison des quatre espèces majoritaires de la banque de données a pu être analysée. Il s'est avéré que deux fenêtres de migration significativement distinctes l'une de l'autre ont été observées, la première étant caractérisée par les chevaliers (chevalier de rivière, chevalier blanc et chevalier rouge) et la seconde, par la barbue de rivière. Comme les données relatives à la levée de la cage effectuée en fin d'après-midi ont été exclues de la banque de données, la communauté d'espèces présentée dans ce travail pourrait être majoritairement dominée par des espèces nocturnes et crépusculaires, ce qui biaise le portrait que l'on peut tirer de la communauté d'espèces de la passe migratoire. En incorporant ces données, une dynamique de montaison différente pourrait être observée.

Le comportement et l'utilisation de l'habitat par les poissons peuvent être grandement influencés par les conditions environnementales régionales et locales. Effectivement, les variables environnementales semblent avoir exercé un effet important sur la communauté d'espèces observées dans la cage, ce qui se traduit notamment par le passage d'une forte abondance de chevaliers au début des années 2000 vers une croissance marquée de l'abondance de l'achigan à petite bouche et de l'esturgeon jaune dans les années plus récentes de l'inventaire. Bien que les incidences des abondances des stocks de ces espèces et des changements climatiques ne soient pas à exclure dans ce phénomène, les conditions hydrologiques du fleuve Saint-Laurent et de la rivière Richelieu semblent avoir joué un rôle dans ces changements. L'absence de conditions analogues d'hydraulicité du fleuve lors de l'établissement du mode opérationnel de la passe migratoire et du barrage a pu entraîner une altération des conditions hydrologiques recensées à l'intérieur et à l'extérieur de la passe expliquant ce résultat (Dumont et coll. 1997). En effet, cela a pu favoriser le passage de certaines espèces, au détriment des autres. Dans un avenir proche, il serait plus pertinent de réévaluer les conditions hydrologiques dans la passe ainsi que son mode opérationnel, afin de maintenir le précieux rôle de conservation de l'ouvrage dans un des habitats les plus riches en poissons d'eau douce du Québec méridional.

RÉFÉRENCES

- Alofs K. M., Jackson D. A. et Lester N. P. 2013. Ontario freshwater fishes demonstrate differing range-boundary shifts in a warming climate. *Diversity and Distributions*, 20 : 123-136.
- Bernatchez S., Paradis Y., Vachon N., Côté C., Brodeur P et Kameni D. W. 2020. Rapport d'opération du Réseau de suivi ichtyologique (RSI) : Secteur Montréal-Sorel. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Québec, 11 p.
- Bouchard A. et Cantin J.-F. 2015. Suivi de l'état du Saint-Laurent – Évolution des niveaux et débits du fleuve Saint-Laurent. Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Québec, 8 p.
- Cantin J.-F., Gosselin R., Bouchard A., Morin J. et Seglenieks F. 2021. Suivi de l'état du Saint-Laurent – Évolution des niveaux et débits du fleuve Saint-Laurent. Environnement et Changement Climatique Canada, Service météorologique du Canada, Québec, 12 p.
- Chen J., Shi H., Sivakumar B. et Peart M. R. 2016. Population, water, food, energy and dams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56: 18-28.
- Chu C., Minns C. K. et Mandrak N. E. 2003. Comparative regional assessment of factors impacting freshwater fish biodiversity in Canada. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 60: 624-634.
- Comité d'intervention. 1995. Plan d'intervention pour la survie du suceur cuivré (*Moxostoma hubbsi*). Ministère de l'Environnement et de la Faune, direction de la faune et de ses habitats, Québec, dans Dumont P., Leclerc J., Allard J.-D. et Paradis S. 1997. Libre passage des poissons au barrage de Saint-Ours, rivière Richelieu. Ministère de l'Environnement et de la Faune, direction régionale de la Montérégie, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune, direction des ressources matérielles et des immobilisations et ministère du Patrimoine canadien, Québec, 88 p.
- Desrochers D. 2008. Validation de l'efficacité de la passe multiespèces Vianney-Legendre au lieu historique national du Canal-de-Saint-Ours. Milieu inc., pour Parcs Canada, 64 p.
- Dumont P., Leclerc J., Allard J.-D. et Paradis S. 1997. Libre passage des poissons au barrage de Saint-Ours, rivière Richelieu. Ministère de l'Environnement et de la Faune, direction régionale de la Montérégie, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune, direction des ressources matérielles et des immobilisations et ministère du Patrimoine canadien, Québec, 88 p.
- Équipe de rétablissement du chevalier cuivré du Québec. 2012. Plan de rétablissement du chevalier cuivré (*Moxostoma hubbsi*) au Québec — 2012-2017, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Faune Québec, 55 p.
- Fuller M. R., Doyle M. W. et Strayer D. L. 2015. Causes and consequences of habitat fragmentation in river networks. *New York Academy of Sciences*, 1355: 31-51.
- Fournier A. et Desrochers D. 2009. Manuel d'opération et d'entretien des passes à poissons au lieu historique national du Canal-de-Saint-Ours. Milieu inc., pour Parcs Canada, Québec, 58 p.
- Gariépy S. et Vachon N. 2005. Plan de rétablissement du chevalier cuivré (*Moxostoma hubbsi*) 2004-

2008. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, direction du développement de la faune, Québec, 77 p.

Genivar. 2002. Validation de l'efficacité des passes à poissons au lieu historique national du Canal-de-Saint-Ours. Rapport préparé par le Groupe conseil Genivar pour Parcs Canada, 46 p.

Gouvernement du Canada. 2012. Programme de rétablissement du chevalier cuivré (*Moxostoma hubbsi*) au Canada. Pêches et Océans Canada, Ottawa, 64 p.

Gouvernement du Canada. 2014. Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le chevalier cuivré (*Moxostoma hubbsi*) au Canada. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada, Ottawa, 81 p.

Gouvernement du Canada. 2016. Plan de gestion du chevalier de rivière (*Moxostoma carinatum*) au Canada [Proposé]. Série des plans de gestion de la Loi sur les espèces en péril. Pêches et Océans Canada, Ottawa. 51 p.

Gouvernement du Canada. 2024. Graphique des données hydrométriques en temps réel pour Saint-Laurent (Fleuve) à LaSalle (02OA016) [Qc]. Consulté le 11 novembre 2023, https://eau.ec.gc.ca/report/real_time_f.html?stn=02OA016

Gouvernement du Québec. 2023. Suivi hydrologique de différentes stations hydrométriques. Consulté le 11 novembre 2023, <https://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=030401>

Gouvernement du Québec. 2024a. Chevalier de rivière. Consulté le 26 mars 2024, <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/faune/animaux-sauvages-quebec/liste-des-especes-fauniques/chevalier-riviere#c198904>

Gouvernement du Québec. 2024b. Carpe de roseau. Consulté le 27 mars 2024, <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/faune/animaux-sauvages-quebec/liste-des-especes-fauniques/carpe-roseau>

Hatry C., Thiem J. D., Hatin D., Dumont P., Smolorowski K. E. et Cooke S. J. 2014. Fishway approach behaviour and passage of three redhorse species (*Moxostoma anisurum*, *M. carinatum*, and *M. macrolepidotum*) in the Richelieu River, Quebec. Environ. Biol. Fish, 99: 249-263.

Leclerc J. et Vachon N. 2008. Migration des poissons et captures de chevaliers cuivrés dans la passe Vianney-Legendre en 2007 (rivière Richelieu). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, direction de l'aménagement de la faune de l'Estrie, de Montréal et de la Montérégie, Longueuil, 20 p.

Legendre P. et Gallagher E. D. 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. Oecologia, 129 : 271-280.

Magnan P., Brodeur P., Paquin É., Vachon N., Paradis Y., Dumont P. et Mailhot Y. 2022. État du stock de perchaudes du lac Saint-Pierre et du secteur pont Laviolette – Saint-Pierre-les-Becquets en 2021. Comité scientifique sur la gestion de la perchaude du lac Saint-Pierre, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 49 p.

Miller R. R., Williams J. D. et Williams J. E. 1989. Extinctions of North American fishes during the past

century. Fisheries, 14: 22-38.

Pelicie F. M. et Agostinho A. A. 2008. Fish-passage facilities as ecological traps in large neotropical rivers. Conservation Biology, 22: 180-188.

Poulin R. 1995. Rivière Richelieu - Analyse des conditions hydrauliques au niveau du barrage Saint-Ours lors de la crue printanière. Ministère de l'Environnement et de la Faune, direction de l'hydraulique, Québec, dans Dumont P., Leclerc J., Allard J.-D. et Paradis S. 1997. Libre passage des poissons au barrage de Saint-Ours, rivière Richelieu. Ministère de l'Environnement et de la Faune, direction régionale de la Montérégie, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune, direction des ressources matérielles et des immobilisations et ministère du Patrimoine canadien, Québec, 88 p.

Rahel F. J. et McLaughlin R. L. 2020. Selective fragmentation and the management of fish movement across anthropogenic barriers. Ecological Applications, 28(8) : 2066-2081.

R Core Team. 2023. The R Project for Statistical Computing (version 4.3.2). <https://www.r-project.org/>

Shields A. 2023. Des carpes asiatiques aperçues dans la rivière Richelieu. Le Devoir, Montréal.

Simoneau M. et Thibault G. 2009. État de l'écosystème aquatique du bassin versant de la rivière Richelieu : faits saillants 2005-2007. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, direction du suivi de l'état de l'environnement, Québec, 23 p.

Thiem J. D., Binder T. R., Dumont P., Hatin D., Hatry C., Katopodis C., Stamplecoskie K. M. et Cooke S. J. 2012. Multispecies fish passage behaviour in a vertical slot fishway on the Richelieu River, Quebec, Canada. River Research and Applications, 29: 582-592.

Vachon N. 2018. Reproduction artificielle, suivi du recrutement et recherche de subadultes de chevalier cuivré (*Moxostoma hubbsi*) en 2011. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, direction de la gestion de la faune de l'Estrie, de Montréal, de la Montérégie et de Laval, Longueuil, 32 p.

Vachon N. et Sirois C. 2019. Reproduction artificielle, ensemencements et suivi de la population du chevalier cuivré (*Moxostoma hubbsi*) en 2014. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, direction de la gestion de la faune de l'Estrie, de Montréal, de la Montérégie et de Laval, Rapport technique 16-54, 18 p.

Vachon N. 2010. Reproduction artificielle, ensemencements et suivi du recrutement du chevalier cuivré en 2009. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Unité de gestion des ressources naturelles et de la faune de Montréal-Montérégie, Longueuil, Rapp. tech., 28 p.

Vachon N. 2011. Reproduction artificielle, ensemencements et suivi de la population du chevalier cuivré (*Moxostoma hubbsi*) en 2017. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, direction de la gestion de la faune de l'Estrie, de Montréal, de la Montérégie et de Laval, Secteur des opérations régionales, Rapport technique 16-56, 44 p.

Vachon N. 2021. Reproduction artificielle, ensemencements et suivi de la population du chevalier cuivré (*Moxostoma hubbsi*) en 2019. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, direction de la gestion de la faune de l'Estrie, de Montréal, de la Montérégie et de Laval, Rapport technique 16-58, 37 p.

Venturelli P. A., Lester N. P., Marshall T. R. et Shuter B. J. 2010. Consistent patterns of maturity and density-dependent growth among populations of walleye (*Sander vitreus*): application of the growing degree-day metric. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 67: 1057-1067.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des espèces de poisson exclues de la banque de données de la passe migratoire Vianney-Legendre en raison de leur taille.

Espèces	Code	Nombre
Baret	MOAM	7
Crapet de roche	AMRU	12
Cyprinidés	CYPR	420
Laquaiche argentée	HITE	582
Méné d'argent	HYRE	16
Lamproie argentée	ICUN	42
Méné émeraude	NOAT	594
Méné ou queue à tache noire	NOHU	10
Méné paille ou pâle	NOSV	13
Méné ventre-pourri	PINO	13

Annexe 2 : Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) effectuée sur le nombre de captures par unité d'effort (CPUE) effectué dans la passe migratoire Vianney-Legendre et en fonction des années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

CPUE (h)					
Variable	Df	Sum sq	Mean sq	Fvalue	p
Années	9	83,3	9,255	8,144	1,58E-09
Résidus	130	147,7	1,136		

Annexe 3 : Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) effectuée sur le nombre d'espèces capturé dans la passe migratoire Vianney-Legendre et en fonction des années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

Richesse spécifique (h)					
Variable	Df	Sum sq	Mean sq	Fvalue	p
Années	9	1,471	0,1635	15,68	<2E-16
Résidus	130	1,355	0,0104		

Annexe 4 : Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) du nombre de captures par unité d'effort (CPUE), par heure, pour chacune des quatre espèces majoritaires de l'échantillonnage (ICPU, MOAN, MOCA et MOMA) capturées dans la passe migratoire Vianney-Legendre lors des années d'opération de la cage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

CPUE (h)					
Espèces	Df	Sum Sq	Mean Sq	Fvalue	p
ICPU	9	9061	1006,8	14,08	1,08E-15
Résidus	131	9365	71,5		
MOCA	9	2211	245,66	3,934	0,000187
Résidus	131	8179	62,44		
MOAN	9	1888	209,75	5,546	1,83E-06
Résidus	131	4954	37,82		
MOMA	9	1338	148,62	4,233	7,87E-05
Résidus	131	4599	35,11		

Annexe 5 : Périodes d’opération de la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre (début et fin) associées à la valeur des degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC), en fonction des années.

Années	Début des travaux	DJC début	Dernière journée des travaux	DJC fin
2007	12-juin	378	24-juin	578
2009	10-juin	379	26-juin	619
2010	01-juin	314	24-juin	648
2011	25-mai	139	23-juin	484
2012	29-mai	291	20-juin	640
2013	29-mai	297	25-juin	627
2014	10-juin	361	11-juin	376
2017	08-juin	313	26-juin	585
2018	05-juin	328	27-juin	653
2019	13-juin	307	02-juil	576
Moyenne :	04-juin	310,7	23-juin	578,6

Annexe 6 : Résultats de l'analyse post-hoc Tukey HSD issue d'une analyse de variance (ANOVA) de l'abondance des espèces en fonction des degrés-jour de croissance au-dessus de 5° Celsius (DJC) pour les années d'opération de la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

DJC		
Espèces	<i>upr</i>	<i>p</i>
MOAN-ICPU	-73,31	0,0000
MOCA-ICPU	-77,6	0,0000
MOMA-ICPU	-59,7	0,0000
MOCA-MOAN	17,76	0,991
MOMA-MOAN	35,17	0,4028
MOMA-MOCA	35,93	0,2004

Annexe 7 : Résultats de l'analyse de variance multivariée (MANOVA) montrant les effets des conditions environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et DJC au-dessus de 5° Celsius) sur le taux de captures par unité d'effort (CPUE) recensé par heure dans la cage de capture de la passe migratoire Vianney-Legendre pour la période d'échantillonnage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

CPUE (h)					
Variables	Df	Sum sq	Mean sq	Fvalue	p
Débit rivière	1	23,36	23,36	20,804	1,14E-05
Hauteur rivière	1	15,26	15,26	13,592	3,29E-04
Hauteur fleuve	1	11,52	11,52	10,259	1,70E-03
Débit fleuve	1	0,12	0,12	0,109	0,74191
DJC	1	30,29	30,29	26,972	7,49E-07
Résidus	134	150,48	1,123		

Annexe 8 : Résultats de l'analyse de variance multivariée (MANOVA) montrant les effets des conditions environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et DJC au-dessus de 5° Celsius) sur la richesse spécifique recensée par heure dans la cage de capture de la passe migratoire Vianney-Legendre pour la période d'échantillonnage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

Richesse spécifique (h)					
Variables	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Débit rivière	1	0,62596	0,62596	61,669401	1,163E-12
Hauteur rivière	1	0,33279	0,33279	32,786194	6,455E-08
Hauteur Fleuve	1	0,07421	0,07421	7,3107245	0,0077434
Débit Fleuve	1	0,09729	0,09729	9,5847794	0,0023896
DJC	1	0,33571	0,33571	33,073627	5,733E-08
Résidus	134	1,36014	0,01015		

Annexe 9 : Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) montrant la significativité des cinq variables environnementales utilisées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC)) dans l'analyse de redondance (RDA) de type 2.

Communauté d'espèces				
Variables	Df	Variance	F	p
Débit rivière	1	0,0237	6,7632	0,000999
Hauteur rivière	1	0,0124	4,2098	0,000999
Hauteur fleuve	1	0,0133	3,7796	0,000999
Débit fleuve	1	0,0367	10,4584	0,000999
DJC	1	0,0469	13,3612	0,000999
Résidus	134	0,4701		

Annexe 10 : Résultats de l'analyse multivariée permutational de la variance (PERMANOVA) montrant l'effet de la période (2007 à 2012 et 2013 à 2019) et des cinq variables environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et degrés-jour de croissance au-dessus de 5 degrés Celsius (DJC)) sur la communauté d'espèces recensée dans la cage de la passe migratoire Vianney-Legendre pour la période d'inventaire (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

Communauté d'espèces					
Variables	Df	SumOfSqs	R2	F	Pr(>F)
DJC	1	2,9286	0,0654	11,5627	0,001
Débit fleuve	1	3,5650	0,0796	14,0751	0,001
Période	1	0,5707	0,0127	2,2533	0,016
Débit rivière	1	1,6995	0,0380	6,7101	0,001
Hauteur rivière	1	0,9416	0,0210	3,7176	0,001
Hauteur fleuve	1	1,3705	0,0306	5,4109	0,001
Résidus	133	33,687	0,753		
Total	139	44,762	1		

Annexe 11 : Résultats de l'analyse de variance multivariée (MANOVA) montrant les effets des conditions environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et DJC au-dessus de 5° Celsius) et de la période (2007 à 2012 et 2013 à 2019) sur le nombre de captures par unité d'effort (heure) recensé dans la cage de capture de la passe migratoire Vianney-Legendre pour la période d'échantillonnage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

CPUE (h)					
Variables	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Débit rivière	1	23,3623	23,3623	20,6488	1,23E-05
Hauteur rivière	1	15,2636	15,2636	13,4908	0,000346
Hauteur fleuve	1	11,5209	11,5209	10,1827	0,001769
Débit fleuve	1	0,1223	0,1223	0,1081	0,742843
DJC	1	30,2882	30,2882	26,7703	8,24E-07
Période	1	0,0004	0,0004	0,0004	0,984381
Résidus	133	150,4776	1,1314		

Annexe 12 : Résultats de l'analyse de variance multivariée (MANOVA) montrant les effets des conditions environnementales testées (débit de la rivière, hauteur de la rivière, hauteur du fleuve, débit du fleuve et DJC au-dessus de 5° Celsius) et de la période (2007 à 2012 et 2013 à 2019) sur la richesse spécifique recensée par heure dans la cage de capture de la passe migratoire Vianney-Legendre pour la période d'échantillonnage (2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018 et 2019).

Richesse spécifique (h)					
Variables	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Débit rivière	1	0,6260	0,6260	61,2338	1,4E-12
Hauteur rivière	1	0,3328	0,3328	32,5546	7,19E-08
Hauteur fleuve	1	0,0742	0,0742	7,2591	0,007964
Débit fleuve	1	0,0973	0,0973	9,5171	0,002477
DJC	1	0,3357	0,3357	32,8400	6,39E-08
Période	1	0,0005	0,0005	0,0536	0,817267
Résidus	133	1,3596	0,0102		