

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

FRAGMENTATION DE L'HABITAT DU SAUMON ATLANTIQUE (*SALMO SALAR*) PAR LES PONCEAUX ROUTIERS ET FORESTIERS

Par
Rosemarie Gagnon-Poiré

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe	Pascale Biron Département de géographie, urbanisme et environnement Université Concordia
Examineur interne	Richard Martel INRS-ETE
Directeur de recherche	Normand Bergeron INRS-ETE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, le professeur Normand Bergeron, pour m'avoir fait confiance et permis de faire ce projet très formateur par lequel j'ai énormément appris. Son appui, son encadrement et sa créativité tout au long de mon cheminement m'ont été indispensables. Merci également aux nombreux partenaires financiers qui ont contribué à la réalisation du projet : le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, le programme Mitacs Accélération et la Fondation pour la conservation du saumon atlantique, qui m'a gracieusement accueilli dans ses bureaux de Frédéricton lors d'un stage.

Je tiens à remercier les personnes qui m'ont accordé leur précieuse aide avec tant de persévérance lors des travaux de terrain : Maude Sévigny, Marie-Camille St-Amour, Joanie Carrier et Jean-Philippe Lord. Un merci tout spécial aux spécialistes de la télémétrie PIT qui m'ont initié sur le terrain : Francis Bérubé, Pierre-Marc Constantin et Piyush Rai (a.k.a. Monsieur joie de vivre).

Un grand merci à Marc-Antoine Allard de la Société Cascapédia pour l'hébergement au chalet du lac Huard et pour m'avoir fait découvrir la magnifique Grande Cascapédia. Je suis très reconnaissante envers Elsa Goerig pour ses judicieux conseils, Danielle Frechette pour son aide avec l'appivoisement de R et André St-Hilaire pour le prêt de matériel ainsi que son aide avec les notions de statistiques. Je voudrais aussi remercier tous les membres du labo Bergeron et André Boivin qui fait de la station de recherche de Sacré-Coeur, un endroit si agréable où travailler.

Finalement, je voudrais dire merci à mes parents de m'avoir encouragé dans la poursuite de mes études et à mon amoureux pour son soutien indéfectible, nos discussions et ses nombreux encouragements.

RÉSUMÉ

Cette étude mesure l'impact des ponceaux sur la fragmentation de l'habitat du saumon atlantique (*Salmo salar*) juvénile. La classification de 126 ponceaux avec un filtre statique indique que les ponceaux potentiellement infranchissables pour les salmonidés juvéniles sont présents en grande proportion à travers les bassins versants des quatre rivières inventoriées. Nous avons procédé aux suivis des déplacements de 189 saumons marqués avec des transpondeurs passifs (12 mm) à travers sept ponceaux en tenant compte de leur morphométrie et des conditions hydrauliques. La télémétrie fixe installée dans les ponceaux s'est avérée plus efficace que le suivi de part et d'autre des ponceaux des poissons marqués avec des antennes portables. Les poissons n'ayant pas effectué de tentatives sont significativement plus petits. Ceux mesurant entre 60 et 69 mm ont eu la plus faible réussite de passage (15,6%). Le pourcentage de poissons détectés est expliqué à 57% par la distance à parcourir et la vitesse de l'écoulement selon le modèle prédictif développé. Un test de personnalité réalisé sur 300 saumons démontre que les petits individus seraient plus audacieux. Cette prise de risque est probablement attribuable à la croissance rapide nécessaire à la survie individuelle. Ces travaux apportent de nouvelles connaissances sur la fragmentation de l'habitat du saumon atlantique par les ponceaux.

Mots clés : Saumon atlantique juvénile ; ponceaux ; fragmentation d'habitat ; télémétrie passive ; classification des ponceaux ; modèle prédictif du succès de passage ; comportement exploratoire.

ABSTRACT

This study measures the impact of culverts on the fragmentation of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) habitat. The classification based on a coarsened filter of 126 culverts indicates that potentially impassable culverts for juvenile salmonids are present largely across the watersheds of the four rivers inventoried. We monitored the movements of 189 salmon marked with passive transponders (12 mm) through seven culverts, taking into account their morphometry and hydraulic conditions. Fixed telemetry installed in culverts proved to be more effective than the tracking on both sides of the fish culverts marked with portable antennas carried out. Fishes that did not make attempts were significantly smaller. Those measuring between 60 and 69 mm had the lowest passing success (15.6 %). The percentage of fish detected is explained at 57 % by the distance to be travelled and the flow velocity according to the predictive model developed. A personality test performed on 300 salmons shows that small individuals would be more audacious. This risk-taking is probably due to the rapid growth necessary for individual survival. This work provides new insights into the fragmentation of Atlantic salmon habitat by culverts.

Key words: Juvenile Atlantic salmon; culverts, habitat fragmentation; passive telemetry; culvert classification; predictive model of passing success; exploratory behavior.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VII
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 MISE EN CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	1
1.2 HYPOTHESE ET OBJECTIFS DU PROJET.....	4
2 REVUE DE LITTÉRATURE ET CONCEPTS CLES	7
2.1 LES BESOINS EN DEPLACEMENTS DES SALMONIDES JUVENILES EN RIVIERE	7
2.2 LA FRAGMENTATION DES HABITATS PAR LE PONCEAU.....	8
2.3 CAPACITE ET COMPORTEMENT DE NAGE DES SALMONIDES.....	9
2.4 MODELES EXISTANTS POUR L'EVALUATION DU SUCCES DE PASSAGE.....	10
2.5 RECOMMANDATIONS EXISTANTES RELATIVES A L'AMENAGEMENT DES PONCEAUX.....	11
3 PORTRAIT DE LA PROBLEMATIQUE DE LA FRAGMENTATION DE L'HABITAT DU SAUMON JUVENILE PAR LES PONCEAUX SUR LE TERRITOIRE QUEBECOIS	15
3.1 INTRODUCTION	15
3.2 METHODOLOGIE	15
3.2.1 <i>Site d'étude</i>	15
3.2.2 <i>Inventaire cartographique</i>	16
3.2.3 <i>Caractérisation des ponceaux</i>	16
3.2.4 <i>Classification des ponceaux</i>	18
3.2.5 <i>Estimation de la perte d'habitats potentielle</i>	19
3.3 RESULTATS.....	20
3.3.1 <i>Classification des ponceaux</i>	20
3.3.2 <i>Estimation de la perte d'habitats potentielle</i>	21
3.4 DISCUSSION.....	23
3.4.1 <i>Implications de gestion</i>	24
4 DEVELOPPEMENT D'UN MODELE PREDICTIF DE PASSAGE DES SAUMONS JUVENILES A TRAVERS LES PONCEAUX.....	27
4.1 INTRODUCTION	27
4.2 METHODOLOGIE : MARQUAGE-LOCALISATION	28
4.2.1 <i>Site d'étude</i>	28
4.2.2 <i>Collecte et marquage des poissons</i>	28

4.2.3	<i>Suivi des déplacements des poissons sur le site d'étude</i>	31
4.2.4	<i>Validation de la technique de balayage</i>	33
4.2.5	<i>Suivi des variables hydrauliques</i>	34
4.1	ÉVALUATION DE LA METHODE DE MARQUAGE-LOCALISATION	34
4.2	AMELIORATION DE LA METHODOLOGIE DE SUIVI DES DEPLACEMENTS	36
4.3	L'IMPORTANCE DE LA PENTE DU PONCEAU	37
4.4	METHODOLOGIE : MARQUAGE-SUIVI EN CONTINU	37
4.4.1	<i>Site d'étude</i>	37
4.4.2	<i>Collecte et marquage des poissons</i>	38
4.4.3	<i>Essais de passage en cage</i>	39
4.4.4	<i>Efficacité de détection des antennes fixes</i>	42
4.4.5	<i>Calcul de l'indice d'effort</i>	42
4.4.6	<i>Suivi des variables hydrauliques</i>	43
4.5	RESULTATS	45
4.5.1	<i>Profil des ponceaux</i>	45
4.5.2	<i>Efficacité de détection des antennes fixes</i>	48
4.5.3	<i>Essais de passage</i>	49
4.5.4	<i>Modèle prédictif de passage des poissons</i>	55
4.6	DISCUSSION	59
5	COMPORTEMENT EXPLORATOIRE DU SAUMON JUVENILE : LE ROLE DE LA PERSONNALITE	63
5.1	INTRODUCTION	63
5.2	METHODOLOGIE	63
5.2.1	<i>Site d'étude</i>	63
5.2.2	<i>Protocole expérimental</i>	64
5.3	RESULTATS	65
5.4	DISCUSSION	71
5.4.1	<i>Comparaison des échantillons des deux rivières</i>	72
6	CONCLUSION	74
7	REFERENCES	77
8	ANNEXES	85

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 : Différents types de ponceaux : en béton armé en forme d'arche (A), de boîte (B) ou circulaire (C) ; circulaire en tôle ondulée galvanisée simple (D) ou multiple (E) ; rectangulaire en bois (F).1

Figure 1. 2 : Exemples de conditions pouvant rendre le ponceau partiellement ou complètement infranchissable par le poisson : la constriction du cours d'eau (A) ; la présence d'une chute située à l'extrémité aval du ponceau (B); l'obstruction du ponceau par des débris végétaux et/ou des sédiments (C), vitesse de l'écoulement excessive (D).3

Figure 2. 1 : Schématisation de l'exploitation des différents habitats complémentaires et des schèmes migratoires lors du cycle vital d'un poisson de rivière tiré de Schlosser (1991). 7

Figure 3. 1 : Schéma transversal d'un ponceau exposant les points d'élévations mesurés avec l'altimètre (P_1 et P_2 correspondent respectivement à l'élévation à l'entrée et à la sortie du ponceau, SEA correspond à l'élévation de la surface de l'eau à l'aval du ponceau, PPP correspond au point le plus profond de la fosse en aval du ponceau et P_3 correspond à l'élévation du seuil en aval du ponceau).17

Figure 3. 2 : Organigramme décisionnel du modèle prédictif du succès de passage des salmonidés juvéniles développé par Coffman (2005) qui classe les ponceaux en trois catégories (franchissable, infranchissable ou indéterminé) en fonction de leurs paramètres physiques (la présence de substrat naturel dans la conduite, le retour d'eau dans la conduite, la hauteur du seuil en aval du ponceau, la pente du ponceau et sa longueur).19

Figure 3. 3 : Synthèses de la classification des ponceaux inventoriés pour chaque bassin versant (Grande Cascapédia, $n=27$; Sainte-Marguerite, $n=13$; Matapédia, $n=80$; Patapédia, $n=6$) en 2014 d'après le modèle prédictif du succès de passage des salmonidés juvéniles de Coffman (2005).21

Figure 4. 1 : Séance de pêche à l'électricité.29

Figure 4. 2 : Transpondeur passif de 12 mm utilisé pour le marquage des poissons.30

Figure 4. 3 : Position du transpondeur dans la cavité péritonéale du poisson.30

Figure 4. 4 : Balayage du cours d'eau avec l'antenne portable.31

Figure 4. 5 : Représentation schématique des sections d'un site d'étude : R_p = zone de relâche des poissons du groupe ponceau (encadré rouge, longueur : 10 m) ; R_T = zone de relâche des poissons du groupe témoin (encadré violet, longueur : 10 m); P = ponceau (Rectangle gris ligné) ; FP = zone du cours d'eau non perturbé de la même longueur que le ponceau correspondant au faux ponceau (encadré pointillé noir) ; B_p = Zone de balayage du groupe ponceau (encadré pointillé rouge, comprend R_p , P et 50m en amont) ; B_T = Zone de balayage du groupe témoin (encadré pointillé mauve, comprennent R_T , FP et 50 m en amont). (Inspirée de la figure 2.3 dans Coffman 2005). ..32

Figure 4. 6 : (A) Cage de rétention fixée en aval de la conduite . (B) Antenne posée au-dessus de l'eau dans un ponceau. (C) Schéma d'un système d'antennes PIT stationnaires (A1-A4) déployées dans un ponceau adapté de Goerig et al. (2016). La flèche bleue indique le sens de l'écoulement du cours d'eau.40

<i>Figure 4. 7 : Schéma des points de mesure de la largeur de l'écoulement, de la profondeur et de la vitesse moyenne mesurée au centre de la conduite à l'extrémité amont, à l'extrémité aval et à chaque deux mètres avec le courantomètre à hélice.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 4. 8 : Profil longitudinal des conduites du site Morin illustrant l'élévation du fond (ligne grise), la surface de l'eau (ligne bleue) et la vitesse moyenne de l'écoulement (ligne noire) à chaque mètre, à partir de l'aval. La position des antennes est indiquée par les lignes verticales pointillées.</i>	<i>46</i>
<i>Figure 4. 9 : Profil longitudinal des conduites du site NE-01 illustrant l'élévation du fond (ligne grise), la surface de l'eau (ligne bleue) et la vitesse moyenne de l'écoulement (ligne noire) à chaque mètre, à partir de l'aval. La position des antennes est indiquée par les lignes verticales pointillées.</i>	<i>47</i>
<i>Figure 4. 10 : Profil longitudinal des conduites du site NE-02 illustrant l'élévation du fond (ligne grise), la surface de l'eau (ligne bleue) et la vitesse moyenne de l'écoulement (ligne noire) à chaque mètre, à partir de l'aval. La position des antennes est indiquée par les lignes verticales pointillées.</i>	<i>48</i>
<i>Figure 4. 11 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des poissons de la rivière Sainte-Marguerite pour la branche principale (n=90) et la branche nord-est (n=99) ayant participé aux essais de passage effectués à l'été 2016.</i>	<i>52</i>
<i>Figure 4. 12 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des poissons de la rivière Sainte-Marguerite ayant participé aux essais de passage effectués à l'été 2016 divisé par branche (Nord-est ; n=99 et Principale ; n=90).</i>	<i>52</i>
<i>Figure 4. 13 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des poissons ayant participé aux essais de passage effectués à l'été 2016 selon leur détection (Non détectés ; n=76 et détectés ; n=113). Les poissons non détectés sont ceux demeurés dans la cage durant toute la durée de l'essai qui n'ont pas fait de tentative.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 4. 14 : Pourcentage de poissons détectés aux antennes prédit par le modèle (ligne bleue) par rapport aux données obtenues lors des essais de passage de 2016 (bâtonnets rouge).....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 5. 1 : Schéma de la position du poisson dans l'abri artificiel (tuyau de thermoplastique dont une extrémité est bouchée) lors du test de personnalité (A). Le poisson est placé le museau vers la sortie du tube et son temps de sortie complet est chronométré. Image subaquatique du test de personnalité (B).</i>	<i>65</i>
<i>Figure 5. 2 : Distribution de taille des poissons de la rivière Grande Cascapédia (n=170) et de la rivière Sainte-Marguerite (n=130) ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015.</i>	<i>67</i>
<i>Figure 5. 3 : Distribution du temps de sortie du tube (s) des poissons (n=300) ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 5. 4: Temps de sortie du tube (s) des poissons (n=300) ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015 en fonction de la longueur à la fourche (mm).</i>	<i>69</i>

Figure 5. 5 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des saumons juvéniles ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015 en fonction du type de personnalité.....70

Figure 5. 6 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des saumons juvéniles ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015 en fonction du type de personnalité pour chaque rivière.70

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 3. 1 : Longueurs, superficies et superficies potentiellement inaccessibles combinées des cours d'eau en amont des sites d'étude (n=104) comprenant les ponceaux inventoriés en 2014 dans quatre bassins versants (Grande Cascapédia, n=27; Sainte-Marguerite, n=13; Matapédia, n=80; Patapédia, n=6) d'après le modèle prédictif du succès de passage des salmonidés juvéniles de (Coffman, 2005).</i>	22
<i>Tableau 4. 1 : Localisation et caractéristiques des sites d'étude (n=7) des travaux de terrain de 2016.</i>	38
<i>Tableau 4. 2 : Caractéristiques morphologiques des poissons marqués (n= 189).</i>	39
<i>Tableau 4. 3 : Caractéristiques des essais de passage (n=7) effectués en 2016.</i>	41
<i>Tableau 4. 4 : Valeurs de dispersion des variables hydrauliques de l'écoulement dans les ponceaux pendant les essais de passage (n=7) effectués à l'été 2016. Les variables relatives à la vitesse de l'écoulement (*) proviennent de mesures ponctuelles effectuées au temps 0 des essais. L'écart-type est présenté entre parenthèses.</i>	44
<i>Tableau 4. 5 : Efficacité de détection des antennes pendant les essais. L'antenne 4 correspond au point de référence pour le calcul de l'efficacité de détection des autres antennes.</i>	49
<i>Tableau 4. 6 : Progression maximale de chaque poisson marqué l'été 2016 (n=189), selon leur détection, tous essais confondus.</i>	49
<i>Tableau 4. 7 : Caractéristiques morphologiques des poissons marqués (n= 189) et répartition des classes de tailles pour les 7 essais de passage (7).</i>	51
<i>Tableau 4. 8 : Détections à chaque antenne en termes de progression maximale des poissons marqués (n=189) et répartition des classes de tailles par essais de passage</i>	53
<i>Tableau 4. 9 : Réussite de passage par classes de taille des poissons marqués (n=189) ayant participé aux essais de passage effectués à l'été 2016.</i>	55
<i>Tableau 4. 10 : Matrice de corrélation de Spearman des paramètres considérés pour la conception du modèle prédictif de passage des poissons à travers les ponceaux. Les corrélations significatives ($p \leq 0,05$) sont en gras.</i>	56
<i>Tableau 5. 1 : Plages de mesures des caractéristiques morphologiques des poissons ayant participé au test de personnalité (n=300) effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015. La valeur entre parenthèses représente la médiane de l'étendue des mesures.</i>	66

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

Les activités humaines perturbent l'aire d'habitat de nombreuses espèces animales. Entre autres, le réseau routier contribue à l'isolement et aux confinements de plusieurs populations. Pour remédier à ce problème, plusieurs mesures ont été mises en place pour permettre les déplacements des animaux d'une zone d'habitat à l'autre, notamment les passages à faune aménagés lors de la réfection de la route 175 pour la circulation de la grande faune afin de diminuer les risques d'accident de la route (Dussault *et al.*, 2005). Pour ce qui est de la faune aquatique, diverses formes de ponceaux sont réparties sur le territoire québécois (figure 1.1) pour permettre l'écoulement des petits cours d'eau sous les routes d'une part, mais aussi le libre déplacement des poissons.



Figure 1. 1 : Différents types de ponceaux : en béton armé en forme d'arche (A), de boîte (B) ou circulaire (C) ; circulaire en tôle ondulée galvanisée simple (D) ou multiple (E) ; rectangulaire en bois (F).

Cela dit, les ponceaux sont conçus pour résister aux débits élevés des périodes de crue, mais leur passabilité pour les différentes espèces de poissons demeure incertaine (Gibson *et al.*, 2005). Bien que ce type de traverse de cours d'eau soit peu coûteuse, ces traverses peuvent constituer des obstacles au déplacement des poissons. Par exemple lorsque les conditions hydrauliques associées à la vitesse de l'écoulement, la pente et la longueur du ponceau excèdent la capacité de nage des poissons (Warren *et al.*, 1998, Coffman, 2005, Burford *et al.*, 2009, Poplar-Jeffers *et al.*, 2009) (figure 1.2). De plus, une faible profondeur d'eau dans le ponceau peut empêcher le poisson d'y nager librement (Lapointe *et al.*, 2004). Aussi, une chute d'eau située à l'extrémité aval du ponceau peut excéder la capacité de saut du poisson (Park *et al.*, 2008). Pareillement, la baisse de luminosité à l'intérieur du ponceau et son obstruction par des débris végétaux et/ou des sédiments pourraient contraindre le passage du poisson. L'installation inadéquate ou le manque d'entretien (Kemp *et al.*, 2010, Lacombe *et al.*, 2016) ainsi que le type de matériaux de conception peuvent également avoir un impact sur sa perméabilité (Goerig *et al.*, 2016). Par exemple, la rugosité d'un ponceau en tôle ondulée galvanisée (TTOG) est plus grande qu'un ponceau en béton lisse, ce qui influence grandement la vitesse de l'écoulement. Les traverses de cours d'eau qui constitueraient un obstacle pour les salmonidés ont un impact sur la densité de poisson en l'amont et l'aval de la structure (Pépino *et al.*, 2012). En plus, l'apport en sédiments fins généré par la construction et la présence de ponceau à l'intersection d'un cours d'eau et d'une route augmente la charge sédimentaire directement en aval du cours d'eau, ce qui peut affecter la survie des poissons et dégrader un habitat de qualité (Wellman *et al.*, 2000, Wheeler *et al.*, 2005).



Figure 1. 2 : Exemples de conditions pouvant rendre le ponceau partiellement ou complètement infranchissable par le poisson : la constriction du cours d'eau (A) ; la présence d'une chute située à l'extrémité aval du ponceau (B); l'obstruction du ponceau par des débris végétaux et/ou des sédiments (C), vitesse de l'écoulement excessive (D).

L'installation des ponceaux sur le territoire public est régie par le «Règlement sur les normes d'intervention forestière dans les forêts du domaine public» (RNI), article 171 de la «Loi sur les forêts» instaurée par le Ministère des Ressources Naturelles en 1996. Dans une perspective de développement durable, ce règlement a été révisé pour devenir le Règlement sur l'aménagement durable des forêts (RADF) dont l'entrée en vigueur est prévue pour 2017. Les ponceaux sont par ailleurs soumis aux exigences de la « Loi sur les Pêches » de Pêches et Océans Canada qui vise la protection de l'habitat du poisson.

Au Québec, le saumon atlantique est présent dans 118 rivières, ce qui totalise seulement deux pour cent des rivières de la province (Bergeron, 2016). En plus de favoriser le maintien du saumon, il va s'en dire que les efforts de conservation pour préserver cette espèce favorisent le maintien du levier économique durable régionale qu'est la pêche sportive du saumon atlantique (Bergeron, 2016). Au Québec, on dénombre 15 000 pêcheurs de saumon et les activités de cette pêche sportive génèrent des retombées économiques annuelles qui s'élève à 50 millions de dollars (MFFP, 2016). Le saumon atlantique est l'espèce faunique la plus lucrative de la province en termes de jour/pêche (Ecotec-MFFP, 2014).

Vu l'omniprésence des ponceaux sur le territoire routier et forestier, il est essentiel de pallier au manque de connaissances sur l'effet de barrière causé par les ponceaux

(Fontes *et al.*, 2012, Olsen *et al.*, 2013) en lien avec l'habitat du saumon atlantique juvénile pour la conservation de l'espèce.

1.2 Hypothèse et objectifs du projet

Bien que les ponceaux soient des infrastructures hydrauliquement fiables, leurs morphométries font en sorte que certains d'entre eux constituent un obstacle pour le saumon atlantique juvénile et ainsi participent au phénomène de fragmentation des habitats fluviaux dans les rivières québécoises. Selon notre hypothèse, il serait possible de déterminer des gammes de valeurs pour les caractéristiques physiques d'intérêt des ponceaux qui indiquerait le degré de perméabilité d'une conduite selon un modèle prédictif de succès de passage.

L'objectif global de ce projet est de mesurer l'impact des ponceaux routiers et forestiers sur la fragmentation de l'habitat du saumon atlantique juvénile dans les bassins versants des rivières du Québec.

Les objectifs spécifiques de l'étude se détaillent ainsi :

- 1) Dresser un portrait de la problématique de la fragmentation de l'habitat du saumon juvénile par les ponceaux dans quatre rivières à saumon du Québec en utilisant le filtre statique de Coffman (2005)
- 2) Développer un modèle prédictif simple permettant de prédire la franchissabilité d'un ponceau par le saumon juvénile à partir de variables statiques faciles à mesurer sur le terrain (e.g. longueur, pente).
- 3) Évaluer le rôle que pourrait jouer la personnalité en lien avec le comportement exploratoire des poissons lorsqu'ils sont confrontés à un obstacle.

À notre connaissance, ce projet de recherche est le premier à se concentrer spécifiquement sur la fragmentation de l'habitat du saumon atlantique juvénile par les ponceaux dans le contexte des rivières du Québec. Dans ce mémoire, l'état des connaissances sur cet enjeu sera d'abord présenté dans le chapitre 2. Les chapitres 3,

4 et 5 présentent les différents aspects du projet, respectivement la caractérisation et classification avec un filtre statique d'un échantillon de ponceaux inventoriés sur le réseau hydrographique de 4 rivières à saumon du Québec, une étude de suivi télémétrique des déplacements de saumons juvéniles à travers les ponceaux dans le but de concevoir un modèle prédictif de succès de passage et finalement un test évaluant le comportement exploratoire de l'espèce qui souligne le rôle de la personnalité dans la prise de décision des poissons lorsqu'ils sont confrontés à un obstacle. Les résultats de cet ambitieux projet sont un apport aux connaissances globales en ce qui a trait à la fragmentation d'habitat des poissons anadromes comme le saumon atlantique occasionnée par les ponceaux et pourront servir à orienter les futures décisions d'aménagements et de gestion du réseau hydrographique des rivières du Québec.

2 REVUE DE LITTÉRATURE ET CONCEPTS CLÉS

2.1 Les besoins en déplacements des salmonidés juvéniles en rivière

Les déplacements et les migrations sont des réponses comportementales liées aux changements physiologiques ou à la variation des conditions environnementales (Erkinaro *et al.*, 2017). Au cours de leur cycle vital, les salmonidés ont besoin de combler différents besoins, tels s'alimenter, se réfugier et se reproduire. Pour ce faire, les poissons doivent être en mesure de se déplacer ou de migrer d'une aire d'habitat spécialisée à l'autre, d'où l'importance de garder intacte la connectivité entre ceux-ci (Schlosser, 1991) (figure 2.1).

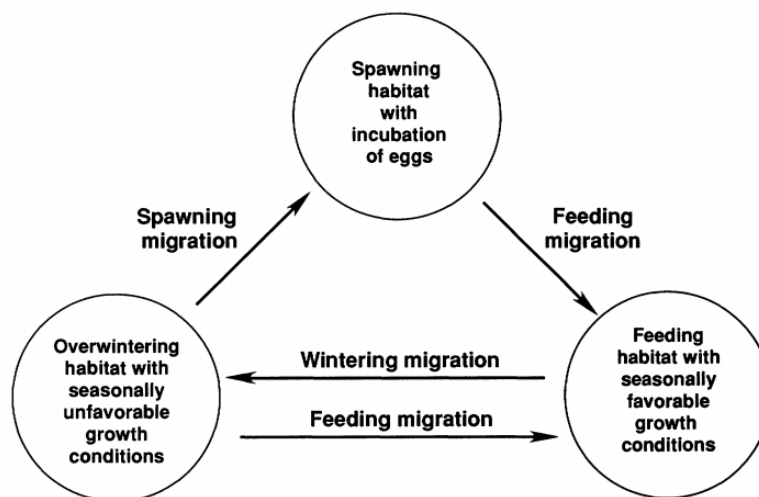


Figure 2. 1 : Schématisation de l'exploitation des différents habitats complémentaires et des schèmes migratoires lors du cycle vital d'un poisson de rivière tiré de Schlosser (1991).

La connectivité des habitats est essentielle étant donné que les individus d'une même population peuvent adopter des comportements spatiaux différents (Bujold, 2010, Pépino *et al.*, 2012). Considérés pendant longtemps comme des poissons dont la portée des déplacements est restreinte (Gerking, 1959), plusieurs études ont démontré que les salmonidés juvéniles seraient en fait plus actifs et se déplaceraient davantage sur de longues distances pour combler leurs besoins (Armstrong *et al.*, 1999, Gowan *et*

al., 2002, Rodríguez, 2002). Les variations en termes de mobilité individuelle et l'échelle spatio-temporelle des déplacements rendent complexe l'étude des patrons de déplacements des salmonidés. En effet, Gowan *et al.* (1994) soulignent que s'intéresser aux déplacements des salmonidés sur une échelle spatiale et temporelle trop restreinte, notamment dans le contexte d'études employant la méthode de marquage-recapture, apporte des connaissances fragmentaires quant aux véritables déplacements des poissons.

Plusieurs études mentionnent l'importance de l'accessibilité des petits tributaires pour les salmonidés juvéniles. Ces petits cours d'eau offrent des habitats de grande qualité vers lesquels les salmonidés migrent (Huntsman, 1945, Curry *et al.*, 1993, Erkinaro *et al.*, 1997, Erkinaro *et al.*, 1998). En saison estivale, les ruisseaux sont favorables à la croissance des juvéniles en raison de l'abondance de proies disponibles (Erkinaro *et al.*, 1995). En période de stress thermique, ils peuvent également servir de refuges d'eau fraîche (Dugdale *et al.*, 2016). En hiver, les poissons s'accommodent des interstices de substrat suffisamment grand des tributaires pour s'y enfouir (Bjornn, 1971, Meyers *et al.*, 1992, Young, 1998).

2.2 La fragmentation des habitats par le ponceau

Les obstacles naturels comme les chutes ou les obstacles de nature anthropique tels que les barrages et les ponceaux détériorent la connectivité des habitats complémentaires. En bloquant l'accès aux portions de cours d'eau situées en amont aux poissons, les ponceaux complètement ou partiellement infranchissables ont pour conséquence de fragmenter l'habitat disponible (Chestnut, 2002, Gibson *et al.*, 2005, Park *et al.*, 2008). D'après la définition de Wilcove *et al.* (1986), la fragmentation d'habitat survient lorsqu'un vaste habitat est scindé en plusieurs petites parcelles ou taches d'habitat isolées les unes des autres par une matrice d'habitats dissimilaire au milieu de départ. Le phénomène de fragmentation menace l'intégrité écologique et la biodiversité en modifiant le paysage d'origine (Fagan, 2002).

De nombreuses études ont fait la démonstration que les ponceaux peuvent avoir des répercussions sur la dispersion et la mobilité des poissons en réduisant la probabilité de

mouvement vers l'amont de certaines espèces (Wheeler *et al.*, 2005, Benton *et al.*, 2008, Norman *et al.*, 2009). En plus de causer des pertes d'habitats de qualité, les ponceaux infranchissables isolent de petites populations de poissons qui sont alors destinées à se fragiliser génétiquement (Hebert *et al.*, 2000, Wofford *et al.*, 2005) et même jusqu'à disparaître (Morita *et al.*, 2002). Les travaux d'analyse génétique d'ombles de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) d'un bassin versant boréal du Québec de Torterotot *et al.* (2014) ont démontré un effet significatif des ponceaux sur la structure et la richesse génétique des populations, exposant l'impact sur plusieurs générations d'une fragmentation importante de l'habitat. En somme, restreindre la disponibilité des différents habitats d'un milieu diminue les alternatives de déplacements, qui eux permettent de conserver la capacité évolutive en assurant la dispersion des poissons aux bagages génétiques diversifiés et le maintien des populations (Albanese *et al.*, 2004).

2.3 Capacité et comportement de nage des salmonidés

Chez les poissons, on distingue trois modes natatoires : soutenu, prolongé et sprint (Beamish, 1978). Le mode soutenu permet au poisson de nager à une faible vitesse pour une longue période de temps (≥ 200 minutes). Cette nage en endurance sollicite le métabolisme aérobie pour fournir de l'énergie aux muscles rouges. La nage en sprint est explosive et de courte durée (≤ 20 secondes). L'énergie mobilisée pour contracter les muscles blancs et atteindre une vitesse de nage élevée provient du métabolisme anaérobie. Finalement, la nage prolongée est un mode intermédiaire entre la nage soutenue et le sprint qui sollicite les muscles rouges et blancs, donc les deux types de métabolismes. Il a été démontré que l'alternance entre ces différents modes de nages est une stratégie efficace, car elle permet au poisson d'économiser de l'énergie durant ses déplacements (Weihs, 1974).

D'après Peake *et al.* (1997), la transition entre le mode de nage prolongé à soutenu se situerait plutôt entre quinze et vingt minutes pour le saumon atlantique juvénile, bien qu'il préfère les zones d'écoulement rapides et peu profondes des cours d'eau. C'est grâce à ses grandes nageoires pectorales que cette espèce peut se maintenir presque

indéfiniment dans les vitesses d'écoulement élevées en se positionnant face au courant, au fond de la colonne d'eau (Hearn, 1987, Peake *et al.*, 1997). Les tacons et les smolts pourraient se maintenir dans des vitesses d'écoulement allant respectivement jusqu'à 0,86 m/s et 1,26 m/s. Dans le même ordre d'idée, les essais de performances natatoires de McDonald *et al.* (1998) indiquent que la taille du poisson serait proportionnelle à ses performances et à son endurance. Cependant, il faut considérer les limites physiologiques des espèces avec prudence, car elles ne sont pas, à elles seules, de bons indicateurs de prédiction des performances natatoires en milieu naturel. En effet, les poissons n'adoptent pas toujours les comportements de déplacement optimaux qui maximisent leur distance de déplacements (Castro-Santos *et al.*, 2013).

En plus de la capacité de nage du poisson, le comportement et la motivation ont un impact sur le franchissement d'une structure comme le ponceau. Les travaux de Blank *et al.* (2009) suggèrent que les individus qui choisissent les zones de vitesses réduites dans un ponceau auraient alors plus de chances de réussir leur passage. La motivation du poisson à franchir un ponceau est en lien avec plusieurs facteurs internes ou externes, par exemple son degré de fatigue, une réponse à un stimulus olfactif, la vitesse de l'écoulement et la température (Castro-Santos *et al.*, 2013). Bien que le degré de motivation soit difficile à évaluer, il peut être quantifié selon le nombre de tentatives de passage qu'effectue un individu (Castro-Santos, 2004). Goerig *et al.* (2017) ont démontré une corrélation positive entre la motivation d'ombles de fontaine et leur succès de passage.

2.4 Modèles existants pour l'évaluation du succès de passage

Plusieurs modèles se basant sur un vaste spectre de paramètres du milieu naturel ont été développés afin d'évaluer le succès de passage des poissons à travers les ponceaux. Ainsi, il existe des filtres statiques (coarse filters) reposant sur les caractéristiques des ponceaux considérées stationnaires dans le temps (i.e. la pente, la longueur, la hauteur de la chute en aval) qui ont pour objectif de prédire la passabilité

d'une conduite sans égards aux variables dynamiques qui fluctuent dans le temps (i.e. le débit, la vitesse de l'écoulement et la température) (Love *et al.*, 2003, Clarkin *et al.*, 2005, Coffman, 2005, Poplar-Jeffers *et al.*, 2009). Ce type d'outil est habituellement un arbre de décision où une valeur seuil est utilisée pour chacune des variables considérées afin de départager les ponceaux selon leur niveau de perméabilité. Ces seuils étant fonction de la capacité de nage et de saut du poisson, chaque filtre se doit d'être adapté à l'espèce considérée. Pépino *et al.* (2012) ont utilisé le filtre statique conçu par Love *et al.* (2003) pour mesurer l'impact du réseau routier sur la densité d'omble de fontaine. Leurs résultats démontrent que la passabilité des traverses de cours d'eau influence la distribution des poissons. En amont des traverses dont la passabilité était classifiée intermédiaire ou faible, les ombles de fontaine étaient présentent en plus basse densité qu'en aval de la structure.

D'autres modèles impliquent les variables liées à la taille du poisson et à sa capacité de nage (Bourne *et al.*, 2011, Mahlum *et al.*, 2014). Par exemple, Castro-Santos *et al.* (2013) ont mis en relation l'épuisement d'ombles de fontaine lors d'essais expérimentaux en couloir de nage et la distance d'ascension nécessaire pour franchir un ponceau afin de prédire le succès de passage sous différentes conditions hydrauliques.

À partir de variables statiques et dynamiques, Makrakis *et al.* (2012) ont développé un indice de connectivité qui classifie les ponceaux pour le passage des poissons néotropicaux. Enfin, les travaux de Goerig *et al.* (2016) ont permis de concevoir un modèle prédictif basé sur les conditions en cours d'eau naturel à partir de données empiriques récoltées sur l'ascension de ponceaux d'un échantillon d'ombles de fontaine.

2.5 Recommandations existantes relatives à l'aménagement des ponceaux

Dans l'optique de permettre la libre circulation des poissons, certaines recommandations quant à l'aménagement et la morphométrie des ponceaux font consensus dans la communauté scientifique. Le fait que les ponceaux ne reproduisent

pas fidèlement l'allure d'un cours d'eau (altération du débit, la variation de la vitesse du courant et le changement de substrat dans la conduite) est probablement ce qui cause l'effet de barrière (Warren et al., 1998). Lors d'une nouvelle installation ou d'un remplacement de ponceau, il serait idéal de préconiser un ponceau en arche qui laisse intact le lit du cours d'eau et sa trajectoire en plus de ne pas concentrer l'écoulement (Love et al., 2003, Gibson et al., 2005, Makrakis et al., 2012). Les ponceaux en boîte ou circulaires doivent être suffisamment enfouis dans le lit du cours d'eau pour qu'il y ait du substrat au fond de la structure (Love et al., 2003, Coffman, 2005). De plus, la pente du ponceau devrait suivre l'inclinaison naturelle du cours d'eau (Poplar-Jeffers et al., 2009). D'ailleurs, le concept de «stream simulation» développé aux États-Unis reprend ces critères pour une conception et une installation adéquates des ponceaux (Forest Service Stream Simulation Working Group, 2008). Cette méthode est basée sur le principe qu'une simulation fidèle du cours d'eau dans la traverse ne devrait pas constituer un obstacle pour les espèces aquatiques qui le colonisent.

La vitesse d'un écoulement circonscrit par un ponceau peut être modérée en y installant des déflecteurs pour offrir des zones de répit aux poissons lors de l'ascension (Hoffman et al., 2007, Macdonald et al., 2007, Newbold et al., 2014). À moyen terme, de telles restaurations peuvent augmenter la densité de poissons et la richesse des espèces (Franklin et al., 2012). À débit élevé, Powers et al. (1997) mentionne toutefois que les déflecteurs pourraient nuire au passage des poissons de petite taille comme les salmonidés juvéniles à cause de l'augmentation de turbulence qu'ils occasionnent.

La présence d'une fosse en aval du ponceau crée une zone d'eau calme à turbulence moindre qui favorise le passage des poissons (Baker, 2014). Les fosses offrent au poisson la possibilité de se reposer avant d'entreprendre la remontée du ponceau, particulièrement en présence d'une chute à l'aval de la conduite. En Finlande et en Norvège, des ponceaux infranchissables ont été restaurés par l'enrochement de la section du tributaire en aval de la conduite afin d'éliminer les chutes artificielles en sortie et créer des fosses en montant le niveau d'eau (Erkinaro et al., 2017). Ces interventions ont mené à l'amélioration de la connectivité d'habitat et l'agrandissement de l'aire de distribution des saumons juvéniles. Deux et trois années suivant les travaux,

les juvéniles 1+ et 2+ étaient les premiers à investir les nouveaux habitats disponibles en amont.

Pour les chemins moins fréquentés ou dont l'utilisation ne sera qu'à court terme, Lacombe *et al.* (2016) suggèrent des aménagements alternatifs comme les pontages temporaires ou les traverses à gué aménagées. La désactivation des chemins abandonnés, le retrait des conduites vétustes et désuètes afin de revenir au milieu d'origine sont d'excellentes solutions pour éviter les obstructions des tributaires. Dans un contexte de changements climatiques, les conduites au dimensionnement insuffisant sont vulnérables aux débits de pointe qui s'annoncent plus récurrents et sévères. Les ponceaux à grands diamètres seraient donc plus appropriés à long terme. Une augmentation du diamètre nominale des ponceaux pourrait diminuer les risques associés aux évènements de crues intenses susceptibles d'endommager les structures.

3 PORTRAIT DE LA PROBLÉMATIQUE DE LA FRAGMENTATION DE L'HABITAT DU SAUMON JUVÉNILE PAR LES PONCEAUX SUR LE TERRITOIRE QUÉBÉCOIS

3.1 Introduction

L'exploitation forestière et le développement routier du dernier siècle font du Québec un territoire où de nombreux réseaux hydrographiques sont ponctués de traverses de cours d'eau. De par la diversité des routes et des chemins, il est difficile de dénombrer la totalité des traverses de cours d'eau du Québec et d'évaluer leur état (Lacombe *et al.*, 2016). Grâce à leur faible coût d'installation, les ponceaux sont un type de traverse de cours d'eau qui est très répandu et adapté aux tributaires de petite et moyenne envergure. Toutefois, ils peuvent constituer des obstacles pour le passage des poissons. La nature longitudinale du réseau fluvial fait de la fragmentation de l'habitat des poissons un enjeu considérable pour leurs libres déplacements (Fagan, 2002).

Ce chapitre s'intéresse à la problématique de la fragmentation de l'habitat du saumon juvénile par les ponceaux sur le territoire québécois. Il dresse le portrait d'un inventaire à grand déploiement effectué sur quatre rivières à saumon visant à classifier les ponceaux selon leur franchissabilité pour l'espèce. Pour les besoins de la cause, le filtre statique développé par Coffman (2007) pour les salmonidés juvéniles a été sélectionné pour la classification.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Site d'étude

L'inventaire et la caractérisation des ponceaux ont été menés sur le territoire de quatre rivières à saumon de la province de Québec (Canada) : la Grande Cascapédia, la Matapédia, la Patapédia, en Gaspésie ainsi que la Sainte-Marguerite, au Saguenay. Les bassins versants de ces rivières sont tous ponctués d'un nombre important de traverses de cours d'eau, notamment des ponceaux, en raison du réseau routier et des chemins forestiers qui les sillonnent.

3.2.2 Inventaire cartographique

C'est à partir de bases de données et de cartes gracieusement fournies par le Ministère de la Faune, des Forêts et des Parcs (MFFP) que les ponceaux des bassins versants des rivières ont été géoréférencés lors d'une analyse cartographique préliminaire à l'aide du logiciel *ArcGIS®* (ESRI, 2014). Pour les bassins versants des rivières Matapédia et Patapédia, les ponceaux potentiels non cartographiés ont été localisés aux points d'intersection entre les couches vectorielles du réseau routier et du réseau hydrographique (rapport non publié, Constantin, 2014). Les cartes de localisation des ponceaux de chaque bassin versant ont ensuite été exportées dans un GPS (*Garmin eTrex 20x*) pour établir les itinéraires et faciliter les déplacements en véhicule lors de l'inventaire sur le terrain.

3.2.3 Caractérisation des ponceaux

Diverses campagnes de terrain ont été effectuées entre le 28 juin et le 6 novembre 2014. Une attention particulière a été accordée à la couverture globale des bassins versants afin de représenter fidèlement l'état des ponceaux de ces territoires. L'échantillonnage des ponceaux caractérisés devait également exposer la diversité de formes et de matériaux des conduites. Auxiliairement, les ponceaux sélectionnés pour la caractérisation devaient répondre aux critères préétablis suivants :

- Être accessible par voie routière carrossable;
- Ponctuer un cours d'eau permanent;
- Être situé à moins d'un kilomètre de l'embouchure du tributaire;
- Avoir un diamètre supérieur ou égal à un mètre;
- Absence d'obstacle infranchissable en aval de la structure, par exemple un barrage de castors ou une chute naturelle.

Chaque ponceau répondant aux critères de sélection a fait l'objet d'une caractérisation détaillée. Dans le cas des sites comprenant plusieurs ponceaux implantés en parallèle (sites multiples avec des ponceaux doubles ou triples), les conduites ont été caractérisées individuellement, car bien que leurs morphométries respectives soient

semblables, elles ne sont pas identiques. Les éléments relevés pour la caractérisation sont les suivants : la forme et le type de matériaux du ponceau, la longueur et le diamètre du ponceau, la profondeur d'eau ainsi que l'amplitude et la longueur des ondulations s'il est question d'une conduite en tôle ondulée galvanisée. De plus, les élévations de certains points tels que l'entrée et la sortie de la conduite (respectivement P_1 et P_2), l'élévation de la surface de l'eau et la profondeur maximale de la fosse en aval du ponceau (respectivement SEA et PPP) ainsi que l'élévation du seuil en aval du ponceau (P_3) (figure 3.1) ont été mesurées grâce à un altimètre à haute précision (*ZIPLEVEL Pro-2000[®], Technidea Corporation*).

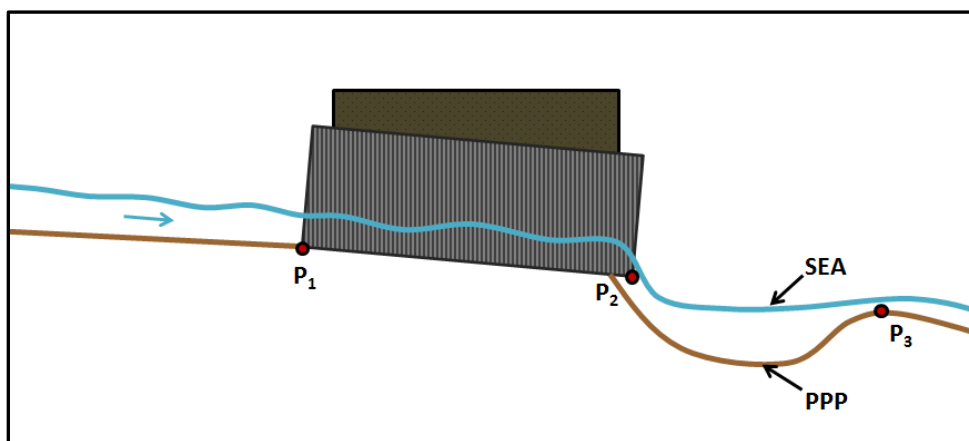


Figure 3. 1 : Schéma transversal d'un ponceau exposant les points d'élévation mesurés avec l'altimètre (P_1 et P_2 correspondent respectivement à l'élévation à l'entrée et à la sortie du ponceau, SEA correspond à l'élévation de la surface de l'eau à l'aval du ponceau, PPP correspond au point le plus profond de la fosse en aval du ponceau et P_3 correspond à l'élévation du seuil en aval du ponceau).

La prise de photos a également permis de colliger l'allure générale de chaque site (l'amont et l'aval du cours d'eau, l'entrée et la sortie de la conduite ainsi que la présence de substrat dans la conduite). Le type de substrat (argile, sable, gravier, galet et bloc) et sa couverture dans le ponceau (complète, partielle ou absente) ont été notés grâce à une observation visuelle. Enfin, la largeur et la profondeur du cours d'eau en amont du ponceau en plus de la mesure de l'axe intermédiaire de 100 particules du substrat choisies aléatoirement (Wolman, 1954) ont servi à caractériser l'habitat en amont de la conduite. Bien qu'il s'agisse d'une caractérisation ponctuelle, les variables dynamiques telles que la vitesse du courant en surface, la profondeur d'eau et la largeur de l'eau dans la conduite ont également été mesurées à titre informatif.

3.2.4 Classification des ponceaux

Les données recueillies sur le terrain ont été utilisées pour classer chaque structure à l'aide du modèle prédictif du succès de passage à travers les ponceaux développé pour les salmonidés juvéniles par Coffman (2005). Il s'agit d'un filtre statique et repose donc sur les caractéristiques de ponceaux considérées stationnaires dans le temps. Cet outil permet donc d'établir une classification sans égards aux conditions de débits qui prévalent lors de la caractérisation. Ce filtre est en fait un arbre de décision où une valeur seuil est utilisée pour chacune des variables considérées afin de départager les ponceaux selon leur niveau de perméabilité (figure 3.2). La chronologie du filtre statique correspond à l'ordre auquel un poisson qui souhaite franchir la conduite est confronté aux obstacles de franchissement. Une revue de littérature sur la capacité de nage et de saut des salmonidés juvéniles couplée à une étude de marquage-récapture en milieu naturel ont permis d'établir ces seuils. Les variables retenues en vue de classer les ponceaux selon leur perméabilité au passage du saumon juvénile sont les suivantes :

- La présence ou l'absence de substrat naturel dans le ponceau
- La présente ou l'absence d'un retour d'eau dans le ponceau
- La hauteur du seuil en aval
- La pente du ponceau
- L'indice d'effort (pente x longueur)

Il y a présence d'un retour d'eau dans une conduite lorsque l'élévation du seuil en aval du ponceau (P_3) est supérieure à celle de l'entrée du ponceau (P_1). L'eau s'accumule alors dans la conduite et il en résulte une augmentation de la profondeur d'eau, ce qui facilite l'ascension du poisson. La hauteur du seuil se calcule en soustrayant l'élévation du seuil en aval du ponceau (P_3) à celle de la sortie du ponceau (P_2). La pente du ponceau est un rapport entre la différence d'élévation entre l'entrée (P_1) et la sortie du ponceau (P_2) sur sa longueur totale. Finalement, l'indice d'effort est obtenu par la multiplication de la pente et de la longueur du ponceau et il témoigne du degré d'effort que doit fournir un poisson pour compléter l'ascension de la conduite.

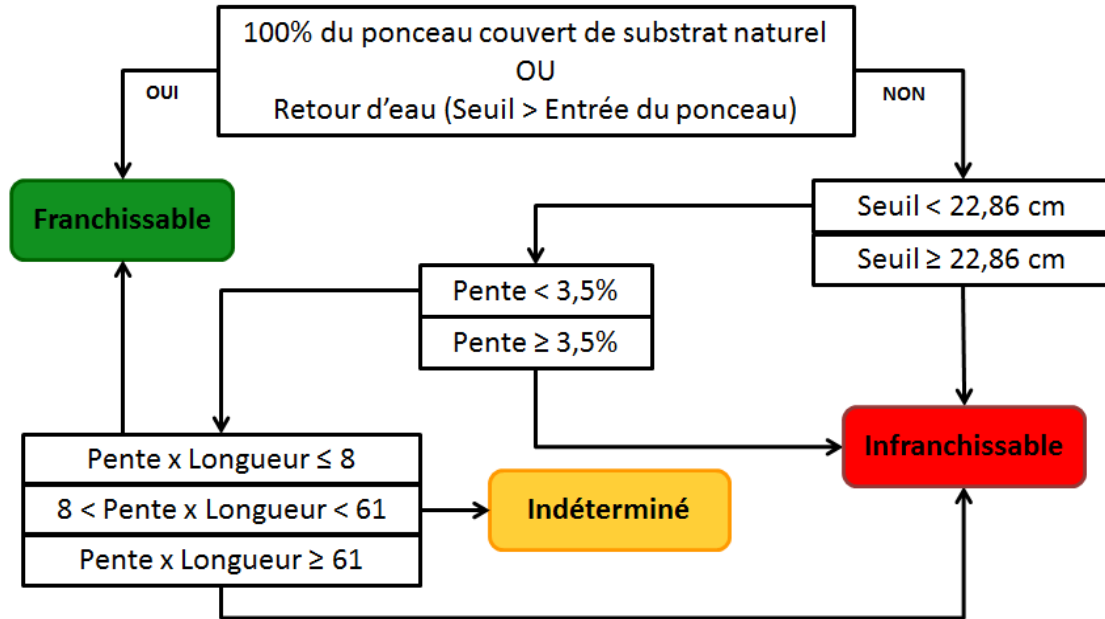


Figure 3. 2 : Organigramme décisionnel du modèle prédictif du succès de passage des salmonidés juvéniles développé par Coffman (2005) qui classe les ponceaux en trois catégories (franchissable, infranchissable ou indéterminé) en fonction de leurs paramètres physiques (la présence de substrat naturel dans la conduite, le retour d'eau dans la conduite, la hauteur du seuil en aval du ponceau, la pente du ponceau et sa longueur).

À l'issue de la classification d'une conduite avec ce filtre statique, un des trois qualificatifs de perméabilité lui est attribué : franchissable, infranchissable ou indéterminé. Le terme indéterminé signifie que le filtre ne peut à lui seul déterminer le succès de passage du poisson. Dans ce cas, il faudrait alors procéder à un inventaire biologique pour classer le ponceau. L'arbre de décision du filtre statique a été traduit en algorithme par l'entremise du logiciel *MATLAB* afin d'automatiser la classification des ponceaux à partir d'une base de données *Excel* comprenant les informations relatives à la caractérisation.

3.2.5 Estimation de la perte d'habitats potentielle

Sur la carte de chaque bassin versant, les points représentant la localisation des ponceaux inventoriés ont été regroupés selon leur classification. Les longueurs de cours d'eau en amont des ponceaux ont été calculées à partir des attributs de la couche vectorielle du réseau hydrographique. Finalement, la largeur moyenne du cours d'eau

en amont de chaque site, mesuré préalablement sur le terrain, nous a permis de calculer la superficie potentiellement inaccessible au poisson. Afin d'éviter la surestimation d'habitat inaccessible, une attention particulière a été portée à l'ordre des sites lors de l'addition des surfaces inaccessibles pour chaque classification. Par exemple, la superficie d'un cours d'eau en amont de deux conduites infranchissables n'a pas été doublement prise en compte.

3.3 Résultats

3.3.1 Classification des ponceaux

En tout, 104 sites comprenant un ou plusieurs ponceaux ont été visités. Ce vaste inventaire a permis la caractérisation de 126 ponceaux en 2014 : 27 ponceaux sur la rivière Grande Cascapédia, 80 sur la rivière Matapédia, 13 sur la rivière Sainte-Marguerite, et 6 sur la rivière Patapédia (annexe I). De cet échantillon, seulement 35% ont été classifiés franchissables par les salmonidés juvéniles, tandis que le quart des ponceaux inventoriés (25%) étaient infranchissables, et qu'un 40% additionnel est susceptible de nuire à leur libre circulation, car ces conduits n'ont pas pu être caractérisés définitivement avec le filtre statique (indéterminé) (figure 3.2).

De façon individuelle, la proportion entre les classifications varie beaucoup. Cela dit, les ponceaux classifiés comme infranchissables et indéterminés représentent une tranche importante de l'échantillon dans tous les cas. D'après l'analyse de la classification des ponceaux caractérisés avec le filtre statique, la pente et l'indice d'effort seraient les variables les plus limitantes pour le passage des salmonidés juvéniles. En raison de l'ordre du cheminement du filtre, les variables qui influencent le plus la classification des ponceaux sont toutefois le retour d'eau dans la conduite et la présence de substrat sur l'entièreté de la conduite. Si la conduite répond à l'une de ces conditions, alors elle sera classée comme franchissable même si ses valeurs de pentes et d'indice d'effort excèdent les valeurs seuils du filtre.

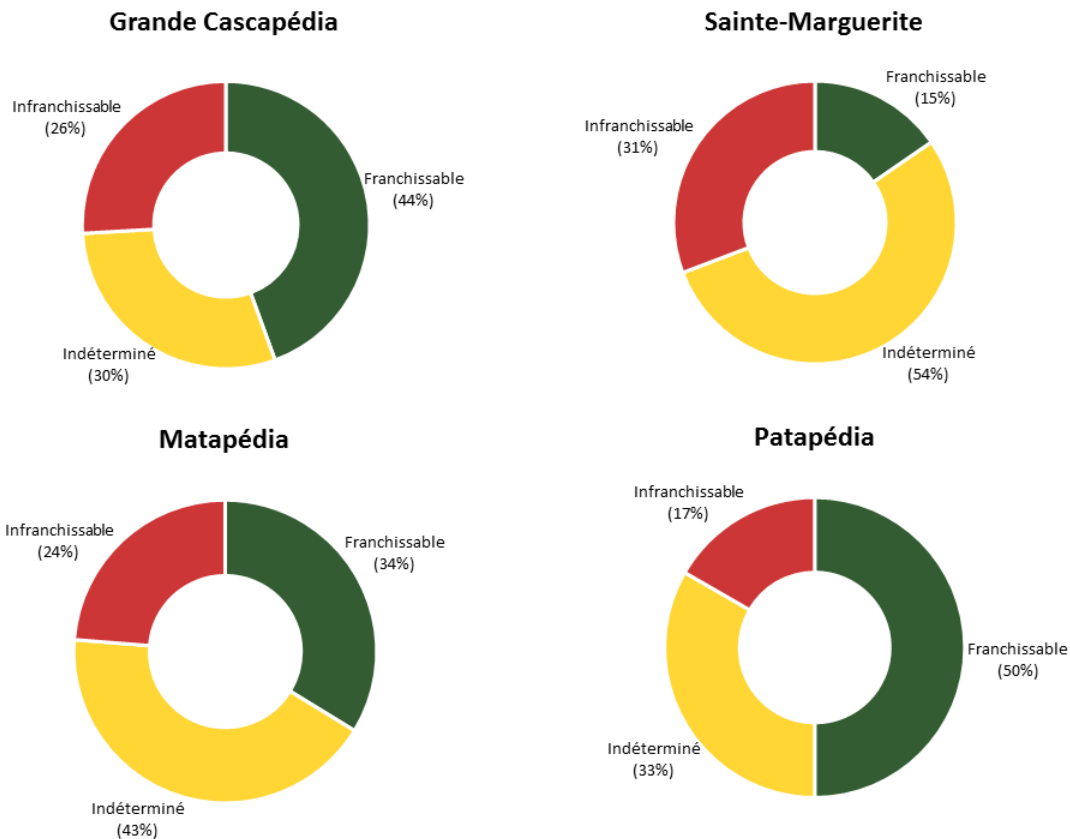


Figure 3.3 : Synthèses de la classification des ponceaux inventoriés pour chaque bassin versant (Grande Cascapédia, n=27; Sainte-Marguerite, n=13; Matapédia, n=80; Patapédia, n=6) en 2014 d'après le modèle prédictif du succès de passage des salmonidés juvéniles de Coffman (2005).

3.3.2 Estimation de la perte d'habitats potentielle

Dépendamment de sa localisation dans le réseau hydrographique d'une rivière, l'impact d'un ponceau infranchissable peut varier selon la superficie de cours d'eau qu'il rend inaccessible en amont. L'annexe II présente la superficie d'habitat potentiellement inaccessible pour les ponceaux classifiés infranchissables ou indéterminés de l'échantillon ce qui permet d'identifier pour chaque rivière les sites qui pourraient limiter l'accès à de plus grandes superficies d'habitats. Globalement, la superficie des habitats potentiellement inaccessible (infranchissables et indéterminés) est estimée à 124 367 m² sur la Cascapédia, 712 976 m² sur la Sainte-Marguerite, 694 083 m² sur la Matapédia et 28 644 m² sur la Patapédia (Tableau 3.1).

Tableau 3. 1 : Longueurs, superficies et superficies potentiellement inaccessibles combinées des cours d'eau en amont des sites d'étude (n=104) comprenant les ponceaux inventoriés en 2014 dans quatre bassins versants (Grande Cascapédia, n=27; Sainte-Marguerite, n=13; Matapédia, n=80; Patapédia, n=6) d'après le modèle prédictif du succès de passage des salmonidés juvéniles de (Coffman, 2005).

Bassin versant	Classification	Longueur du cours d'eau en amont (m)	Superficie de cours d'eau en amont (m²)	Superficie potentiellement inaccessible (m²)
Grande Cascapédia	Franchissable	123 198	717 237	-
	Indéterminé	17 547	46 888	124 367
	Infranchissable	26 717	77 479	
Sainte-Marguerite	Franchissable	6 611	33 056	-
	Indéterminé	88 199	537 803	712 976
	Infranchissable	31 510	175 174	
Matapédia	Franchissable	109 667	246 743	-
	Indéterminé	175 138	526 030	694 083
	Infranchissable	73 664	168 053	
Patapédia	Franchissable	10 556	28 883	-
	Indéterminé	9 799	21 711	28 644
	Infranchissable	4 622	6 933	

3.4 Discussion

La caractérisation de l'échantillon révèle une proportion importante de ponceaux qui seraient susceptibles de nuire au libre déplacement des salmonidés juvéniles et de contribuer à la fragmentation de leur habitat d'eau douce. Malheureusement, cette problématique serait récurrente, car bon nombre d'études qui se sont intéressées à l'état des ponceaux en Amérique dressent également un portrait peu reluisant de la passabilité de ces structures (Poplar-Jeffers *et al.*, 2009, Makrakis *et al.*, 2012). Par exemple, Warren *et al.* (1998) ont constaté que le déplacement des poissons à travers les ponceaux était moindre en comparaison à d'autres types de traverses de cours d'eau comme les ponts et des ruisseaux naturels. De même, il a été démontré que les ponceaux partiellement ou complètement infranchissables auraient un effet dommageable sur la densité d'ombles de fontaine dans la section amont des cours d'eau (Lapointe *et al.*, 2004, Pépino *et al.*, 2012).

Dès l'installation du ponceau, des problèmes de conception et une implantation inadéquate peuvent être à la base de l'effet de barrière. L'inspection de 47 ponceaux nouvellement installés lors de la construction d'une autoroute au Labrador a révélé que plus de la moitié des structures ne répondaient pas aux normes énoncées dans la réglementation fédérale pour la protection de l'habitat du poisson (Gibson *et al.*, 2005). Les auteurs suggèrent qu'un manque de vigilance et des considérations budgétaires seraient à l'origine du non-respect de la réglementation au détriment de l'impact environnemental néfaste associé à des structures inadaptées. À long terme, le ponceau convenablement implanté peut devenir un obstacle pour les poissons à cause de sa détérioration et du manque d'entretien. L'analyse des données provenant d'inventaires des traverses d'eau des chemins forestiers de Lacombe *et al.* (2016) expose la problématique du sous-entretien et de l'abandon des conduites dans les forêts publiques du Québec.

Dans les quatre bassins versants, beaucoup de ponceaux ont été classifiés dans la catégorie indéterminée avec le cheminement du filtre statique. Ces ponceaux sont susceptibles de nuire à la libre circulation des juvéniles, mais cette catégorie reste une zone grise. Les inventaires biologiques sur le terrain pourraient permettre de mieux

classifier les ponceaux dont la passabilité est ambiguë. Il faut aussi tenir compte du fait que la passabilité d'une conduite n'est pas fixe et qu'elle varie en fonction des conditions hydrauliques et des saisons. Coffman (2005) rapporte que la dynamique de l'écoulement à l'intérieur des ponceaux à différentes conditions hydrauliques peut compliquer les prédictions de passage. Par exemple, le passage de ponceaux infranchissables à haut débit ne permet peut-être pas de maintenir la dynamique des populations de poissons à long terme. En plus, il a été rapporté que la vitesse de l'écoulement dans les conduites était inversement liée aux mouvements des poissons (Warren *et al.*, 1998). L'idéale serait de combiner les variables de morphométrie du ponceau à des variables dynamiques comme le débit, la température et la vitesse de l'écoulement.

Concernant le calcul de la superficie en amont des conduites, la valeur utilisée est la largeur mouillée directement en amont des ponceaux inventoriés. Comme la largeur des cours d'eau tend à diminuer vers l'amont, le calcul estime à la hausse la superficie. Bien qu'instructif, la superficie d'habitat en amont des conduites calculées lors de l'analyse cartographique est quelque peu surestimée. Il est aussi important de mentionner que la disponibilité de l'habitat n'est pas un gage de qualité d'habitat pour les besoins des salmonidés juvéniles. C'est pourquoi la caractérisation de l'habitat en amont d'un ponceau infranchissable reste une étape cruciale pour évaluer son impact.

Les systèmes de classification comme les filtres statiques considèrent les obstacles de manière indépendante en faisant fi de l'impact cumulatif résultant de l'interconnexion de multiples obstacles sur un réseau hydrographique. Kemp *et al.* (2010) en témoignent et soulignent l'importance d'une approche intégrée en ce qui a trait aux enjeux de conservation. Il faut aussi rappeler que le choix des paramètres d'intérêt et des critères des diverses méthodes d'évaluation de la perméabilité des ponceaux joue un rôle très important sur l'issue de la classification (Bourne *et al.*, 2011).

3.4.1 Implications de gestion

La classification des ponceaux avec un filtre statique est une méthode simple afin de cibler les ponceaux les plus problématiques sur un territoire. En outre, elle nécessite peu d'équipements et de temps dédié aux activités sur le terrain pour la récolte des

données de morphométries. Cela peut être un bon outil de gestion avant d'entreprendre des travaux plus poussés, tels que l'inventaire biologique ou le suivi des déplacements des poissons.

Cette méthodologie pourra assurément orienter les décisions liées au remplacement et à l'entretien des ponceaux sur un territoire. Comme la localisation des obstacles est une variable importante quant à son impact sur le réseau hydrographique (Rolls, 2011), le géoréférencement des ponceaux problématiques et le calcul de la superficie en amont de ceux-ci peuvent servir aux gestionnaires de rivières à prioriser la réfection de certains ponceaux afin de maximiser le rendement des travaux d'aménagement en termes d'accroissement de la superficie d'habitat de qualité.

4 DEVELOPPEMENT D'UN MODÈLE PRÉDICTIF DE PASSAGE DES SAUMONS JUVÉNILES À TRAVERS LES PONCEAUX

4.1 Introduction

Bien que plusieurs filtres aient tenté de prédire le succès de passage des salmonidés à travers les ponceaux, aucun d'entre eux ne cible exclusivement le saumon atlantique juvénile dans le contexte des rivières québécoises. En laboratoire, les essais de passage effectués en couloir de nage auraient tendance à sous-estimer les capacités de nage des poissons (SJ Peake *et al.*, 2006, Castro-Santos *et al.*, 2013). Cette sous-estimation est peut-être attribuable au fait que ce milieu contrôlé ne reproduit pas fidèlement ce à quoi le poisson fait face en milieu naturel. En effet, un couloir de nage contraint le poisson-cobaye à effectuer une ascension immédiate tandis qu'en milieu naturel, il a l'opportunité de gérer son effort via différentes stratégies d'ascension lorsqu'il franchit un ponceau. De là l'importance des observations en milieu naturel afin d'éviter de classer faussement un ponceau comme étant infranchissable (Coffman, 2005, Goerig *et al.*, 2016).

Une étude de suivi des déplacements de poissons à travers un échantillon de ponceaux a été menée au cours des saisons estivales 2015 et 2016, afin de concevoir un modèle prédictif du succès de passage adapté aux réalités du saumon juvénile en rivière et aux conditions spécifiques au Québec. Pour ce faire, un éventail de ponceaux ont été ciblés, en raison de leurs caractéristiques morphométriques variées et représentatives de l'étendue des valeurs observées à la suite de l'inventaire et de la classification des conduites de l'année précédente. Deux méthodes différentes de suivi des déplacements des poissons par télémétrie passive ont été employées : la méthode de marquage-localisation en 2015, puis la méthode de marquage-suivi en continu en 2016, qui s'est avérée plus efficace.

4.2 Méthodologie : marquage-localisation

4.2.1 Site d'étude

Les ponceaux identifiés comme sites d'étude étaient situés sur des tributaires de deux bassins versants de rivières à saumon du Québec (Canada) : la Grande Cascapédia, en Gaspésie et la Sainte-Marguerite, au Saguenay. Les activités de terrain ont d'abord été menées en Gaspésie (juillet), puis au Saguenay (août) durant l'été 2015. Les ponceaux ont été sélectionnés à travers la base de données de ponceaux caractérisés et classifiés avec le filtre statique résultant des relevés de terrain de 2014 selon différents critères. Dans un premier temps, des ponceaux représentatifs des caractéristiques morphométriques de l'ensemble de la base de données ont été échantillonnés à l'aide d'un algorithme de partitionnement (clustering). Il s'agit d'une méthode qui sélectionne un échantillon à travers une base de données. Chaque donnée de l'échantillon est la représentante d'un sous-ensemble aux caractéristiques communes. De cette façon, l'échantillon est assuré de représenter fidèlement l'ensemble des caractéristiques retrouvées dans la base de données. La sélection définitive des sites s'est faite sur le terrain par observation objective. Les ponceaux obstrués par des débris végétaux ou des barrages de castors, ne présentant pas un habitat convenable pour les salmonidés (cours d'eau stagnant à fond vaseux et herbeux) ou trop éloigné du tronçon principal de la rivière (>1km de l'embouchure de son tributaire) ont été éliminés afin de respecter les patrons de distribution spatiale habituels des saumons juvéniles.

4.2.2 Collecte et marquage des poissons

Des séances de pêches à l'électricité (modèle 15-C *Backpack Electrofisher*, *Smith-Root inc. alimenté par une génératrice EX350*) (figure 4.1) ont permis la collecte de saumons juvéniles de tailles variées. Autant que possible, la capture des individus se faisait directement dans le tributaire du site d'étude. Dans les cas où l'espèce n'était pas présente en grande densité directement sur le site, les séances de pêche ont été effectuées dans des cours d'eau à proximité, puis les individus étaient transportés en bassin oxygéné par véhicule vers le site d'étude. Le temps de transport n'excédait pas

une heure et la température ainsi que l'état des individus ont fait l'objet d'un suivi constant.



Figure 4. 1 : Séance de pêche à l'électricité.

Les poissons ont été anesthésiés par immersion dans une solution composée d'une partie d'huile de clou de girofle et dix parties d'éthanol 95% dilué dans l'eau (0.7mL de solution par litre d'eau) (Taylor *et al.*, 1999, Chanseau *et al.*, 2002). La concentration du bain anesthésiant et le temps d'immersion variaient selon la température de l'eau. L'individu était retiré du bain anesthésiant lorsqu'il n'avait plus la capacité de se mouvoir, mais que sa respiration demeurait régulière (Kennedy *et al.*, 2007). La prise de mesures morphologiques comprenait la masse (g), la longueur totale (mm), la longueur à la fourche (mm) et l'épaisseur de la nuque (mm) du poisson. Les poissons d'une longueur totale inférieure à 55 mm ont été retirés de l'expérimentation, car ils étaient trop petits pour le marquage. Les poissons ont été marqués avec des transpondeurs passifs (PIT-tag modèle HDX TRPGR30TGC, *Texas Instruments* : longueur de 12 mm ; diamètre de 2,12 mm ; masse de 0,10 g ; en verre encapsulé) (figure 4.2).

Les transpondeurs ont été insérés dans la cavité péritonéale des poissons (figure 4.3) en pratiquant une incision de 3mm sur la ligne ventrale, au bas des nageoires

pectorales. Une goutte de colle chirurgicale (3M Vetbond Tissue Adhesive) suffisait pour fermer l'incision. Finalement, les poissons marqués étaient transférés dans un bassin de réveil oxygéné, le temps que les effets de l'anesthésie se dissipent. Après le marquage des individus et un temps de repos en vivier post-marquage allant de 2 à 12 heures, les poissons étaient relâchés individuellement en aval des ponceaux pour la séquence de suivi par l'entremise d'un court test de personnalité (se référer au Chapitre 5, section 5.2 Méthodologie).



Figure 4. 2 : Transpondeur passif de 12 mm utilisé pour le marquage des poissons.



Figure 4. 3 : Position du transpondeur dans la cavité péritonéale du poisson.

4.2.3 Suivi des déplacements des poissons sur le site d'étude

À chaque site d'étude, les déplacements des poissons marqués ont été suivis durant des séquences de cinq jours grâce à un système de télémétrie portable composé d'une antenne ronde (0,5 m de diamètre, envergure de détection de 0,80m), d'un moniteur LCD et d'un émetteur-récepteur alimentés par une batterie de 12V (figure 4.4).



Figure 4. 4 : Balayage du cours d'eau avec l'antenne portable.

Afin de mesurer l'impact des ponceaux sur le déplacement, les mouvements vers l'aval des poissons marqués ont été comparés entre un groupe relâché à l'aval du ponceau et un groupe témoin relâché dans une section non perturbée du cours d'eau ($n = 23$ à 45 poissons, moyenne = 34). Le site d'étude était donc divisé en deux sections : la section ponceau et la section témoin (figure 4.5). Chaque section comprenait trois zones de l'aval vers l'amont: une zone de relâche de 10 m (R_P et R_T), un ponceau ou une section de cours d'eau non perturbée équivalente à la longueur du ponceau (P et FP) ainsi qu'une zone de balayage (B_P et B_T) qui englobait les zones précédentes en plus de 50 m en amont. Dans plusieurs cas, les sites d'étude comprenaient des ponceaux implantés en parallèle (sites multiples avec des ponceaux doubles ou triples). Pour ne pas surestimer la capacité des poissons, c'est la morphométrie du ponceau la plus

avantageuse pour le passage du poisson qui a été pris en compte lors de l'analyse des déplacements.

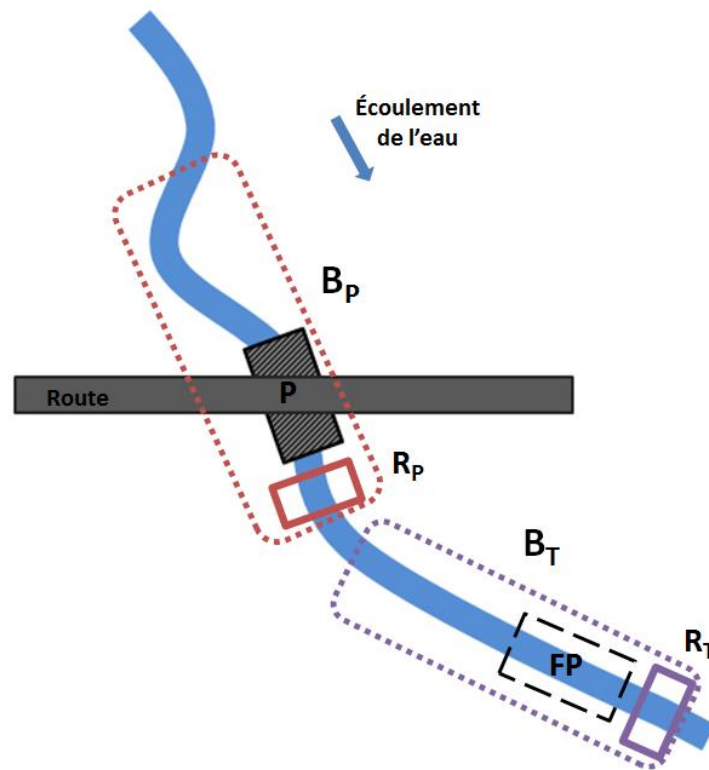


Figure 4. 5 : Représentation schématique des sections d'un site d'étude : R_p = zone de relâche des poissons du groupe ponceau (encadré rouge, longueur : 10 m) ; R_T = zone de relâche des poissons du groupe témoin (encadré violet, longueur : 10 m) ; P = ponceau (Rectangle gris ligné) ; FP = zone du cours d'eau non perturbé de la même longueur que le ponceau correspondant au faux ponceau (encadré pointillé noir) ; B_p = Zone de balayage du groupe ponceau (encadré pointillé rouge, comprend R_p , P et 50m en amont) ; B_T = Zone de balayage du groupe témoin (encadré pointillé mauve, comprennent R_T , FP et 50 m en amont). (Inspirée de la figure 2.3 dans Coffman 2005).

Avant le début des séquences, un filet tressé (maille de $0,63 \text{ cm}^2$) était installé à l'aval de chaque zone de relâche pour éviter l'émigration vers l'aval des poissons marqués pendant la séquence (Armstrong *et al.*, 1999, Peterson *et al.*, 2005). Préalablement au relâchement des poissons, l'habitat des zones de balayage a été caractérisé. À chaque cinq mètres, la profondeur (cm), la vitesse moyenne (m/s) et la mesure de l'axe intermédiaire d'une particule (mm) représentative du substrat (Wolman, 1954, Kondolf

et al., 1992) ont été relevées en trois points sur un transect perpendiculaire à l'écoulement. Au jour 0 de la séquence, les poissons étaient libérés dans les zones de relâche, puis des balayages ponctuels avec l'antenne portable ont été effectués aux jours 1, 3 et 5. À chaque site, une seule personne a été désignée pour effectuer le balayage afin d'éviter un biais d'échantillonnage.

La personne munie de l'antenne portable devait se déplacer de l'aval vers l'amont en partant du filet jusqu'à la fin de la zone de balayage. Puisque la portée de détection de l'antenne était relativement restreinte (≤ 60 cm), le porteur d'antenne devait s'assurer de couvrir l'entièreté de la zone pour détecter tous les poissons présents. La position de chaque individu détecté était compilée en fonction des transects de caractérisation situés à chaque cinq mètres dans la zone de balayage.

4.2.4 Validation de la technique de balayage

Dans le but d'évaluer l'efficacité de détection des transpondeurs par l'antenne portable dans la zone de balayage des sites d'étude, un test de détection à l'aveugle a été pratiqué avant les séquences (Blind efficiency test). Au jour 0 de chaque séquence, 20 à 30 transpondeurs encapsulés dans des petits boîtiers de plastique lestés ont été dispersés à l'insu de la personne désignée pour le balayage sur le lit du cours d'eau sur une superficie approximative de 150 m^2 . Ensuite, la personne munie de l'antenne portable disposait de 25 minutes pour faire un balayage efficace (vitesse de balayage approximativement de $6 \text{ m}^2/\text{min}$) et détecter tous les transpondeurs enfouis en ignorant leurs nombres et leurs emplacements. Dans tous les cas, la personne désignée a été en mesure de retrouver 100% des transpondeurs, ce qui indique que le matériel télémétrique fonctionnait correctement et que la technique de balayage était adéquate. L'excellent résultat de ce test à l'aveugle concorde ou même surpasse ceux d'études existantes de validation de l'efficacité de détection (Cucherousset *et al.*, 2005, Linnansaari *et al.*, 2007, Sebring *et al.*, 2010).

4.2.5 Suivi des variables hydrauliques

À chaque site, une jauge à pression hydrostatique couplée à un thermographe (*Hobo, Onset*) a permis d'enregistrer le niveau d'eau du ruisseau et sa température en continu durant la séquence à raison d'une mesure toutes les quinze minutes. La vitesse moyenne de l'écoulement d'une section transversale du cours d'eau a été mesurée avec un courantomètre à hélice (*modèle 2100, Swoffer*). Pour ce faire, des mesures de vitesse moyennées sur un intervalle de trente secondes ont été relevées à 40 % du fond dans la colonne d'eau, à plusieurs points le long du profil. Ces vitesses d'écoulement de la coupe transversale ont servi à calculer ponctuellement des débits. En mettant en relation la pression hydrostatique et ces mesures ponctuelles de débit grâce à une courbe de tarage, le débit en continu durant la séquence de cinq jours a été estimé.

4.1 Évaluation de la méthode de marquage-localisation

En 2015, 339 saumons juvéniles dont 206 de la rivière Grande Cascapédia et 133 de la rivière Sainte-Marguerite ont été marqués pour le suivi de leurs déplacements dans 10 sites d'étude (6 sites avec un ponceau et 4 tronçons de cours d'eau témoins). Malgré cet effort de marquage considérable, seulement 6 passages de poissons à travers les ponceaux et 9 déplacements vers l'amont dans les sites témoins ont pu être observés grâce au balayage actif des sites d'étude avec le système d'antenne mobile. Il est donc difficile de déceler des tendances qui permettent de tirer des conclusions sur les valeurs seuils qui contribueraient à la création d'une barrière pour le déplacement des poissons à travers les ponceaux. Il semblerait que la méthode de marquage-localisation ne soit pas la plus adaptée à la conception d'un filtre statique à partir d'observations empiriques en milieu naturel, et ce, pour plusieurs raisons.

De façon générale, le pourcentage de poissons détectés par rapport au total d'individus marqués diminuait à chaque balayage avec un pourcentage médian de détection de 48,7 % au jour 1, 15,0 % au jour 3 et 13,2 % au jour 5. Ces balayages ponctuels des sites avec les antennes portables n'ont pas permis de documenter les informations critiques sur les mouvements des poissons entre les balayages. Les déplacements des

poissons pendant les séquences n'ont donc pas tous été relevés. Bien que le matériel nécessaire au balayage actif soit peu coûteux et facile à transporter, l'aspect ponctuel de la méthode de marquage-localisation est son principal désavantage (Bujold, 2010). De ce fait, un certain mystère persiste quant aux individus qui n'ont pas été détectés.

Le faible nombre de poissons détectés vers la fin des séquences laisse supposer une émigration importante hors des sites (vers l'aval ou vers l'amont), remettant en question l'imperméabilité du filet installé à l'aval de chaque site d'étude. La grande mobilité des poissons entraînant leur émigration hors des sites observés dans les premiers jours du suivi de leurs déplacements a déjà été mentionnée dans plusieurs articles (Peterson *et al.*, 2005, Enders *et al.*, 2007).

Aussi, la prédation pourrait en partie expliquer la diminution des détections durant les séquences. Dans l'est du Canada, les prédateurs potentiels du saumon juvénile en eau douce sont les poissons piscivores tels que l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*), une espèce présente dans les cours d'eau étudiés, les oiseaux piscivores comme le Martin pêcheur d'Amérique (*Ceryle alcyon*) et le grand harle (*Mergus merganser*) ainsi que certains mammifères, notamment le Vison (*Mustela vison*) et la Loutre de rivière (*Lontra canadensis*) (Bernatchez *et al.*, 1991, Metcalfe *et al.*, 1999).

En outre, les précipitations estivales exceptionnelles de l'année 2015 ont engendré des conditions hydrauliques particulières durant les séquences, notamment des eaux très froides (jusqu'à 4,9°C), des hausses de débit subites ainsi que des vitesses d'écoulement élevées allant jusqu'à 2,11 m/s. Ces conditions ont également pu contribuer aux faibles taux de déplacements vers l'amont des saumons juvéniles participants aux séquences. Par exemple, Goerig *et al.* (2016) ont observé que les probabilités du succès de passage d'ombles de fontaine à travers les ponceaux étaient maximisées à 15°C, ce qui correspond à la température optimale de performance aérobique de plusieurs salmonidés (Brett, 1964, Tudorache *et al.*, 2011). Lorsque la température de l'eau est sous 6 à 8°C, l'habileté des salmonidés juvéniles à nager contre un fort courant diminue rapidement, car leur taux métabolique s'abaisse (Jonsson *et al.*, 2009).

Bien que la validation de la technique de balayage effectuée avant chaque séquence sur tous les sites d'étude ait mené à d'excellents taux de détection, Aymes *et al.* (2009)

soulignent que l'efficacité de détection du matériel de télémétrie peut être influencée négativement par les conditions environnementales, notamment les fortes précipitations.

Pour l'ensemble de ces raisons, les résultats relatifs à la méthode marquage-localisation employée durant la saison de terrain 2015 ne seront pas présentés dans ce mémoire, car les données ne permettent pas la mise en relation de la morphométrie des ponceaux avec les succès de passage.

4.2 Amélioration de la méthodologie de suivi des déplacements

Afin de pallier au désavantage de la méthode de marquage-localisation mise à l'essai en 2015, le design expérimental a été amélioré pour l'été 2016. La méthode de marquage-suivi en continu a été sélectionnée pour optimiser les efforts déployés sur le terrain. Auparavant, cette méthode de suivi en continu avec un système fixe de télémétrie passive a été utilisée avec succès lors d'une étude sur l'usage de l'habitat aquatique dans un cours d'eau de petite taille par les salmonidés juvéniles (Patricia Johnston *et al.*, 2009b) et d'essais de passage à travers des ponceaux (Goerig *et al.*, 2016).

En 2016, les ponceaux à l'étude ont été instrumentés avec un système d'antennes fixes permettant de documenter en continu pendant une période de 48 heures la progression des poissons marqués dans la conduite (Goerig *et al.*, 2016). C'est en plaçant les groupes de poissons participants aux essais de passage dans une cage de rétention fixée à l'extrémité aval du ponceau que les scénarios de mouvement ont été restreints. En effet, les poissons pouvaient demeurer dans la cage durant toute la durée de l'essai ou n'avaient que pour seule issue d'effectuer une tentative volontaire d'ascension du ponceau. Ce design expérimental a permis de marquer moins de poissons et de se concentrer sur la franchissabilité des conduites plus que les déplacements globaux vers l'amont des poissons comme nous l'avons fait en 2015. Finalement, l'instrumentation fixe placée dans les ponceaux a permis d'éviter le balayage avec une antenne PIT mobile d'une grande section du cours d'eau, ce qui aurait tendance à biaiser les déplacements des poissons à cause du dérangement engendré (Peterson *et al.*, 2005).

4.3 L'importance de la pente du ponceau

La pente du ponceau semble être un prédicteur important du succès de passage des poissons (Coffman, 2005, Makrakis *et al.*, 2012, Goerig *et al.*, 2016). La pente fait office de variable statique de remplacement de la vitesse du courant que le poisson doit affronter pour franchir le ponceau. Les pentes abruptes auraient aussi un impact sur les relations entre la flottabilité et différentes forces agissant sur le corps du poisson. Ces forces s'annulent quand la pente est nulle et que le courant est statique. Franchir un ponceau dont la pente est abrupte nécessite un effort supplémentaire pour obtenir la force de propulsion nécessaire, car le poisson doit en plus élever sa masse verticalement. Behlke *et al.* (1991) comparent les poissons tentant de franchir des ponceaux à un humain qui tenterait de gravir un escalier roulant descendant à différentes vitesses et différents angles. Coffman (2005) aborde cet aspect supplémentaire à travers l'indice d'effort, une variable adimensionnelle inclut dans son filtre statique, résultant de la multiplication de la longueur et de la pente du ponceau qui témoigne de la quantité d'effort que doit fournir le poisson pour le franchir. En comparant les déplacements vers l'amont de groupe de poissons-témoins dans une section de ruisseau à ceux de poissons confrontés à un ponceau, la pente et l'indice d'effort se sont avérés être des facteurs déterminants du passage des salmonidés juvéniles à travers les ponceaux. De plus, d'après l'analyse de la classification des ponceaux inventoriés en 2014 avec le filtre de statique de Coffman (2005) du chapitre précédent, la pente et l'indice d'effort seraient les variables les plus limitantes pour le passage des saumons juvéniles.

4.4 Méthodologie : marquage-suivi en continu

4.4.1 Site d'étude

Les activités de terrain se sont déroulées durant les mois de juillet et août 2016 sur les ponceaux de trois tributaires de la rivière Sainte-Marguerite (Saguenay). Les sites

d'étude comprenaient plusieurs ponceaux implantés en parallèle (deux sites avec une traverse de cours d'eau double et un site avec une traverse de cours d'eau triple) pour un total de sept ponceaux de tôle ondulée galvanisée (TTOG) (tableau 4.1).

Tableau 4. 1 : Localisation et caractéristiques des sites d'étude (n=7) des travaux de terrain de 2016.

Site	Branche	Route	Latitude (N)	Longitude (O)	Diametre (m)	Longueur (m)	Pente (%)
Morin C1	Principale	Route 172	48°20,818'	70°03,638'	2,15	33,75	1,49
Morin C2	Principale	Route 172	48°20,818'	70°03,638'	2,20	33,75	1,36
Morin C3	Principale	Route 172	48°20,818'	70°03,638'	1,60	33,75	1,09
NE-01 C1	Nord-est	Chemin forestier	48°22,597'	69°49,347'	1,85	22,00	2,41
NE-01 C2	Nord-est	Chemin forestier	48°22,597'	69°49,347'	2,15	21,50	2,22
NE-02 C1	Nord-est	Chemin forestier	48°25,387'	69°49,855'	2,15	21,09	-0,46
NE-02 C2	Nord-est	Chemin forestier	48°25,387'	69°49,855'	2,15	21,12	0,31

4.4.2 Collecte et marquage des poissons

Pour chaque essai de passage, l'objectif était de marquer un groupe de saumons juvéniles de tailles variées avec des transpondeurs passifs TIRIS HDX (12 mm). Les saumons ont été récoltés lors de séances de pêche à l'électricité (tableau 4.2) (modèle LR-24 *Backpack Electrofisher, Smith-Root Inc.*) (pour les détails de la technique de marquage, se référer à la section 4.2 Méthodologie, sous-section 4.2.2 : collecte et marquage des poissons). Les séances de pêches ont eu lieu dans des ruisseaux à proximité des sites d'étude : le ruisseau Allaire, dans la section en aval du ponceau de béton (branche principale : 48°21.295' N ; 70°07.084' O) et le ruisseau Xavier, entre le pont et l'exutoire (branche Nord-est : 48°25.569' N; 69°55.271' O). Aucune section des ruisseaux n'a été pêchée plus d'une fois afin d'éviter l'impact négatif de pêcher à l'électricité successivement sur les poissons non récoltés. Les individus d'une taille inférieure à 60 mm n'ont pas été retenus pour le marquage et ont été immédiatement remis à l'eau. Immédiatement après les séances de pêche, les individus étaient transportés en bassin oxygéné par véhicule vers le site d'étude pour le marquage. Le

temps de transport variait de vingt à cinquante minutes et la température ainsi que l'état des poissons ont fait l'objet d'un suivi constant. Sur l'ensemble des poissons pêchés (n=195), une seule mortalité est survenue après la pêche, trois poissons sont morts dans les viviers durant le temps de repos alloué après le marquage et deux poissons ont été retrouvés morts dans la cage après les essais de passage. Puisque les mortalités survenues pendant les essais sont peut-être attribuables aux conditions hydrauliques durant ceux-ci, les mortalités liées directement à la procédure de marquage représentent 1,6% de l'échantillon, ce qui correspond aux taux de mortalité observés dans d'autres études (Zydlewski *et al.*, 2003, Hill *et al.*, 2006).

Tableau 4. 2 : Caractéristiques morphologiques des poissons marqués (n= 189).

	Longueur à la fourche (mm)	Poids (g)	Ratio poids Transpondeur-poisson (%)
Plus petit poisson	60	2,1	4,76
Plus gros poisson	145	33,5	0,30
Médiane	80	6,5	1,54

4.4.3 Essais de passage en cage

À l'intérieur du chaque ponceau, quatre antennes PIT stationnaires (figure 4.6, B) disposées à égale distance (entrée, 33%, 66% et sortie du ponceau) reliées à un enregistreur de données alimenté par une batterie 12V rechargée grâce à un panneau solaire, permettaient d'acquérir en continu lors de l'essai les données relatives aux mouvements des poissons marqués (figure 4.6, C). La taille des antennes variait selon le diamètre des ponceaux (petites antennes : 1,37 x 0,80 m ; moyennes antennes : 1,50 x 0,65 m ; grande antenne 1,82 x 0,78 m). Un groupe de poissons marqués (n=25 en moyenne) étaient placés immédiatement avant le début de l'essai de 48 heures dans une cage fixée à l'aval du ponceau (figure 4.6, A). Afin de diminuer le stress occasionné par la forte densité d'individu dans la cage pendant les essais, des roches y ont été

disposées pour procurer des cachettes et des zones de répit. Un essai de passage a été effectué sur chacun des sept ponceaux sélectionnés (tableau 4.3) et le temps écoulé entre le début de l'essai et la première détection à l'antenne 1 était de 3h15 en moyenne.

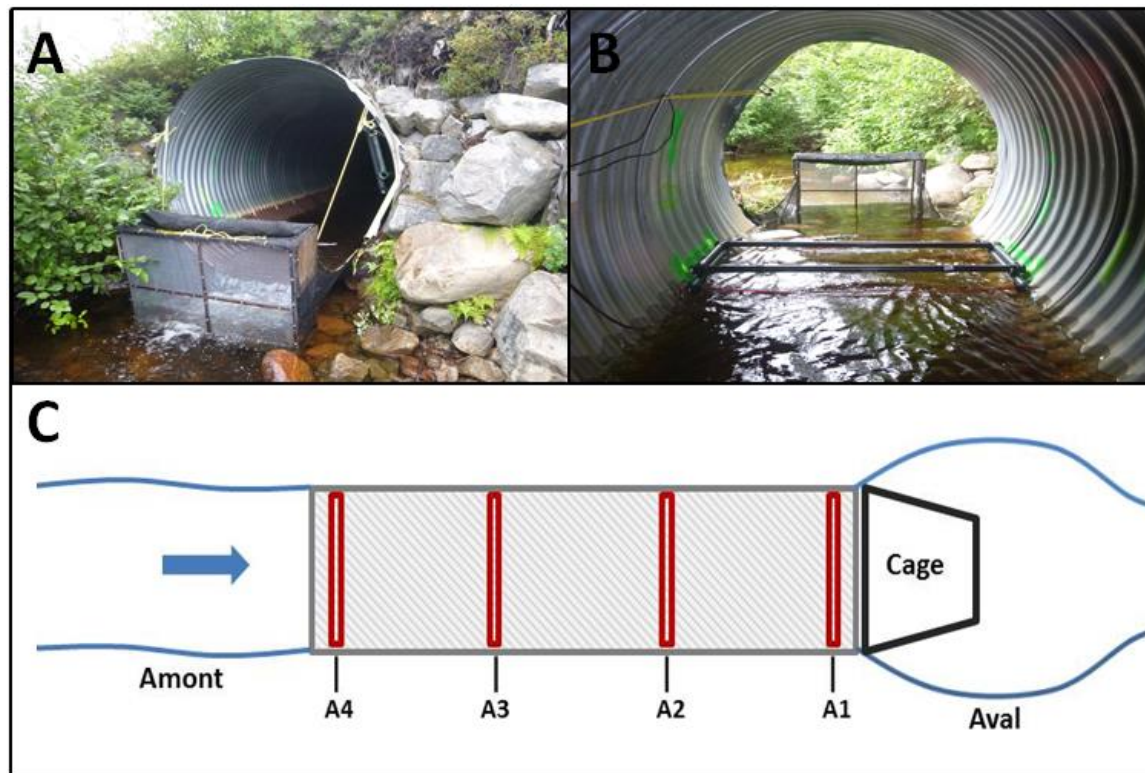


Figure 4. 6 : (A) Cage de rétention fixée en aval de la conduite . (B) Antenne posée au-dessus de l'eau dans un ponceau. (C) Schéma d'un système d'antennes PIT stationnaires (A1-A4) déployées dans un ponceau adapté de Goerig *et al.* (2016). La flèche bleue indique le sens de l'écoulement du cours d'eau.

Tableau 4. 3 : Caractéristiques des essais de passage (n=7) effectués en 2016.

Notes :

- Le terme « tentatives » fait référence au pourcentage d'individus marqués ayant effectué une tentative pendant l'essai.
- Le terme « succès » fait référence au pourcentage d'individus marqués qui ont réussi à franchir l'entièreté du ponceau pendant l'essai.

Essai	Branche	Date	Diamètre (m)	Longueur (m)	Pente (%)	Individus (n)	Tentatives (%)	Succès (%)	Débit (m ³ /s)	Vitesse eau (m/s)	Profondeur (m)	Température eau (°C)
Morin C1	Principale	20/07/2016	1,5	33,75	1,49	28	25,0	21,4	2,34	1,33	0,26	17,2
Morin C2	Principale	10/07/2016	2,2	33,75	1,36	31	45,2	38,7	1,93	1,11	0,21	16,6
Morin C3	Principale	07/08/2016	2,15	33,75	1,09	31	12,9	6,5	0,30	0,84	0,25	16,1
NE-01 C1	Nord-est	18/07/2016	1,85	22,00	2,41	26	100,0	73,1	0,23	0,26	0,25	17,1
NE-01 C2	Nord-est	31/07/2016	2,15	21,50	2,22	16	100,0	50,0	0,18	0,21	0,13	19,7
NE-02 C1	Nord-est	14/08/2016	2,15	21,09	-0,46	29	82,8	27,6	0,05	0,39	0,33	19,1
NE-02 C2	Nord-est	18/08/2016	2,15	21,12	0,31	28	78,6	25,0	1,05	0,71	0,21	20,5

4.4.4 Efficacité de détection des antennes fixes

Afin d'éviter la perte d'information sur les tentatives des poissons, les quatre antennes ont fait l'objet d'un réglage préalable à chaque essai pour s'assurer que la zone de détection de chacune d'elles soit optimale et couvre l'entièreté de la profondeur d'eau. Pour ce faire, la zone de détection verticale et horizontale a été mesurée en approchant un transpondeur perpendiculairement vers le cadre de l'antenne jusqu'à ce qu'elle le détecte. L'envergure de détection moyenne et maximale était respectivement de 15 cm et 35 cm horizontalement puis 34 cm et 45 cm verticalement, ce qui est remarquable considérant l'utilisation de petits transpondeurs de 12 mm (Castro-Santos *et al.*, 1996, Cucherousset *et al.*, 2005, P. Johnston *et al.*, 2009a). Les données enregistrées lors des essais de passage ont ensuite permis de calculer l'efficacité de détection des antennes placées en position 1, 2 et 3 à partir des détections de l'antenne quatre. Selon Aymes *et al.* (2009), l'efficacité de détection pourrait varier selon l'orientation du tag par rapport à l'antenne, la présence simultanée de plusieurs transpondeurs dans le champ de détection et la vitesse de nage du poisson. En effet, des vitesses de nage très élevées peuvent surpasser la capacité de lecture des antennes (1 lecture par seconde dans ce cas-ci).

4.4.5 Calcul de l'indice d'effort

Les profils de pentes du fond des ponceaux ont été produits en mesurant leurs élévations aux extrémités amont et aval ainsi que tout au long de la conduite avec à un altimètre à haute précision (*ZIPLEVEL Pro-2000*[®], *Technidea Corporation*). Les essais de passage ont permis de se concentrer sur deux variables d'intérêts, la pente et la longueur des conduites, dont les impacts sur la passabilité des ponceaux ont été suggérés dans la littérature (se référer à la section 4.3 L'importance de la pente du ponceau).

Pour mesurer l'impact combiné de la pente et la longueur dans le cadre de l'analyse des essais de passage, l'indice d'effort développé par Coffman (2005) a été modifié.

L'indice d'effort (IE) a été calculé selon la localisation des quatre antennes pour chacun des essais en fonction de la pente et de la distance à parcourir pour les atteindre.

$$IE = D * (P + 1) \quad (1)$$

Où D est la distance (m) d'un point donné à partir de l'extrémité aval du ponceau

P est la pente (%) à un point donné

Pour éviter les inconvénients liés au calcul de l'indice d'effort des antennes avec des variables de pentes négatives (figure 4.10), certaines valeurs ont été ramenées à zéro pour la simple raison qu'une pente négative témoigne d'un retour d'eau dans la conduite, ce qui la rend plus facile à franchir pour le poisson. La valeur «un» a été ajoutée à la pente de façon à ce que, lorsque la pente est nulle, l'indice d'effort soit directement proportionnel à la distance.

4.4.6 Suivi des variables hydrauliques

Les variations du niveau d'eau, de la température et du débit durant les essais ont été monitorées de la même manière que lors des séquences de suivi des déplacements effectués en 2015 (se référer au Chapitre 4, section 4.2.5 Suivi des variables hydrauliques) (tableau 4.4). Juste avant chaque essai de passage, la vitesse de surface de l'écoulement dans le ponceau a été mesurée en divisant une distance connue par le temps qu'un objet flottant a pris pour la franchir. La vitesse d'écoulement et la profondeur d'eau moyennes dans la conduite au temps 0 ont également été calculées. À l'extrémité amont, à l'extrémité aval et à chaque deux mètres dans le ponceau, la largeur de l'écoulement, la profondeur ainsi que vitesse moyenne à 40% du fond ont été mesurées au centre de la conduite correspondant à la partie la plus creuse (figure 4.7).

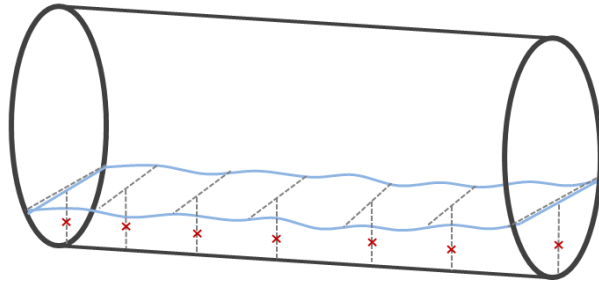


Figure 4. 7 : Schéma des points de mesure de la largeur de l'écoulement, de la profondeur et de la vitesse moyenne mesurée au centre de la conduite à l'extrémité amont, à l'extrémité aval et à chaque deux mètres avec le courantomètre à hélice.

Tableau 4. 4 : Valeurs de dispersion des variables hydrauliques de l'écoulement dans les ponceaux pendant les essais de passage (n=7) effectués à l'été 2016. Les variables relatives à la vitesse de l'écoulement (*) proviennent de mesures ponctuelles effectuées au temps 0 des essais. L'écart-type est présenté entre parenthèses.

Essai	Débit moyen (m ³ /s)	Vitesse moyenne de l'écoulement* (m/s)	Vitesse moyenne de surface* (m/s)	Profondeur (m)	Température (°C)
Morin C1	2,34 (1,47)	1,33 (0,26)	1,63	0,26 (0,05)	17,2 (1,07)
Morin C2	1,93 (0,32)	1,11 (0,30)	1,37	0,21 (0,01)	16,6 (1,87)
Morin C3	0,30 (0,02)	0,84 (0,27)	0,88	0,25 (0,01)	16,1 (1,46)
NE-01 C1	0,23 (0,02)	0,26 (0,24)	0,81	0,25 (0,02)	17,1 (1,66)
NE-01 C2	0,18 (0,01)	0,20 (0,20)	0,32	0,13 (0,00)	19,7 (1,95)
NE-02 C1	0,05 (0,01)	0,39 (0,24)	0,40	0,33 (0,02)	19,1 (1,46)
NE-02 C2	1,05 (0,17)	0,71 (0,19)	0,81	0,21 (0,01)	20,5 (1,44)
Valeur moyenne	0,87 (0,93)	0,68 (0,43)	0,89 (0,48)	0,23 (0,06)	18,0 (1,69)

4.5 Résultats

4.5.1 Profil des ponceaux

Les profils longitudinaux des ponceaux instrumentés illustrent l'irrégularité de la pente et les cassures récurrentes du relief (figures 4.8, 4.9 et 4.10). À la sortie des conduites, l'accélération de la vitesse de l'écoulement fait diminuer la profondeur de l'eau (figures 4.8 et 4.10). À travers la remontée du ponceau, les poissons étaient soumis à une gamme de vitesses moyennes très variables.

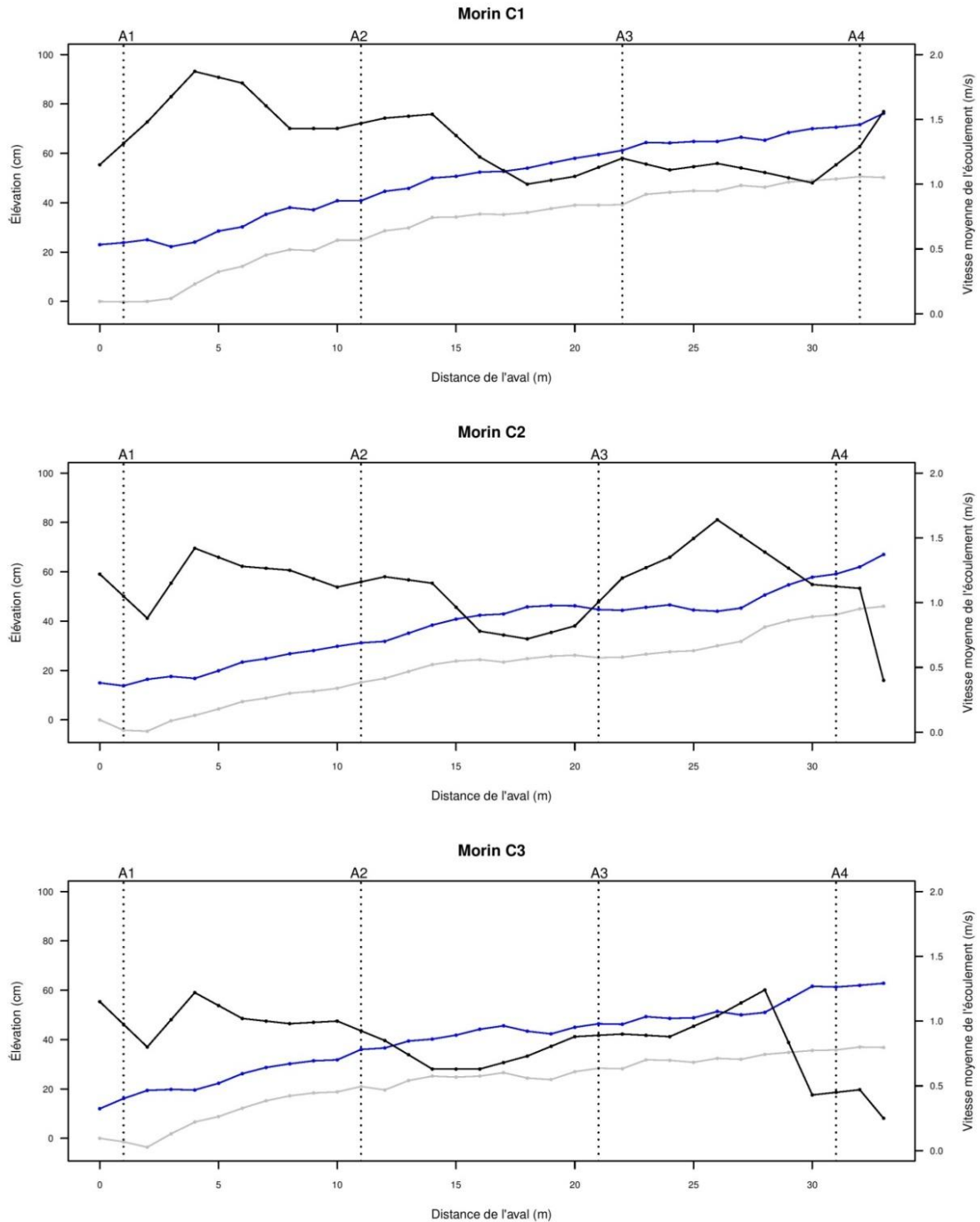


Figure 4. 8 : Profil longitudinal des conduites du site Morin illustrant l'élévation du fond (ligne grise), la surface de l'eau (ligne bleue) et la vitesse moyenne de l'écoulement (ligne noire) à chaque mètre, à partir de l'aval. La position des antennes est indiquée par les lignes verticales pointillées.

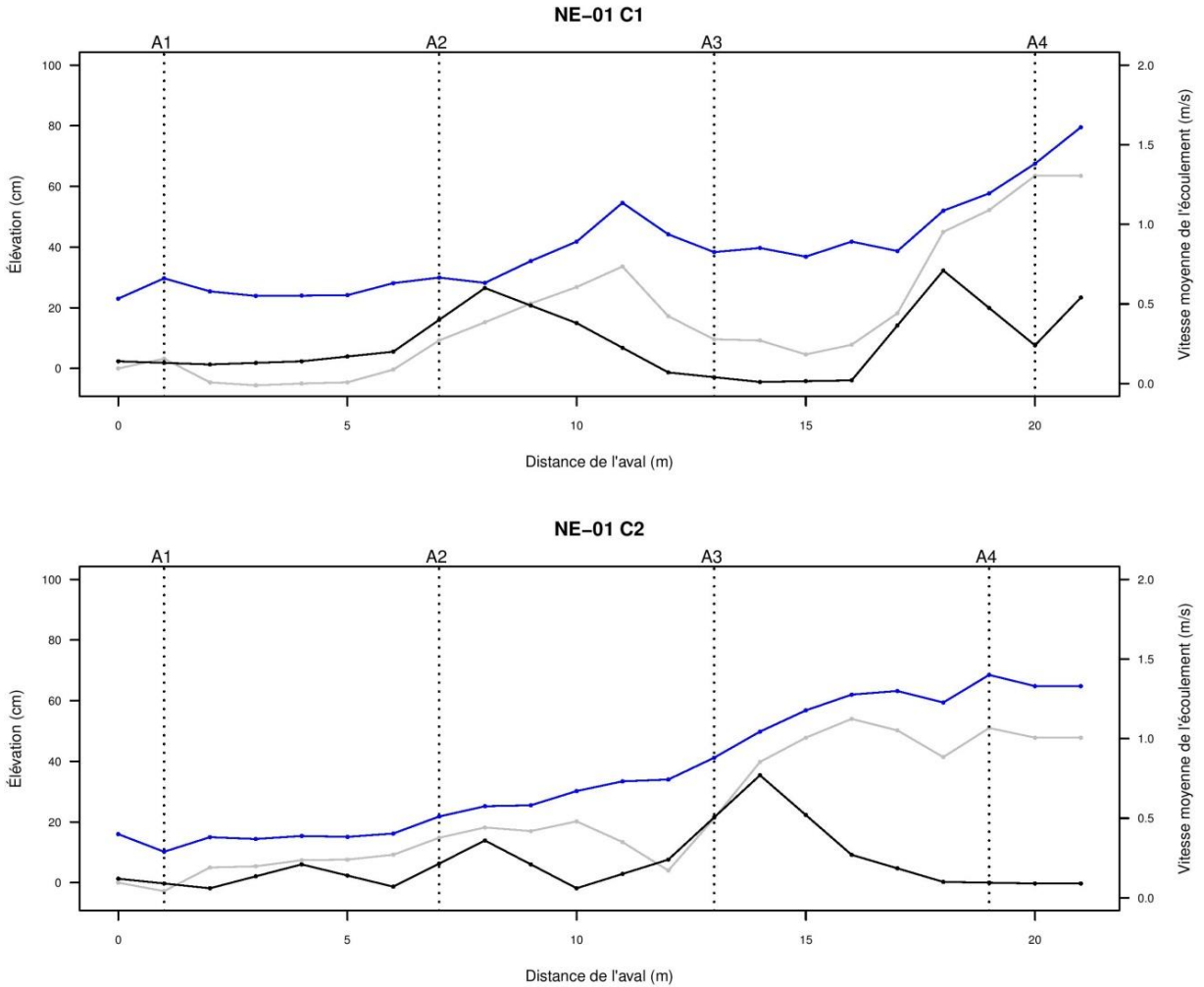


Figure 4. 9 : Profil longitudinal des conduites du site NE-01 illustrant l'élévation du fond (ligne grise), la surface de l'eau (ligne bleue) et la vitesse moyenne de l'écoulement (ligne noire) à chaque mètre, à partir de l'aval. La position des antennes est indiquée par les lignes verticales pointillées.

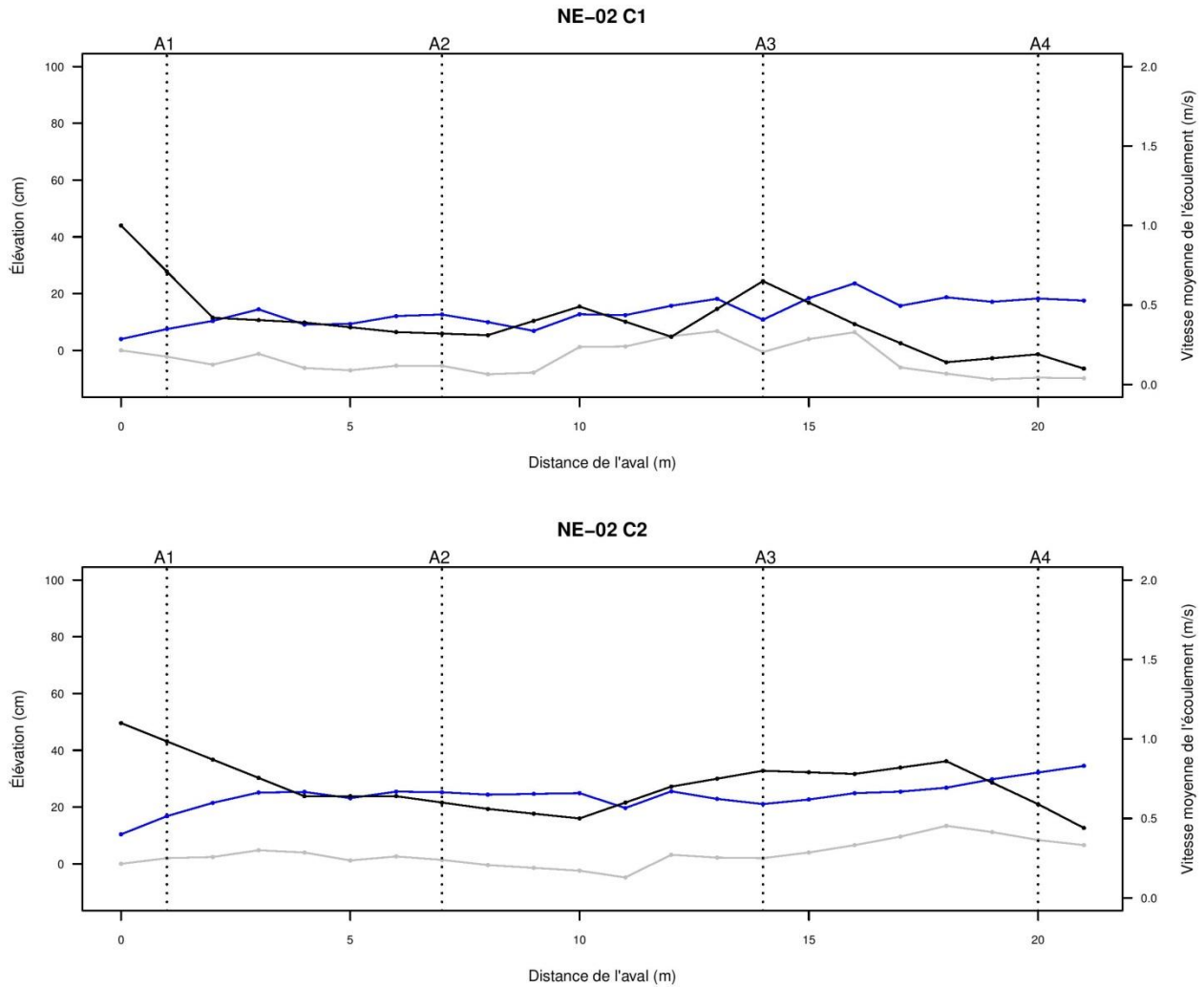


Figure 4. 10 : Profil longitudinal des conduites du site NE-02 illustrant l'élévation du fond (ligne grise), la surface de l'eau (ligne bleue) et la vitesse moyenne de l'écoulement (ligne noire) à chaque mètre, à partir de l'aval. La position des antennes est indiquée par les lignes verticales pointillées.

4.5.2 Efficacité de détection des antennes fixes

De façon générale, l'efficacité de détection des antennes 1, 2 et 3 était bonne (tableau 4.5). Dans la plupart des cas, les trois premières antennes avaient une efficacité de détection optimale. Pendant trois des essais, l'efficacité de ces antennes s'est avérée inférieure à 100%, allant de 79% à 96%.

Tableau 4. 5 : Efficacité de détection des antennes pendant les essais. L'antenne 4 correspond au point de référence pour le calcul de l'efficacité de détection des autres antennes.

Site	A1 (%)	A2 (%)	A3 (%)	A4 (%)
Morin C1	100	100	100	100
Morin C2	79	100	100	100
Morin C3	100	100	100	100
NE-01 C1	85	96	95	100
NE-01 C2	100	100	91	100
NE-02 C1	100	100	100	100
NE-02 C2	91	100	100	100

4.5.3 Essais de passage

De l'ensemble des poissons marqués placés dans les cages de rétention (n=189), environ le tiers ont réussi à franchir complètement le ponceau auquel ils étaient confrontés (tableau 4.6). De plus, quarante pour cent sont demeurés dans la cage et n'ont pas fait de tentatives pendant les 48 heures des essais.

Tableau 4. 6 : Progression maximale de chaque poisson marqué l'été 2016 (n=189), selon leur détection, tous essais confondus.

Inférence de progression	Poissons (n)	Poissons (%)
Non détectés (Cage)	76	40,2
Antenne 1	15	7,9
Antenne 2	21	11,1
Antenne 3	15	7,9
Antenne 4	62	32,9

D'après la distribution de taille des poissons de chaque branche de la rivière Sainte-Marguerite, les individus pêchés dans la branche Nord-est sont de plus grandes tailles que ceux de la branche principale (figure 4.11). Un test statistique non paramétrique de *Wilcoxon-Mann-Whitney* a été employé afin de comparer la distribution des longueurs à la fourche (mm) des poissons des deux branches. Les poissons de la branche Nord-est sont significativement plus gros ($p \leq 0,05$) (figure 4.12) comme l'indique le décalage de la cloche de la distribution de taille vers la droite (figure 4.11). En raison des différences de taille entre les groupes d'individus des sept essais, l'échantillon de poissons a été divisé en trois classes de taille (petit, moyen et grand, respectivement entre 60 et 74 mm, 75 et 84 mm et >85 mm) pour des fins d'analyses (tableau 4.7). Les groupes d'individus des essais effectués sur les ponceaux du ruisseau Morin sont majoritairement composés de petits poissons tandis que ceux effectués sur les ponceaux des tributaires de la Branche Nord-est sont plutôt constitués de moyens et grands individus. Le plus faible succès de passage (6,5 %) est attribuable au site Morin C3 tandis que le meilleur (73,1 %) est survenu durant l'essai sur le site NE-01 C1 (tableau 4.8). Dans certains cas, la plupart des poissons qui ont fait des tentatives ont réussi à franchir complètement la conduite, notamment durant les essais Morin C1 et Morin C2.

Tableau 4. 7 : Caractéristiques morphologiques des poissons marqués (n= 189) et répartition des classes de tailles pour les 7 essais de passage (7).

Essai	Branche	Date	Individus (n)	Longueur à la fourche moyenne (mm)	Poids moyen (g)	Petits (60-74 mm) (n)	Moyens (75-84 mm) (n)	Grands (>85 mm) (n)
Morin C1	Principale	20/07/2016	28	75 (11)	5,6 (2,0)	20	4	4
Morin C2	Principale	10/07/2016	31	84 (16)	8,8 (5,3)	18	7	6
Morin C3	Principale	07/08/2016	31	71 (13)	5,5 (3,1)	17	5	9
NE-01 C1	Nord-est	18/07/2016	26	82 (10)	7,3 (2,5)	5	14	7
NE-01 C2	Nord-est	31/07/2016	16	77 (12)	5,5 (2,4)	3	9	4
NE-02 C1	Nord-est	14/08/2016	29	94 (15)	11,4 (6,2)	0	9	20
NE-02 C2	Nord-est	18/08/2016	28	90 (15)	9,5 (5,6)	1	12	15

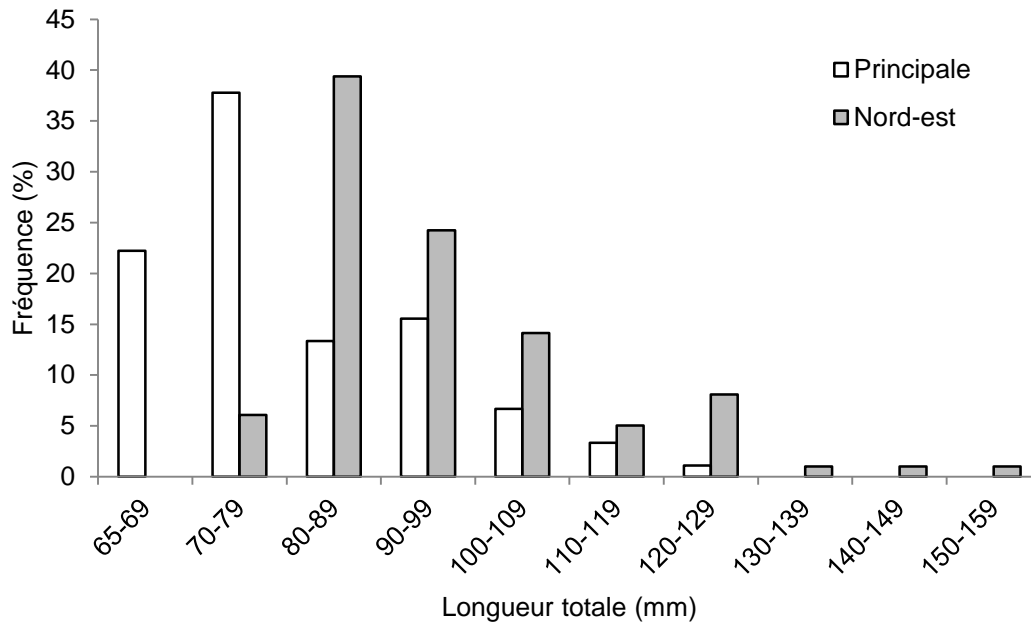


Figure 4. 11 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des poissons de la rivière Sainte-Marguerite pour la branche principale (n=90) et la branche nord-est (n=99) ayant participé aux essais de passage effectués à l'été 2016.

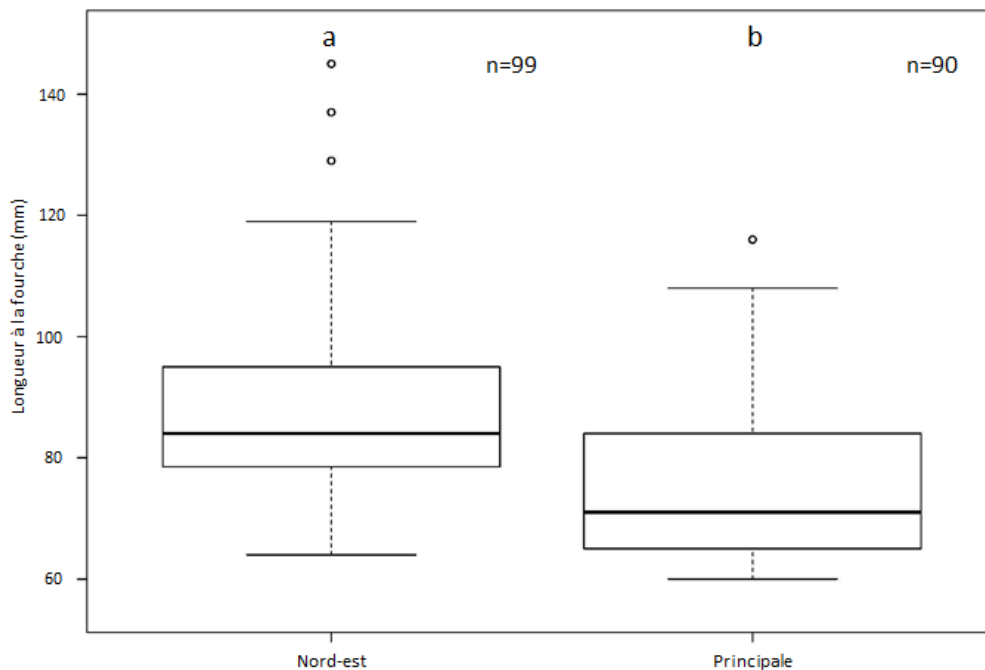


Figure 4. 12 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des poissons de la rivière Sainte-Marguerite ayant participé aux essais de passage effectués à l'été 2016 divisé par branche (Nord-est ; n=99 et Principale ; n=90).

Tableau 4. 8 : Détections à chaque antenne en termes de progression maximale des poissons marqués (n=189) et répartition des classes de tailles par essais de passage

Essai	Branche	Date	Individus (n)	Petits (60-74 mm) (n)	Moyens (75-84 mm) (n)	Grands (>85 mm) (n)	A1 (n)	A2 (n)	A3 (n)	A4 (n)	A1 (%)	A2 (%)	A3 (%)	A4 (%)
Morin C1	Principale	20/07/2016	28	20	4	4	7	6	6	6	25,0	21,4	21,4	21,4
Morin C2	Principale	10/07/2016	31	18	7	6	14	13	12	12	45,2	41,9	38,7	38,7
Morin C3	Principale	07/08/2016	31	17	5	9	4	2	2	2	12,9	6,5	6,5	6,5
NE-01 C1	Nord-est	18/07/2016	26	5	14	7	26	25	21	19	100	96,2	80,8	73,1
NE-01 C2	Nord-est	31/07/2016	16	3	9	4	16	14	11	8	100	87,5	68,8	50,0
NE-02 C1	Nord-est	14/08/2016	29	0	9	20	24	19	12	8	82,8	65,5	41,4	27,6
NE-02 C2	Nord-est	18/08/2016	28	1	12	15	22	20	13	7	78,6	71,4	46,4	25,0

Les individus qui sont demeurés dans la cage sans être détectés pendant les essais sont significativement plus petits que ceux qui ont été détectés (figure 4.13). À l'exception des poissons entre 120 et 139 mm de taille qui représentaient seulement 2 individus, moins de la moitié des individus des autres classes de taille ont réussi un passage à travers du ponceau (tableau 4.9). Les plus petits poissons (entre 60 et 69 mm) ont eu le pourcentage de réussite de passage le plus faible.

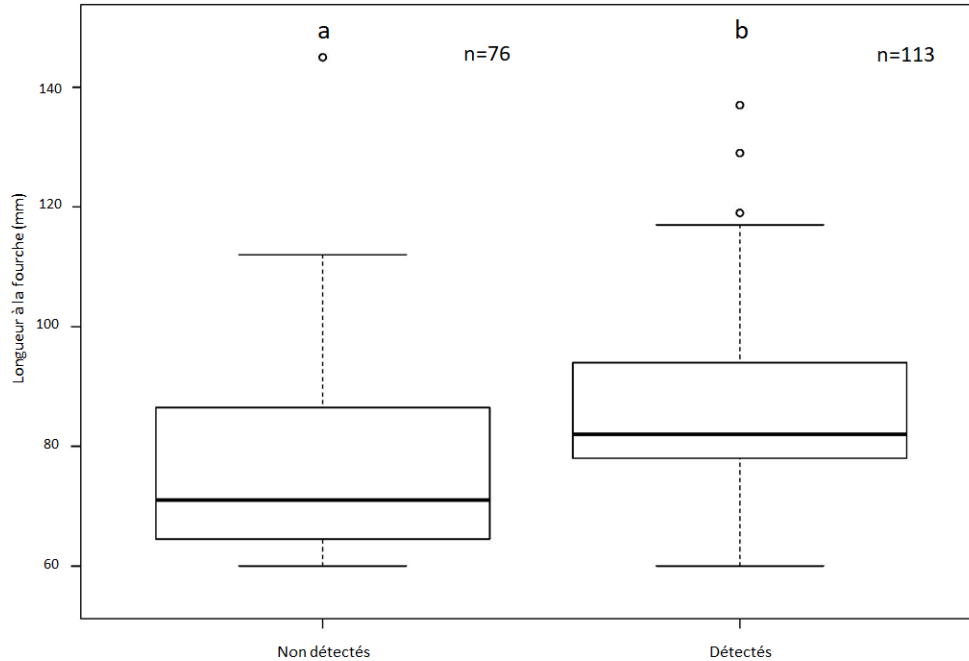


Figure 4. 13 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des poissons ayant participé aux essais de passage effectués à l'été 2016 selon leur détection (Non détectés ; n=76 et détectés ; n=113). Les poissons non détectés sont ceux demeurés dans la cage durant toute la durée de l'essai qui n'ont pas fait de tentative.

Tableau 4. 9 : Réussite de passage par classes de taille des poissons marqués (n=189) ayant participé aux essais de passage effectués à l'été 2016.

Classes de taille	Individus (n)	Franchisseurs (n)	Franchisseurs (%)
[60-70[	45	7	15,6
[70-80[	48	17	35,4
[80-90[	50	22	44,0
[90-100[	24	8	33,3
[100-110[	9	2	22,2
[110-120[	10	4	40,0
[120-130[	1	1	100,0
[130-140[	1	1	100,0
[140-150[	1	0	0,0

4.5.4 Modèle prédictif de passage des poissons

Une régression linéaire multiple a été employée pour évaluer l'impact des paramètres mesurés sur la progression maximale des poissons marqués. Durant les essais, les poissons avaient la possibilité d'effectuer plusieurs tentatives de passage, mais seulement la meilleure tentative de chaque poisson en termes de remontée du ponceau a été considérée pour cette l'analyse. Malgré le fait qu'ils n'ont pas effectué de tentatives, les poissons qui n'ont pas été détectés et qui sont demeurés dans la cage de rétention ont aussi été pris en compte dans l'analyse. La variable réponse du modèle est le pourcentage de poissons marqués détectés à une antenne. Les huit variables considérées dans la conception du modèle sont les suivantes : la distance entre l'extrémité aval du ponceau et l'antenne considérée, la pente du ponceau calculée sur cette même distance, la pente totale du ponceau, l'indice d'effort calculé à l'antenne, l'indice d'effort total du ponceau, la température de l'eau, le débit et la vitesse moyenne de l'écoulement dans le ponceau pendant l'essai. Une matrice de corrélation de Spearman a été utilisée afin d'identifier les corrélations statistiquement significatives ($p \leq 0,05$) et éviter la sélection de variables colinéaires qui entraînerait un biais de performance du modèle (tableau 4.10).

Tableau 4. 10 : Matrice de corrélation de Spearman des paramètres considérés pour la conception du modèle prédictif de passage des poissons à travers les ponceaux. Les corrélations significatives ($p \leq 0,05$) sont en gras.

	Poissons détectés (%)	Distance à l'antenne (m)	Pente à l'antenne (%)	Pente totale (%)	Indice d'effort à l'antenne	Indice d'effort total	Temp. eau (°C)	Débit moyen (m ³ /s)	Vitesse moyenne (m/s)
Poissons détectés (%)	1	-0,52	0,12	0,34	-0,39	-0,32	0,44	-0,40	-0,70
Distance à l'antenne (m)	-0,52	1	0,24	0,00	0,88	0,90	-0,23	0,21	0,27
Pente à l'antenne (%)	0,12	0,24	1	0,59	0,56	0,49	-0,22	0,03	-0,06
PenteTotale (%)	0,34	0,00	0,59	1	0,30	0,36	-0,35	0,00	-0,19
Indice d'effort à l'antenne	-0,39	0,88	0,56	0,30	1	0,97	-0,33	0,23	0,24
Indice d'effort total	-0,32	0,90	0,49	0,36	0,97	1	-0,33	0,21	0,19
Temp. eau (°C)	0,44	-0,23	-0,22	-0,35	-0,33	-0,33	1	-0,28	-0,48
Débit moyen (m ³ /s)	-0,40	0,21	0,03	0,00	0,23	0,21	-0,28	1	0,89
Vitesse moyenne (m/s)	-0,70	0,27	-0,06	-0,19	0,24	0,19	-0,48	0,89	1

La stratégie de sélection employée pour obtenir le meilleur modèle était de type pas à pas vers l'avant (*stepwise model selection, forward selection*). Pour ce faire, il s'agit de sélectionner une première variable et de construire peu à peu le modèle en ajoutant les autres variables une à une en s'assurant de leur signification jusqu'à ce que le R²-ajusté plafonne. Le processus prend fin lorsqu'aucune autre variable ne joue une importance significative dans l'amélioration du modèle. Pour éviter le biais causé par les différences de taille des groupes de poissons entre les essais, l'échantillon a été divisé selon les trois classes de taille (petit, moyen et grand, respectivement entre 60 et 74 mm, 75 et 84 mm et >85 mm), mais les progressions maximales n'étaient pas significativement liées aux classes de tailles, alors l'échantillon a été analysé sans égard à ses classes de tailles.

Le modèle de régression linéaire multiple le plus performant indique que le pourcentage de poissons marqués détectés à une antenne donnée est influencé par la distance parcourue et la vitesse de l'écoulement moyen (R² ajusté = 0,57 ; RMSE = 18.71) (équation 2). Donc, le pourcentage de poissons marqués détectés à une antenne est expliqué à 57% par la distance et la vitesse de l'écoulement. Les deux variables explicatives ont une influence négative sur la variable réponse, mais c'est la vitesse de l'écoulement qui a le plus de poids dans cette relation. Le modèle a tendance à surestimer dans certain cas ou à sous-estimer d'en d'autres le pourcentage de poissons détectés aux antennes. La sous-estimation est marquée pour les antennes 4 (figure 4.14)

Poissons détectés aux antennes (%) =

$$94,168 - \text{Distance (m)}(1,094) - \text{Vitesse de l'écoulement } \left(\frac{m}{s}\right)(44,572) \quad (2)$$

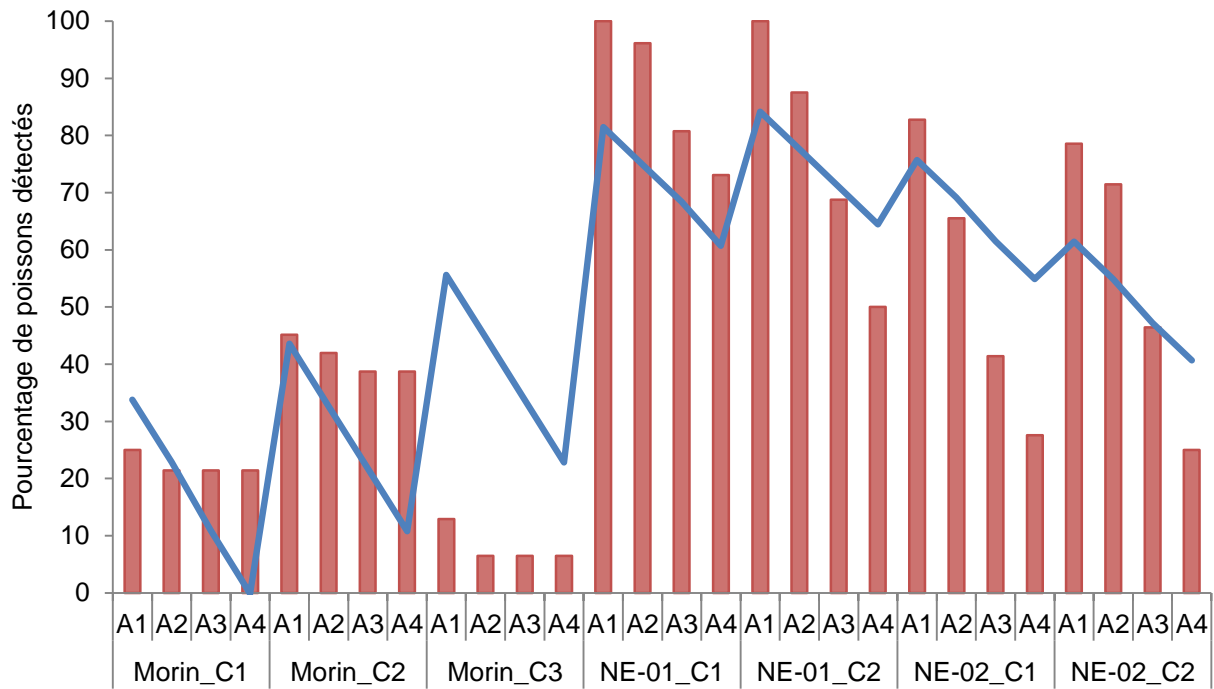


Figure 4. 14 : Pourcentage de poissons détectés aux antennes prédit par le modèle (ligne bleue) par rapport aux données obtenues lors des essais de passage de 2016 (bâtonnets rouges).

4.6 Discussion

Cette étude décrit les performances de passage de 189 saumons juvéniles à travers sept ponceaux. Les données de détection des essais de passage ont permis d'établir un lien entre la progression maximale des individus et la distance à parcourir ainsi que la vitesse de l'écoulement. Cette dernière semble avoir eu le plus d'impact sur l'issue des essais de passage. D'autres auteurs font mention de l'impact négatif de la vitesse de l'écoulement sur les performances de passage (Haro *et al.*, 2004, Peterson *et al.*, 2013).

En plus de la morphométrie des ponceaux et des conditions hydrauliques, l'aspect multivarié des essais de passage en milieu naturel englobe une foule de facteurs qui influencent le succès de passage, notamment les aspects physiologiques et comportementaux des individus ainsi que leurs capacités de nage (Goerig *et al.*, 2016). Cela dit, ce sont les poissons de plus petites tailles (entre 60 et 69 mm) qui ont eu le moins bon succès de passage. En effet, même si les groupes de poissons étaient placés dans une cage offrant seulement deux alternatives durant l'essai, c'est-à-dire effectuer une tentative ou demeurer dans la cage, les poissons qui n'ont pas fait de tentatives sont significativement plus petits que ceux qui ont été détectés. En considérant le succès de passage en fonction d'un groupe d'individus (Haro *et al.*, 2004), ces résultats démontrent que les ponceaux nuisent aux libres déplacements des poissons et spécialement aux jeunes tacons. Le succès de passage plus faible pour les petits individus est cohérent avec ce qui est énoncé dans la littérature à propos des habiletés de nage selon la taille des poissons. Plusieurs études démontrent que les grands poissons auraient plus de chance de franchir les ponceaux (Belford *et al.*, 1989, Behlke *et al.*, 1991) et les passes migratoires (Baker, 2014) puisqu'ils sont de meilleurs nageurs (Blake, 1983).

Dans tous les cas, le modèle prédit plus au moins bien le decrescendo du pourcentage de poissons détectés allant de l'antenne un à quatre. Cela pourrait être dû au fait que les poissons n'ayant pas fait de tentatives ont été considérés dans l'analyse. Avec un plus grand échantillon de détections, le même modèle serait peut-être meilleur pour prédire le pourcentage de détection en considérant seulement les poissons qui ont fait

des tentatives et en excluant ceux qui sont demeurés dans la cage durant les essais de passage. Dans le cas de l'essai Morin C3, le modèle surestime largement le pourcentage de poissons détectés aux quatre antennes. Cette conduite est celle avec le plus petit diamètre (1,60 m) et le thermographe dans le ruisseau Morin a enregistré la température d'eau la plus froide durant cet essai (16,1 °C). Alors malgré la vitesse du courant et le débit modéré durant l'essai, il est probable que la concentration de l'écoulement dans la conduite et la température ait empêché les poissons, qui étaient pour la plupart de petite taille, d'effectuer des tentatives de passage.

Le modèle n'a pas permis de tirer des conclusions quant à la relation entre la progression maximale du groupe d'individus et la pente ou l'indice d'effort calculé aux antennes. Comme les valeurs de pentes des ponceaux instrumentés étaient plutôt faibles (entre -0,46 et 2,41%), il se peut qu'elles n'aient pas été suffisamment fortes pour mesurer l'influence significative de cette variable sur le passage des poissons. Afin de discriminer l'influence de la pente sur le succès de passage, il serait avisé de procéder à des essais de passage sur des ponceaux avec des valeurs de pente plus abrupte, puisque cette variable a été maintes fois identifiée comme un élément important de la passabilité des ponceaux (Coffman, 2005, Pépino *et al.*, 2012, Goerig *et al.*, 2016). Plusieurs auteurs suggèrent qu'au-delà de 3,5%, la pente contribue à rendre les ponceaux difficilement franchissables pour les poissons. L'analyse des données des essais de passage indique que la pente des ponceaux et les vitesses moyennes d'écoulement ne sont pas corrélées significativement. Cela peut s'expliquer par le fait que les pentes étaient toutes très faibles, voire négatives dans certains cas et que les profils du fond des ponceaux ondulés instrumentés étaient très irréguliers. Probablement qu'une plus forte corrélation linéaire entre la pente et la vitesse de l'écoulement aurait été observée avec des ponceaux à pente abrupte aux profils longitudinaux plus réguliers, comme dans le contexte d'essais de passage en laboratoire.

Bien que les ponceaux instrumentés à l'été 2016 n'aient pas de chute à leur extrémité aval, il demeure que la hauteur d'une chute directement en aval d'une traverse de cours d'eau est un prédicteur du succès de passage des ponceaux plusieurs fois reconnu (Warren *et al.*, 1998, Taylor *et al.*, 2003, Poplar-Jeffers *et al.*, 2009). Dans la visée de

concevoir un modèle impliquant seulement des variables statiques comme la longueur, la pente et la hauteur de la chute, il serait avisé de reproduire le protocole de télémétrie fixe sur un plus grand nombre de ponceaux aux morphométries variés avec des groupes de poissons avec une gamme de tailles variées, mais dont la distribution de taille est semblables entre les essais de passage.

Dans l'ensemble, l'efficacité de détections des antennes est remarquable vu l'utilisation de petits transpondeurs de 12mm. Le pas de temps de lecture du système de télémétrie fixé à une lecture par seconde est peut-être responsable d'une perte d'information sur le déplacement des poissons qui ont fait une rapide ascension en sprintant, expliquant ainsi la perte d'efficacité de détection de certaines antennes. Afin d'éviter les fausses détections à la première antenne (antenne 1) des poissons demeurant dans la cage de rétention, elles ont toutes été positionnées à un mètre en amont de l'exutoire de la conduite. Pour cette raison, Il est possible que le système n'ait pas enregistré toutes les tentatives de passage des petits poissons, car il était plus difficile pour eux d'atteindre la première antenne en comparaison avec les plus grands individus. De ce fait, il est probable que les tentatives des plus petits poissons aient été sous-estimées. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de petits transpondeurs passifs (12 mm) et d'une méthode de marquage minimalement invasive se sont avérés efficaces et ont sans doute minimisé l'impact de la télémétrie sur les performances de nage des poissons énoncé dans la littérature (Ombredane *et al.*, 1998, Gries *et al.*, 2002, Bateman *et al.*, 2006). La méthode de marquage-suivi en continu demeure appropriée pour le suivi des déplacements des poissons de petite taille comme le saumon juvénile à travers les ponceaux.

Les conclusions tirées de cette analyse soulignent l'importance d'éviter de circonscrire l'écoulement d'un cours d'eau dans une conduite trop étroite, spécialement lorsqu'elle est longue, pour ne pas augmenter la vitesse de l'écoulement. Afin de favoriser la dispersion des jeunes stades de vie du saumon à travers le réseau hydrographique d'une rivière et de favoriser l'accès aux habitats de qualité que sont les tributaires, les ponceaux devraient permettre le libre déplacement des petits poissons comme les jeunes tacons toute l'année. Une attention particulière devrait être portée sur les

ponceaux à proximité du tronçon principal de la rivière et à proximité des frayères et des aires de taconnage.

5 COMPORTEMENT EXPLORATOIRE DU SAUMON JUVÉNILE : LE RÔLE DE LA PERSONNALITÉ

5.1 Introduction

Dans l'évaluation de la passabilité d'une structure comme un ponceau, la variabilité individuelle chez une population de poisson ajoute à la complexité de la tâche (Kemp *et al.*, 2010). La décision d'un poisson de franchir un obstacle relève de plusieurs facteurs, notamment de sa capacité de nage, mais aussi de sa motivation. Au-delà de ces deux facteurs, la personnalité aurait également un impact sur le comportement individuel (Reale *et al.*, 2007). En écologie comportementale, la personnalité se définit comme une tendance comportementale persistante dans le temps chez un individu qui affecte ses actions dans divers contextes. La personnalité se détaille en cinq traits distincts : la timidité/l'audace, l'exploration, l'activité, l'agressivité et la sociabilité (Reale *et al.*, 2007). C'est pourquoi chez la même espèce, deux individus confrontés à une situation semblable peuvent réagir de façon différente. Ce chapitre s'intéresse au thème de la personnalité en exposant les résultats d'un test effectué à l'été 2015 visant à évaluer le comportement exploratoire d'un échantillon de saumons juvéniles. Au départ, l'objectif de la méthodologie développée était de mettre en lien les données de déplacement des individus marqués durant l'été 2015 avec leur comportement adopté lors du test. Le but de la démarche était de déterminer si les individus audacieux étaient plus enclins à faire des grands déplacements et à franchir les ponceaux. Cependant, les faibles taux de recaptures n'ont pas permis de lier l'analyse du test aux déplacements.

5.2 Méthodologie

5.2.1 Site d'étude

Les saumons qui ont été utilisés pour le test de personnalité *in situ* ont été récoltés dans le tronçon principal de la rivière Grande Cascapédia (48°41,454'

N, 66°13,083' O) (Gaspésie) et dans les ruisseaux Morin (48°20,818' N, 70°03,638' O) et Xavier (48° 25,569' N, 69° 55,271' O), respectivement des tributaires de la rivière Sainte-Marguerite branche principale et branche Nord-est (Saguenay), lors des séances de pêches électriques effectuées en juillet et août 2015.

5.2.2 Protocole expérimental

Le test de personnalité consistait à chronométrer le temps de sortie d'un saumon juvénile d'un abri artificiel, ici un tuyau en polymère thermoplastique noir fermé à une extrémité (figure 5.1, A). Les expériences de test de personnalité ont été effectuées à partir d'observations sur 303 saumons juvéniles, dont 173 poissons de la rivière Grande Cascapédia et 130 poissons de la rivière Sainte-Marguerite. Ce test faisait partie intégrante du protocole de marquage-localisation effectué lors de l'été 2015 (pour les détails de ce protocole, se référer au Chapitre 4, section 4.2 Méthodologie : marquage-localisation). Après le marquage, les poissons étaient relâchés individuellement en aval des ponceaux pour la séquence de suivi des déplacements par l'entremise de ce test de personnalité. À chaque site, les poissons étaient relâchés environ 5m en aval du ponceau, dans une zone d'eau calme et de granulométrie petite et uniforme afin de faciliter l'observation. Le relâchement d'un individu se faisait en le plaçant dans le tuyau, museau vers la sortie et en posant le tuyau sur le lit du ruisseau face au courant (figure 5.1, B). Avant le début du test, l'issue du tube était fermée par un bouchon de thermoplastique pour une période d'acclimatation de trente secondes. Ensuite, le bouchon était retiré et le poisson disposait de deux minutes pour sortir complètement du tube, c'est-à-dire jusqu'à ce que les pointes de la queue de l'individu soient visibles à l'extérieur du tube. La détermination de la durée du test de personnalité est un choix arbitraire lié au fait qu'il ne devait pas s'écouler trop de temps entre le premier et le dernier individu relâché (maximum deux heures). Si le poisson n'était pas sorti du tube une fois le temps écoulé, il était délicatement retiré du tube en penchant celui-ci vers son issue. À l'inverse, il est arrivé à trois reprises que le poisson sorte du tube à grande

vitesse sans que l'observation visuelle puisse confirmer sa sortie et la chronométrer. Ces poissons ont donc été retirés de l'échantillon pour l'analyse.

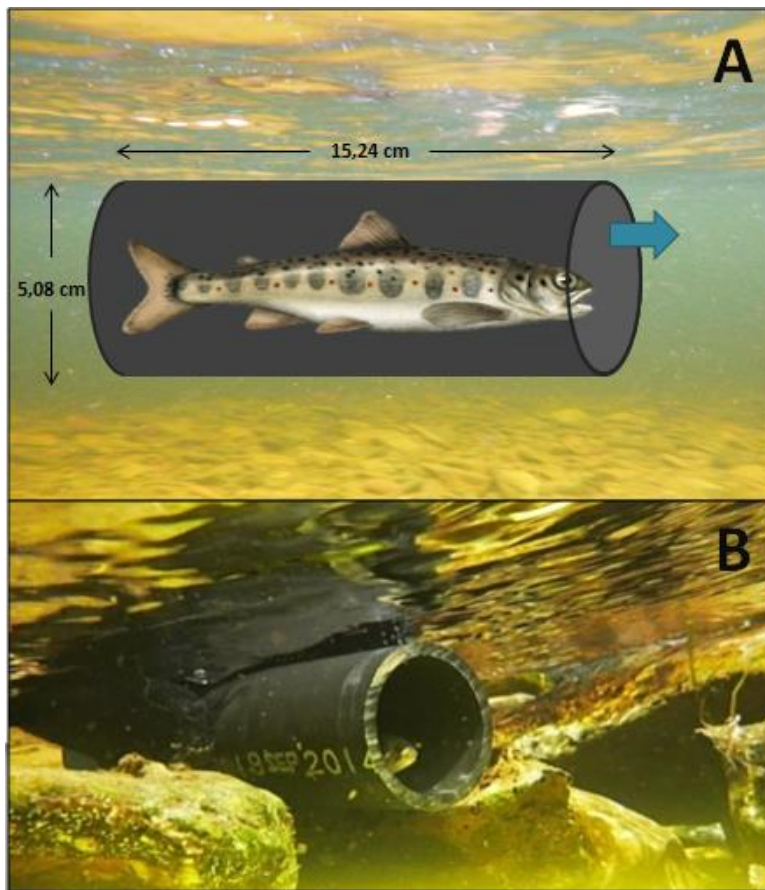


Figure 5. 1 : Schéma de la position du poisson dans l'abri artificiel (tuyau de thermoplastique dont une extrémité est bouchée) lors du test de personnalité (A). Le poisson est placé le museau vers la sortie du tube et son temps de sortie complet est chronométré. Image subaquatique du test de personnalité (B).

5.3 Résultats

Les tests de personnalité ont été effectués sur tous les poissons ayant été marqués pour le suivi de leurs déplacements dans les sites d'étude de l'été 2015 (tableau 5.1), à l'exception d'un groupe en raison d'une précipitation intense au moment du relâchement des poissons. La charge sédimentaire mise en suspension par la pluie a rendu le cours d'eau du site d'étude momentanément très turbide, ce qui ne permettait pas d'observer visuellement la sortie des poissons du tube.

Tableau 5. 1 : Plages de mesures des caractéristiques morphologiques des poissons ayant participé au test de personnalité (n=300) effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015. La valeur entre parenthèses représente la médiane de l'étendue des mesures.

Rivière	Date	Individus (n)	Température de l'eau (°C)	Longueur à la fourche (mm)	Épaisseur à la nuque (mm)	Poids (g)
Grande Cascapédia	10/07/2015	66	9,1	53-100 (66)	4-11 (6)	1,6-14,5 (3,3)
Grande Cascapédia	18/07/2015	104	9,2	55-109 (69)	3-11 (7)	1,7-14,3 (3,6)
Sainte-Marguerite	08/08/2015	56	20,0	50-114 (96)	5-13 (10)	1,4-18,1 (10,1)
Sainte-Marguerite	11/08/2015	74	16,8	56-105 (77)	6-11 (8)	1,6-12,1 (4,3)

La majorité des poissons de l'échantillon de la rivière Grande Cascapédia entamait leur deuxième été en rivière (âge estimé 1+) tandis que l'échantillon de la rivière Sainte-Marguerite était composé de poissons 0+ et 1+ (figure 5.2). La différence de distribution d'âge entre les poissons des deux rivières vient du fait que les tests de personnalité ont été effectués en juillet sur la Grande Cascapédia et à la fin de la saison estivale sur la Sainte-Marguerite. De plus, les poissons de la rivière Sainte-Marguerite vivent en eau plus chaude, ce qui favorise leur croissance durant l'été.

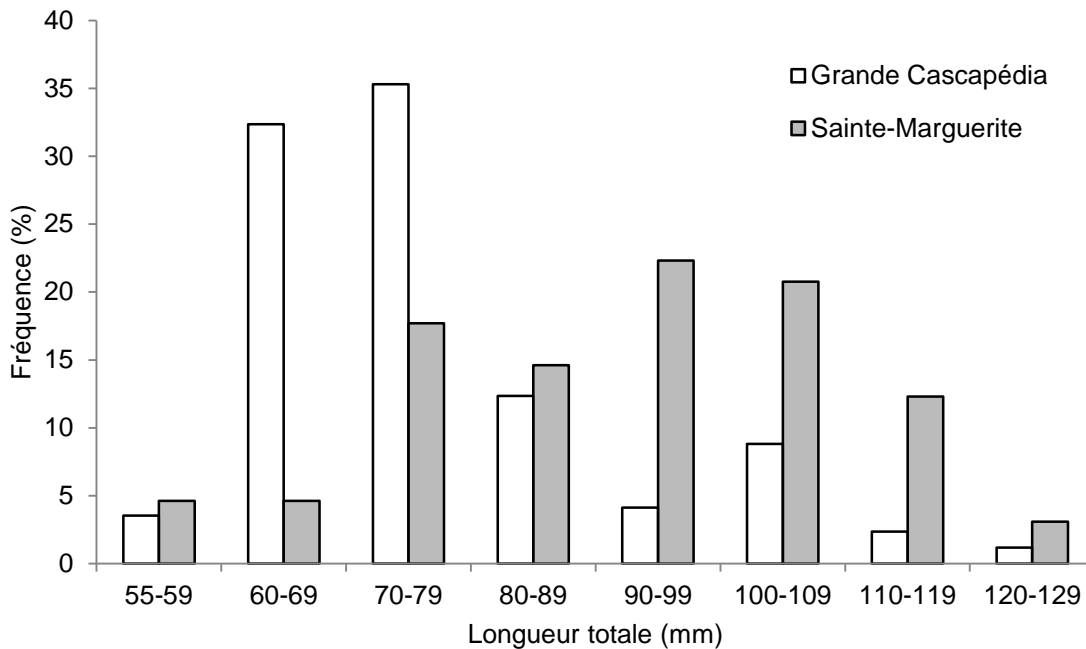


Figure 5. 2 : Distribution de taille des poissons de la rivière Grande Cascapédia (n=170) et de la rivière Sainte-Marguerite (n=130) ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015.

De l'ensemble des poissons participants, près de 75% sont demeurés dans le tube pendant toute la durée du test (120 secondes). Le quart restant des poissons sont sortis du tube durant le temps alloué et la majorité de ceux-ci l'ont fait dans les 20 premières secondes (figure 5.3). Très peu de poissons sont sortis du tube entre 20 et 100 secondes.

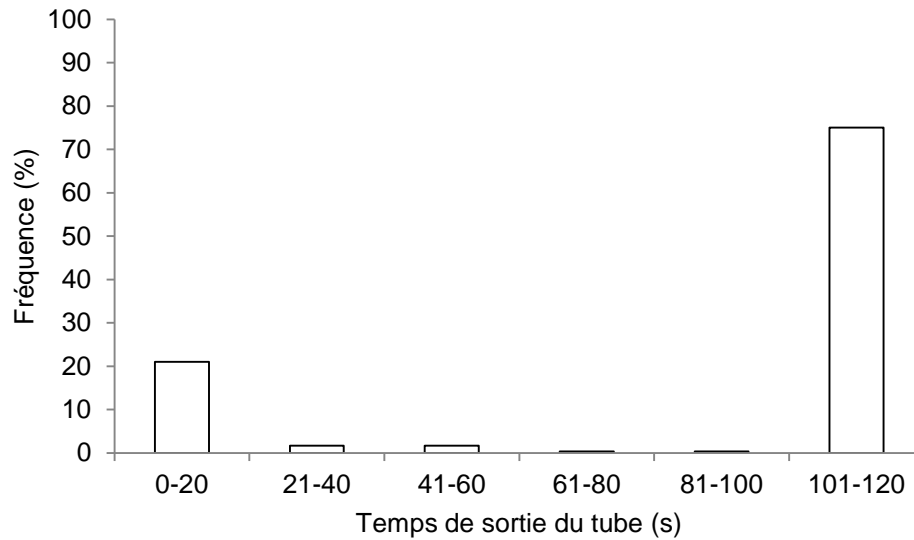


Figure 5. 3 : Distribution du temps de sortie du tube (s) des poissons (n=300) ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015.

La distribution des temps de sortie de style tout ou rien (figure 5.4) permet de classer les poissons selon leurs comportements exploratoires adoptés pendant le test d'après deux traits de personnalité. Les poissons qui sont restés réfugiés dans le tube durant les 120 secondes du test (n=224) sont qualifiés de timides tandis que ceux qui sont sortis du tube (n=76) durant le temps alloué sont désignés comme audacieux.

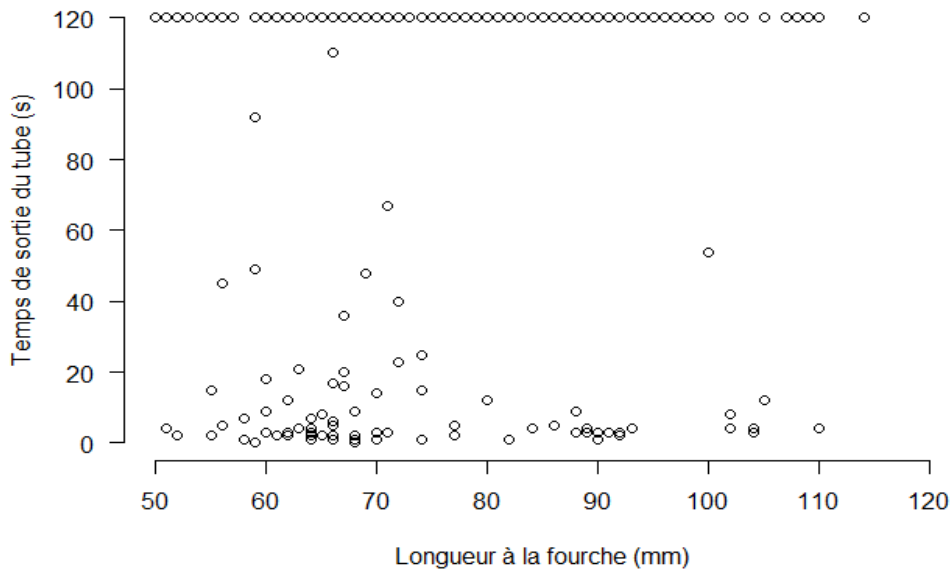


Figure 5. 4: Temps de sortie du tube (s) des poissons (n=300) ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015 en fonction de la longueur à la fourche (mm).

Un test statistique non paramétrique de *Wilcoxon-Mann-Whitney* a été employé afin de comparer la distribution des longueurs à la fourche (mm) des groupes de poissons timides et audacieux. Bien que les poissons de type timides soient surreprésentés dans l'échantillon, il est possible de constater que les poissons de type audacieux sont significativement plus petits (figure 5.5). Toutefois, en séparant les individus selon leur rivière natale, la relation entre la taille et la personnalité est uniquement significative pour les poissons de la rivière Grande Cascapédia (figure 5.6).

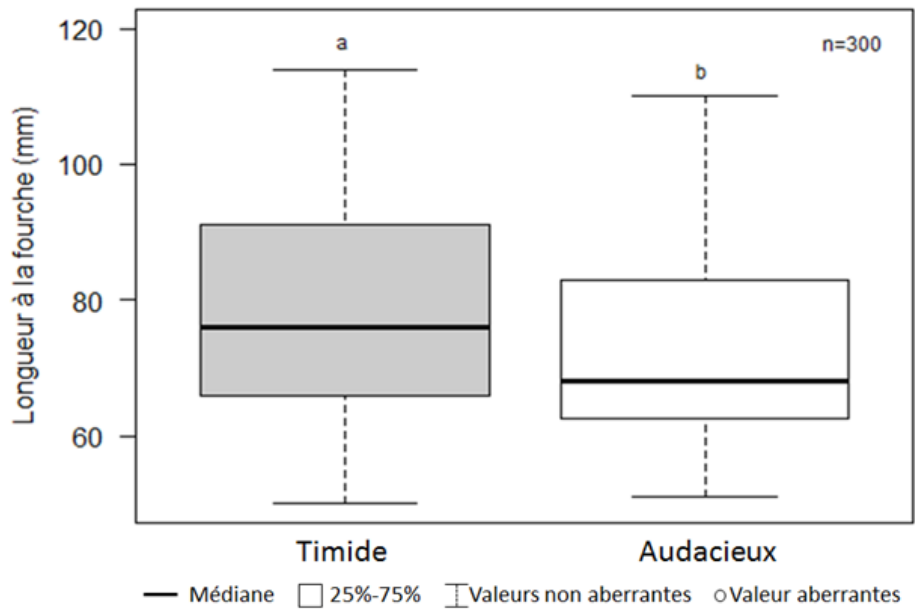


Figure 5. 5 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des saumons juvéniles ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015 en fonction du type de personnalité.

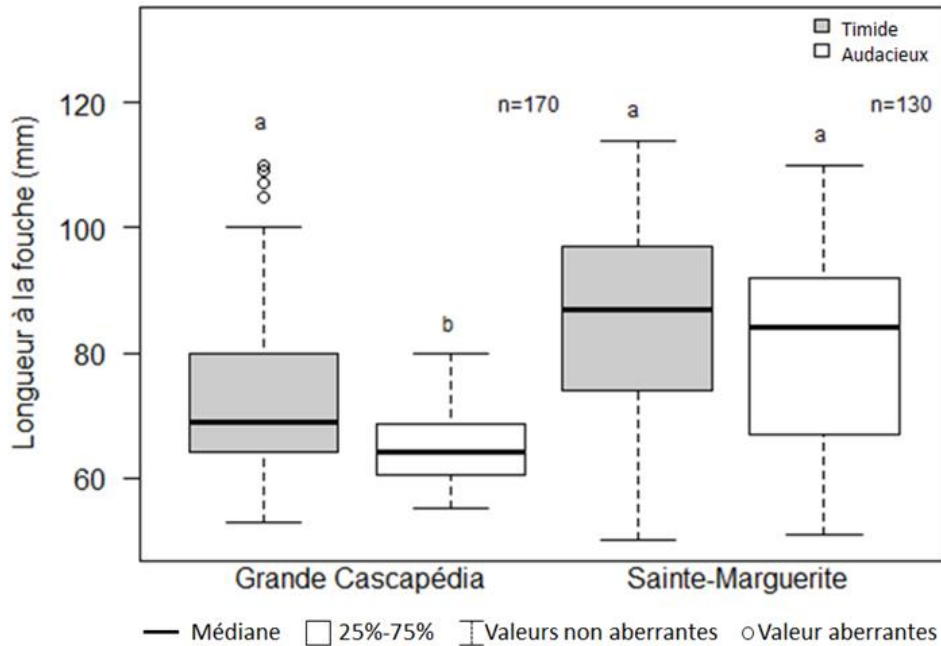


Figure 5. 6 : Distribution de la longueur à la fourche (mm) des saumons juvéniles ayant participé au test de personnalité effectué avant leur relâchement sur chaque site d'étude à l'été 2015 en fonction du type de personnalité pour chaque rivière.

5.4 Discussion

En considérant le tube dans lequel les poissons étaient placés comme un refuge, les résultats du test peuvent être mis en parallèle avec ceux d'autres études comportementales. Un test de personnalité similaire classifiant des ombles de fontaine en fonction de leur comportement exploratoire a aussi démontré que les petits poissons étaient significativement plus audacieux (P.-M. Constantin, comm. pers., 22 mars 2017). Une des hypothèses pouvant expliquer les résultats est la suivante : une plus grande proportion d'individus de petite taille auraient adopté un comportement audacieux puisqu'ils doivent prendre plus de risques pour s'alimenter davantage et croître suffisamment afin d'assurer leur survie hivernale.

Au stade de tacon, la taille du poisson est liée à sa croissance, qui elle dépend du gain d'énergie provenant de son alimentation. La croissance des premiers stades de vie du saumon atlantique a des répercussions sur l'histoire de vie des individus, car elle détermine le moment de la dévalaison (Thorpe, 1977, Metcalfe *et al.*, 1988). Les tacons ont avantage à croître rapidement pour assurer leur survie à moyen terme, car la mortalité lors de la dévalaison des smolts est dépendante de la taille de l'individu (Metcalfe *et al.*, 1999).

S'alimenter implique toutefois un certain risque de prédation pour les saumons juvéniles puisqu'ils doivent sortir de leur refuge, souvent un abri créé par une particule du substrat de la rivière, pour attraper les proies dérivantes dans la colonne d'eau. Des études antérieures ont démontré que la taille de l'individu jouerait un rôle sur le temps et la stratégie d'alimentation (diurnes et nocturnes) des saumons juvéniles. Leurs stratégies alimentaires seraient orientées d'après un compromis (trade-off) entre le risque de prédation et la croissance (Metcalfe *et al.*, 1998, Metcalfe *et al.*, 1999). En période diurne, le saumon est confronté à un risque de prédation plus grand (coût), mais la disponibilité de nourriture l'est également (bénéfice).

D'autres études font le lien entre l'audace en situation de stress chez le saumon juvénile ainsi que l'émergence hâtive des alevins et leur développement (Vaz-Serrano *et al.*, 2011, Thornqvist *et al.*, 2015). Bien que les traits de personnalité peuvent mener

à des histoires de vies opposées, Stamps (2007) suggère que des individus avec stratégies de survies différentes peuvent atteindre une valeur sélective (fitness) similaire à travers différents compromis entre la croissance et la mortalité.

Bien que les résultats aient permis d'illustrer certaines stratégies comportementales des salmonidés reconnues dans la littérature, le test de personnalité aurait pu être amélioré en reproduisant le protocole plusieurs fois sur chaque individu afin de voir si le comportement exploratoire était répété, indiquant alors un réel trait de personnalité (Adriaenssens *et al.*, 2011). Cependant, il aurait été trop long de répéter le test lors du relâchement des individus marqués et l'augmentation de la manipulation des poissons aurait occasionné un degré de stress supplémentaire. Le laps de temps alloué au poisson pour sortir du tube aurait pu être augmenté, mais cela aurait entraîné un trop grand écart de temps écoulé entre le relâchement du premier et du dernier individu. Cela dit, le fait que la méthodologie soit conçue pour le milieu naturel est un atout.

Remis dans le contexte de la question du passage des saumons dans les ponceaux, le fait que les petits poissons soient plus audacieux, donc plus susceptibles d'effectuer des mouvements, les rends plus exposés à être freinés par la présence d'un ponceau, d'autant plus que les résultats des essais de passage (section 4.5) montrent que les petits poissons ont un moins bons taux de succès à franchir les ponceaux. Cette situation souligne encore une fois l'importance d'utiliser un ponceau de type «stream simulation» qui préconise la simulation fidèle du cours d'eau par le ponceau afin de favoriser le libre déplacement de l'ensemble des espèces, et ce, pour toutes les gammes de tailles (Forest Service Stream Simulation Working Group, 2008).

5.4.1 Comparaison des échantillons des deux rivières

Vivant dans des conditions plus froides, les poissons de la rivière Grande Cascapédia sont peut-être forcés de prendre plus de risque étant petits pour croître tandis que ce stress thermique est moins marqué sur la rivière Sainte-Marguerite (degré-jour plus élevé), ce qui fait en sorte que les petits poissons sont moins contraints à se mettre en danger pour grandir en adoptant un comportement audacieux. Ayant effectué le test à la fin de l'été sur la Sainte-Marguerite, il se peut que la croissance estivale ait joué un

rôle sur la modulation du comportement de poisson à court terme. Il se pourrait que les poissons soient plus audacieux en début de saison dans l'urgence de croître et que ce trait s'estompe à mesure qu'ils grandissent.

6 CONCLUSION

Comprendre les paramètres qui rendent les ponceaux imperméables au libre déplacement des salmonidés est essentiel pour la connectivité d'habitat des rivières à saumon du Québec. Les résultats de ce projet de maîtrise contribuent à l'avancement des connaissances sur la fragmentation de l'habitat du saumon atlantique juvénile, une espèce dont l'importance socioéconomique est indéniable au Québec.

La classification selon le filtre statique développé par (Coffman, 2005) indique que les ponceaux pouvant constituer un obstacle pour les salmonidés juvéniles sont présents en grande proportion à travers les bassins versants des rivières inventoriées. Pour mettre en relation les déplacements des saumons juvéniles avec la morphométrie des ponceaux et les conditions hydrauliques, la méthode de marquage-suivi en continu s'est avérée beaucoup plus appropriée que la méthode de marquage-localisation. La télémétrie fixe est fiable pour suivre les tentatives de passage d'un groupe de poissons dans un ponceau. L'ajout d'une cage de rétention à l'aval des ponceaux instrumentés est un moyen adéquat pour éviter l'émigration des poissons à l'extérieur des sites d'étude et optimise l'effort de marquage. Lors des essais de passage, 40 % des poissons marqués n'ont pas effectué de tentatives de passage. Les poissons qui ont été détectés par le système de télémétrie fixe sont significativement plus gros que ceux qui sont demeurés dans la cage. Ces résultats démontrent que les ponceaux peuvent représenter un obstacle, particulièrement pour les jeunes saumons juvéniles. Les résultats de progressions maximales des poissons à travers les ponceaux ont permis de concevoir un modèle prédictif du succès de passage des saumons juvéniles. Les variables explicatives de ce modèle sont la distance à parcourir et la vitesse de l'écoulement. Celles-ci ont un impact négatif sur la passabilité de la conduite et la vitesse de l'écoulement aurait un poids plus important que la distance à parcourir dans la relation. Le jeu de données de déplacement des poissons n'a malheureusement pas permis d'établir des valeurs seuils de passabilité des ponceaux quant à la pente et l'indice d'effort. Finalement, les résultats d'un test de personnalité réalisé avec un échantillon de saumons juvéniles démontrent que les individus de petite taille adopteraient des comportements exploratoires plus audacieux. La prise de risque

associée à ses comportements est sans doute attribuable à la croissance rapide nécessaire pour la survie des individus.

Dans le cadre de futures études, il serait intéressant d'approfondir les recherches quant aux valeurs seuils des caractéristiques physiques qui rendent les ponceaux infranchissables, et ce, pour une communauté d'espèces. Tel que mentionné par Bunt *et al.* (2012), il est préférable d'assurer la connectivité d'habitat pour toutes les espèces d'un écosystème pour le maintien de la diversité. En termes de passabilité, il faut donc considérer une large gamme de taille de poissons aux capacités natatoires diverses et aux stratégies de migration variables (Forest Service Stream Simulation Working Group, 2008, Kemp *et al.*, 2010). En plus, le comportement plus audacieux des petits saumons lors des tests de personnalité apporte un éclairage nouveau sur l'importance de conserver les caractéristiques du cours d'eau intact dans les ponceaux pour favoriser leur libre passage, comme le suggère la méthode de «stream simulation». La mise en relation des comportements exploratoires et la personnalité des poissons avec la fragmentation de leur habitat par les ponceaux est une avenue de recherche prometteuse. Le taux de recapture élevé que nécessite de telles expérimentations est par ailleurs un défi méthodologique. L'impact du substrat naturel dans les traverses de cours d'eau pourrait être une variable à analyser dans des projets futurs. Un ponceau expérimental à pente modulable installé dans un cours d'eau naturel permettrait de combiner les avantages des couloirs de nages en laboratoire et des essais de passage en conditions naturelles. L'aspect multivarié de la perméabilité des ponceaux complexifie la conception d'un modèle prédictif performant et parcimonieux. Toutefois, des efforts devraient être dédiés à la création d'un tel outil de gestion dans le but d'optimiser les efforts de conservation et de faciliter les stratégies d'aménagements, qui devront être envisagés à l'échelle des bassins versants (Fagan, 2002, Poplar-Jeffers *et al.*, 2009, Rolls, 2011, Torterotot *et al.*, 2014, Maitland *et al.*, 2016).

7 RÉFÉRENCES

- Adriaenssens B & Johnsson JI (2011) Learning and context-specific exploration behaviour in hatchery and wild brown trout. *Applied Animal Behaviour Science* 132(1-2):90-99.
- Albanese B, Angermeier PL & Dorai-Raj S (2004) Ecological correlates of fish movement in a network of Virginia streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 61(6):857-869.
- Armstrong JD, Huntingford FA & Herbert NA (1999) Individual space use strategies of wild juvenile Atlantic salmon. *Journal of Fish Biology* 55(6):1201-1212.
- Aymes JC & Rives J (2009) Detection efficiency of multiplexed Passive Integrated Transponder antennas is influenced by environmental conditions and fish swimming behaviour. *Ecology of Freshwater Fish* 18(4):507-513.
- Baker CF (2014) Effect of ramp length and slope on the efficacy of a baffled fish pass. *Journal of Fish Biology* 84(2):491-502.
- Bateman DS & Gresswell RE (2006) Survival and growth of age-0 steelhead after surgical implantation of 23-mm passive integrated transponders. *North American Journal of Fisheries Management* 26(3):545-550.
- Beamish F (1978) Swimming capacity. *Fish physiology* 7:101-187.
- Behlke CE, Kane DL, McLean RF & Travis MD (1991) Fundamentals of culvert design for passage of weak-swimming fish.
- Belford DA & Gould WR (1989) An evaluation of trout passage through six highway culverts in Montana. *North American Journal of Fisheries Management* 9(4):437-445.
- Benton PD, Ensign WE & Freeman BJ (2008) The effect of road crossings on fish movements in small Etowah basin streams. *Southeastern Naturalist* 7(2):301-310.
- Bergeron M (2016) Formation sur les tables de gestion intégrée des ressources et du territoire (TGIRT). *Fédération Québécoise pour le saumon atlantique*:18.
- Bernatchez L & Giroux M (1991) *Guide des poissons d'eau douce du Québec et leur distribution dans l'Est du Canada*. La Prairie [Québec]: Éditions Broquet,
- Bjornn TC (1971) Trout and salmon movements in two Idaho streams as related to temperature, food, stream flow, cover, and population density. *Transactions of the American Fisheries Society* 100(3):423-438.
- Blake R (1983) *Fish locomotion*. Cambridge Uni. (versity Press, Cambridge).
- Blank MD, Cahoon J & McMahon T (2009) Using three dimensional hydrodynamic modeling and fish swimming energetics to assess culverts as potential physical barriers to upstream fish movement. *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*.
- Bourne C, Kehler D, Wiersma Y & Cote D (2011) Barriers to fish passage and barriers to fish passage assessments: the impact of assessment methods and assumptions on barrier

- identification and quantification of watershed connectivity. *Aquatic Ecology* 45(3):389-403.
- Brett JR (1964) THE RESPIRATORY METABOLISM AND SWIMMING PERFORMANCE OF YOUNG SOCKEYE SALMON. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 21(5):1183-1226.
- Bujold JN (2010) *Utilisation de la technologie des transpondeurs passifs (pit-tags) pour l'étude du comportement spatial des salmonidés dans un tributaire de la rivière Sainte-Marguerite (Saguenay, Québec)*. (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- Bunt CM, Castro-Santos T & Haro A (2012) PERFORMANCE OF FISH PASSAGE STRUCTURES AT UPSTREAM BARRIERS TO MIGRATION. *River Research and Applications* 28(4):457-478.
- Burford DD, McMahan TE, Cahoon JE & Blank M (2009) Assessment of trout passage through culverts in a large Montana drainage during summer low flow. *North American Journal of Fisheries Management* 29(3):739-752.
- Castro-Santos T (2004) Quantifying the combined effects of attempt rate and swimming capacity on passage through velocity barriers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 61(9):1602-1615.
- Castro-Santos T, Haro A & Walk S (1996) A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways. *Fisheries Research* 28(3):253-261.
- Castro-Santos T, Sanz-Ronda FJ & Ruiz-Legazpi J (2013) Breaking the speed limit - comparative sprinting performance of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 70(2):280-293.
- Chanseau M, Bosc S, Galiay E & Oules G (2002) L'UTILISATION DE L'HUILE DE CLOU DE GIROFLE COMME ANESTHÉSIQUE POUR LES SMOLTS DE SAUMON ATLANTIQUE (*SALMO SALAR L.*) ET COMPARAISON DE SES EFFETS AVEC CEUX DU 2-PHENOXYETHANOL. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* (365-366):579-589.
- Chestnut T (2002) *A review of closed bottom stream crossing structures (culverts) on fish-bearing streams in the Kamloops Forest District, June 2001*. Habitat and Enhancement Branch, Habitat Conservation and Stewardship Program, Fisheries and Oceans Canada,
- Clarkin K, Conner A, Furniss M, Gibernick B, Love M, Moynan K & Wilson S (2005) National inventory and assessment procedure for identifying barriers to aquatic organism passage at road-stream crossings.
- Coffman JS (2005) Evaluation of a Predictive Model for Upstream Fish Passage Through Culverts. *James Madison University, Department of Biology*:104.
- Cucherousset J, Roussel J-M, Keeler R, Cunjak RA & Stump R (2005) The Use of Two New Portable 12-mm PIT Tag Detectors to Track Small Fish in Shallow Streams. *North American Journal of Fisheries Management* 25(1):270-274.

- Curry RA, Allen S, Fox MG & Morgan GE (1993) GROWTH AND FOOD OF YOUNG-OF-THE-YEAR BROOK CHARR, *SALVELINUS-FONTINALIS*, IN LAKE AND CREEK ENVIRONMENTS. *Environmental Biology of Fishes* 37(2):131-138.
- Dugdale SJ, Franssen J, Corey E, Bergeron NE, Lapointe M & Cunjak RA (2016) Main stem movement of Atlantic salmon parr in response to high river temperature. *Ecology of Freshwater Fish* 25(3):429-445.
- Dussault C, Poulin M, Ouellet J-P, Courtois R, Laurian C, Leblond M, Fortin J, Breton L & Jolicoeur H (2005) Existe-t-il des solutions à la problématique des accidents routiers impliquant la grande faune? *Le Naturaliste canadien* 129(1):57-62.
- Ecotec-MFFP (2014) Une étude ventilant par espèce et par région les retombées économiques engendrées par les chasseurs, les pêcheurs et les piégeurs québécois en 2012. *Préparé pour le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs*:81.
- Enders EC, Clarke KD, Pennell CJ, Ollerhead LMN & Scruton DA (2007) Comparison between PIT and radio telemetry to evaluate winter habitat use and activity patterns of juvenile Atlantic salmon and brown trout. *Hydrobiologia* 582(1):231-242.
- Erkinaro H & Erkinaro J (1998) Feeding of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., parr in the subarctic River Teno and three tributaries in northernmost Finland. *Ecology of Freshwater Fish* 7(1):13-24.
- Erkinaro H & Gibson (1997) Interhabitat migration of juvenile Atlantic salmon in a Newfoundland river system, Canada. *Journal of Fish Biology* 51(2):373-388.
- Erkinaro J, Erkinaro H & Niemela E (2017) Road culvert restoration expands the habitat connectivity and production area of juvenile Atlantic salmon in a large subarctic river system. *Fisheries Management and Ecology* 24(1):73-81.
- Erkinaro J & Niemela E (1995) GROWTH DIFFERENCES BETWEEN THE ATLANTIC SALMON PARR, *SALMO-SALAR*, OF NURSERY BROOKS AND NATAL RIVERS IN THE RIVER TENO WATERCOURSE IN NORTHERN FINLAND. *Environmental Biology of Fishes* 42(3):277-287.
- Fagan WF (2002) Connectivity, fragmentation, and extinction risk in dendritic metapopulations. *Ecology* 83(12):3243-3249.
- Fontes HM, Castro-Santos T, Makrakis S, Gomes LC & Latini JD (2012) A barrier to upstream migration in the fish passage of Itaipu Dam (Canal da Piracema), Parana River basin. *Neotropical Ichthyology* 10(4):697-704.
- Forest Service Stream Simulation Working Group (2008) Stream simulation: an ecological approach to providing passage for aquatic organisms at road-stream crossings. *USDA Forest Service, National Technology and Development Program*.
- Franklin PA & Bartels B (2012) Restoring connectivity for migratory native fish in a New Zealand stream: effectiveness of retrofitting a pipe culvert. *Aquat. Conserv.-Mar. Freshw. Ecosyst.* 22(4):489-497.
- Gerking SD (1959) THE RESTRICTED MOVEMENT OF FISH POPULATIONS. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 34(2):221-242.

- Gibson RJ, Haedrich RL & Wernerheim CM (2005) Loss of Fish Habitat as a Consequence of Inappropriately Constructed Stream Crossings. *Fisheries* 30(1):10-17.
- Goerig E & Castro-Santos T (2017) Is motivation important to brook trout passage through culverts? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 74(6):885-893.
- Goerig E, Castro-Santos T, Bergeron NÉ & Bradford M (2016) Brook trout passage performance through culverts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 73(1):94-104.
- Gowan C & Fausch KD (2002) Why do foraging stream salmonids move during summer? *Ecology, behaviour and conservation of the charrs, genus Salvelinus*, Springer. p 139-153.
- Gowan C & Michael K. Young KDFaSCR (1994) Restricted Movement in Resident Stream Salmonids: A Paradigm Lost? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 51.
- Gries G & Letcher BH (2002) Tag retention and survival of age-0 Atlantic salmon following surgical implantation with passive integrated transponder tags. *North American Journal of Fisheries Management* 22(1):219-222.
- Haro A, Castro-Santos T, Noreika J & Odeh M (2004) Swimming performance of upstream migrant fishes in open-channel flow: a new approach to predicting passage through velocity barriers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 61(9):1590-1601.
- Hearn WE (1987) Interspecific competition and habitat segregation among stream-dwelling trout and salmon: a review. *Fisheries* 12(5):24-31.
- Hebert C, Danzman RG, Jones MW & Bernatchez L (2000) Hydrography and population genetic structure in brook charr (*Salvelinus fontinalis*, Mitchill) from eastern Canada. *Molecular ecology* 9(7):971-982.
- Hill MS, Zydlewski GB, Zydlewski JD & Gasvoda JM (2006) Development and evaluation of portable PIT tag detection units: PITpacks. *Fisheries Research* 77(1):102-109.
- Hoffman RL & Dunham J (2007) *Fish movement ecology in high gradient headwater streams: its relevance to fish passage restoration through stream culvert barriers*. US Geological Survey Reston, Virginia,
- Huntsman AG (1945) Migration of salmon parr. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 6(5):399-402.
- Johnston P, Berube F & Bergeron NE (2009a) Development of a flatbed passive integrated transponder antenna grid for continuous monitoring of fishes in natural streams. *J Fish Biol* 74(7):1651-1661.
- Johnston P & Normand E (2009b) Comparison between stationary antenna grid and portable antenna pit systems for studying fish habitat use. *Geomatica* 63:313-320.
- Jonsson B & Jonsson N (2009) A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of Fish Biology* 75(10):2381-2447.
- Kemp PS & O'Hanley JR (2010) Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis. *Fisheries Management and Ecology* 17(4):297-322.

- Kennedy BM, Gale WL & Ostrand KG (2007) Evaluation of clove oil concentrations for use as an anesthetic during field processing and passive integrated transponder implantation of juvenile steelhead. *Northwest Science* 81(2):147-154.
- Kondolf GM & Li S (1992) The pebble count technique for quantifying surface bed material size in instream flow studies. *Rivers* 3(2):80-87.
- Lacombe & Jutras (2016) État et durabilité des traverses de cours d'eau sur les chemins forestiers. (Université Laval, Québec), p 41.
- Lapointe M, Bérubé P & Rodriguez M (2004) Impacts des pratiques forestières sur la ressource salmonicole dans le bassin de la Rivière Cascapédia, Gaspésie. *Forum de transfert sur la recherche en aménagement et en environnement forestiers. Québec, Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies et Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs.* p 59-66.
- Linnansaari TP & Cunjak RA (2007) The performance and efficacy of a two-person operated portable PIT-antenna for monitoring spatial distribution of stream fish populations. *River Research and Applications* 23(6):559-564.
- Love M & Taylor RN (2003) California Salmonid Stream Habitat Restoration Manual Part IX, Fish Passage Evaluation at Stream Crossings. *California Department of Fish and Game, Sacramento, CA*:100.
- Macdonald JI & Davies PE (2007) Improving the upstream passage of two galaxiid fish species through a pipe culvert. *Fisheries Management and Ecology* 14(3):221-230.
- Mahlum S, Cote D, Wiersma YF, Kehler D & Clarke KD (2014) Evaluating the Barrier Assessment Technique Derived from FishXing Software and the Upstream Movement of Brook Trout through Road Culverts. *Transactions of the American Fisheries Society* 143(1):39-48.
- Maitland BM, Poesch M & Anderson AE (2016) Prioritising culvert removals to restore habitat for at-risk salmonids in the boreal forest. *Fisheries Management and Ecology* 23(6):489-502.
- Makrakis S, Castro-Santos T, Makrakis MC, Wagner RL & Adames MS (2012) Culverts in paved roads as suitable passages for Neotropical fish species. *Neotropical Ichthyology* 10(4):763-770.
- McDonald D, McFarlane W & Milligan C (1998) Anaerobic capacity and swim performance of juvenile salmonids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(5):1198-1207.
- Metcalfe NB, Fraser NHC & Burns MD (1998) State-dependent shifts between nocturnal and diurnal activity in salmon. *Proc. R. Soc. B-Biol. Sci.* 265(1405):1503-1507.
- Metcalfe NB, Fraser NHC & Burns MD (1999) Food availability and the nocturnal vs. diurnal foraging trade-off in juvenile salmon. *Journal of Animal Ecology* 68(2):371-381.
- Metcalfe NB, Huntingford FA & Thorpe JE (1988) FEEDING INTENSITY, GROWTH-RATES, AND THE ESTABLISHMENT OF LIFE-HISTORY PATTERNS IN JUVENILE ATLANTIC SALMON SALMO-SALAR. *Journal of Animal Ecology* 57(2):463-474.

- Meyers LS, Thuemler TF & Kornely GW (1992) Seasonal movements of brown trout in northeast Wisconsin. *North American Journal of Fisheries Management* 12(3):433-441.
- MFFP (2016) Plan de gestion du saumon atlantique 2016-2026. *Ministère des forêts, de la faune et des parcs, Direction générale de l'expertise sur la faune et ses habitats, Direction de la faune aquatique, Québec*:40.
- Morita K & Yamamoto S (2002) Effects of Habitat Fragmentation by Damming on the Persistence of Stream-Dwelling Charr Populations. *Conservation Biology* 16(5):1318-1323.
- Newbold LR, Karageorgopoulos P & Kemp PS (2014) Corner and sloped culvert baffles improve the upstream passage of adult European eels (*Anguilla anguilla*). *Ecological Engineering* 73:752-759.
- Norman JR, Hagler MM, Freeman MC & Freeman BJ (2009) Application of a Multistate Model to Estimate Culvert Effects on Movement of Small Fishes. *Transactions of the American Fisheries Society* 138(4):826-838.
- Olsen AH & Tullis BP (2013) Laboratory Study of Fish Passage and Discharge Capacity in Slip-Lined, Baffled Culverts. *J. Hydraul. Eng.-ASCE* 139(4):424-432.
- Ombredane D, Bagliniere JL & Marchand F (1998) The effects of passive integrated transponder tags on survival and growth of juvenile brown trout (*Salmo trutta* L.) and their use for studying movement in a small river. *Advances in Invertebrates and Fish Telemetry*, Springer. p 99-106.
- Park D, Sullivan M, Bayne E & Scrimgeour G (2008) Landscape-level stream fragmentation caused by hanging culverts along roads in Alberta's boreal forest. *Canadian journal of forest research* 38(3):566-575.
- Peake, McKinley RS & Scruton DA (1997) Swimming performance of various freshwater Newfoundland salmonids relative to habitat selection and fishway design. *Journal of Fish Biology* 51(4):710-723.
- Peake S & Farrell A (2006) Fatigue is a behavioural response in respirometer-confined smallmouth bass. *Journal of Fish Biology* 68(6):1742-1755.
- Pépino M, Rodríguez MA & Magnan P (2012) Impacts of highway crossings on density of brook charr in streams. *Journal of Applied Ecology* 49(2):395-403.
- Peterson, Banish & Thurow (2005) Are block nets necessary?: movement of stream-dwelling salmonids in response to three common survey methods. *North American Journal of Fisheries Management* 25(2):732-743.
- Peterson, Simmons, Cardoso & Light (2013) A Probabilistic Model for Assessing Passage Performance of Coastal Cutthroat Trout through Corrugated Metal Culverts. *North American Journal of Fisheries Management* 33(1):192-199.
- Poplar-Jeffers IO, Petty JT, Anderson JT, Kite SJ, Strager MP & Fortney RH (2009) Culvert replacement and stream habitat restoration: implications from brook trout management in an Appalachian watershed, USA. *Restoration Ecology* 17(3):404-413.

- Powers PD & Bates K (1997) *Culvert hydraulics related to upstream juvenile salmon passage*. Washington Department of Fish and Wildlife, Land and Restoration Services Program, Environmental Engineering Services,
- Reale D, Reader SM, Sol D, McDougall PT & Dingemanse NJ (2007) Integrating animal temperament within ecology and evolution. *Biol Rev Camb Philos Soc* 82(2):291-318.
- Rodríguez MA (2002) Restricted movement in stream fish: the paradigm is incomplete, not lost. *Ecology* 83(1):1-13.
- Rolls RJ (2011) The role of life-history and location of barriers to migration in the spatial distribution and conservation of fish assemblages in a coastal river system. *Biological Conservation* 144(1):339-349.
- Schlosser IJ (1991) STREAM FISH ECOLOGY - A LANDSCAPE PERSPECTIVE. *Bioscience* 41(10):704-712.
- Sebring SH, Ledgerwood RD, Sandford BP, Matthews GM, Evans A & Morrow M (2010) *Detection of passive integrated transponder (PIT) tags on piscivorous avian colonies in the Columbia River Basin, 2008*. Fish Ecology Division, Northwest Fisheries Science Center, National Marine Fisheries Service,
- Stamps JA (2007) Growth-mortality tradeoffs and 'personality traits' in animals. *Ecology letters* 10(5):355-363.
- Taylor & Love M (2003) California Salmonid Stream Habitat Restoration Manual—Part IX Fish Passage Evaluation at Stream Crossings. *California Department of Fish and Game, Sacramento, CA*.
- Taylor & Roberts (1999) Clove Oil: An Alternative Anaesthetic for Aquaculture. *North American Journal of Aquaculture* 61(2):150-155.
- Thornqvist PO, Hoglund E & Winberg S (2015) Natural selection constrains personality and brain gene expression differences in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *The Journal of experimental biology* 218(Pt 7):1077-1083.
- Thorpe JE (1977) BIMODAL DISTRIBUTION OF LENGTH OF JUVENILE ATLANTIC SALMON (*SALMO-SALAR* L) UNDER ARTIFICIAL REARING CONDITIONS. *Journal of Fish Biology* 11(2):175-184.
- Torterotot JB, Perrier C, Bergeron NE & Bernatchez L (2014) Influence of Forest Road Culverts and Waterfalls on the Fine-Scale Distribution of Brook Trout Genetic Diversity in a Boreal Watershed. *Transactions of the American Fisheries Society* 143(6):1577-1591.
- Tudorache C, O'Keefe RA & Benfey TJ (2011) Optimal swimming speeds reflect preferred swimming speeds of brook charr (*Salvelinus fontinalis* Mitchill, 1874). *Fish physiology and biochemistry* 37(2):307-315.
- Vaz-Serrano J, Ruiz-Gomez ML, Gjoen HM, Skov PV, Huntingford FA, Overli O & Hoglund E (2011) Consistent boldness behaviour in early emerging fry of domesticated Atlantic salmon (*Salmo salar*): Decoupling of behavioural and physiological traits of the proactive stress coping style. *Physiology & behavior* 103(3-4):359-364.

- Warren ML & Pardew MG (1998) Road crossings as barriers to small-stream fish movement. *Transactions of the American Fisheries Society* 127(4):637-644.
- Weihls D (1974) Energetic advantages of burst swimming of fish. *Journal of Theoretical Biology* 48(1):215-229.
- Wellman JC, Combs DL & Cook SB (2000) Long-Term Impacts of Bridge and Culvert Construction or Replacement on Fish Communities and Sediment Characteristics of Streams. *Journal of Freshwater Ecology* 15(3):317-328.
- Wheeler AP, Angermeier PL & Rosenberger AE (2005) Impacts of new highways and subsequent landscape urbanization on stream habitat and biota. *Reviews in fisheries science* 13(3):141-164.
- Wilcove DS, McLellan CH & Dobson AP (1986) Habitat fragmentation in the temperate zone. *Conservation biology* 6:237-256.
- Wofford JE, Gresswell RE & Banks MA (2005) Influence of barriers to movement on within-watershed genetic variation of coastal cutthroat trout. *Ecological Applications* 15(2):628-637.
- Wolman MG (1954) A method of sampling coarse river-bed material. *EOS, Transactions American Geophysical Union* 35(6):951-956.
- Young MK (1998) Absence of autumnal changes in habitat use and location of adult Colorado River cutthroat trout in a small stream. *Transactions of the American Fisheries Society* 127(1):147-151.
- Zydlewski, Winter C, McClanahan D, Johnson J & Zydlewski J (2003) Evaluation of fish movements, migration patterns, and population abundance with streamwidth PIT tag interrogation systems.

8 ANNEXES

Annexe I : Paramètres physiques des 126 ponceaux inventoriés en 2014 dans quatre bassins versants (Grande Cascapédia, n=27; Sainte-Marguerite, n=13; Matapédia, n=80; Patapédia, n=6) d'après le modèle prédictif du succès de passage des salmonidés juvéniles de (Coffman, 2005). BV= Bassin versant, GC= Grande Cascapédia, SM= Sainte-Marguerite, MAT = Matapédia et PAT = Patapédia. Substrat = Présence de substrat dans l'entièreté de la conduite. Retour d'eau = « Backwatered ». Élévation du seuil en aval = « Outlet drop ». P= Pente de la conduite. L=Longueur de la conduite. Classif = Classification du ponceau, Fran= Franchissable, Infran= Infranchissable, Indét= Indéterminé.

Site	BV	Lat (N)	Lon (O)	Substrat	Retour d'eau	Élévation du seuil en aval (cm)	Pente (%)	Longueur (m)	Indice d'effort (P*L)	Classif
Ruisseau Indian Falls	GC	48°35.190'	66°08.710'	OUI	NON	0,0	6,74	15,30	103,1	Fran
P CHVAL	GC	48°31.367'	66°06.236'	OUI	NON	0,0	2,77	15,00	41,5	Fran
Ruisseau little jonathan	GC	48°26.314'	66°01.410'	OUI	NON	0,0	3,62	12,60	45,6	Fran
ARC BET	GC	48°16.743'	65°53.370'	OUI	NON	0,0	0,31	15,30	4,7	Fran
Ruisseau Cormier 1	GC	48°16.717'	65°54.791'	NON	NON	0,0	2,33	9,32	21,7	Indét
P Bet Gallag	GC	48°14.609'	65°54.772'	NON	NON	0,0	2,45	32,20	79,0	Infran
P WOW	GC	48°40.141'	66°19.819'	NON	NON	28,4	2,25	18,20	41,0	Infran
P CAST	GC	48°40.575'	66°17.964'	NON	NON	-10,6	0,83	29,30	24,2	Indét
378_C1	GC	48°46,004'	66°32,480'	NON	NON	0,0	1,15	12,15	14,0	Indét
378_C2	GC	48°46,004'	66°32,480'	NON	NON	0,0	0,23	12,15	2,8	Fran
Ruisseau Washout_C1	GC	48°41,229'	66°35,528'	NON	NON	40,0	3,25	15,40	50,0	Infran
Ruisseau Washout_C2	GC	48°41,229'	66°35,528'	NON	NON	50,0	2,79	17,95	50,0	Infran
297	GC	48°40,890'	66°37,086'	NON	NON	24,0	3,23	15,10	48,8	Infran
295_C1	GC	48°40,357'	66°39,259'	NON	OUI	-1,7	0,12	12,10	1,4	Fran
295_C2	GC	48°40,357'	66°39,259'	NON	NON	-3,3	1,02	12,10	12,4	Indét
295_C3	GC	48°40,357'	66°39,259'	NON	NON	8,5	0,55	12,10	6,6	Fran
P DOUBLE 2_C1	GC	48°43,3430'	66°20,156'	NON	NON	0,0	1,44	15,10	21,8	Indét
P DOUBLE 2_C2	GC	48°43,3430'	66°20,156'	NON	NON	0,0	1,42	15,10	21,4	Indét
P BOIS 3	GC	48°46,485'	66°18,593'	NON	NON	0,0	5,56	3,60	20,0	Infran
P BOIS	GC	48°44,859'	66°17,075'	OUI	NON	0,0	8,98	5,50	49,4	Fran
342_C1	GC	48°40,882'	66°05,875'	NON	NON	0,0	1,78	12,05	21,4	Indét
342_C2	GC	48°40,882'	66°05,875'	NON	OUI	0,0	-0,45	12,05	-5,4	Fran
414	GC	48°46,397'	66°08,005'	NON	NON	-5,1	1,34	14,15	18,9	Indét
Ruisseau Nord Berry	GC	48°46,627'	66°08,048'	NON	NON	-2,9	3,46	19,16	66,2	Infran
P 299 3_C1	GC	48°42,402'	66°09,420'	NON	OUI	0,0	-0,64	12,20	-7,8	Fran
P 299 3_C2	GC	48°42,402'	66°09,420'	NON	NON	0,0	0,44	12,20	5,4	Fran
P 299 3_C3	GC	48°42,402'	66°09,420'	NON	OUI	0,0	-0,25	12,20	-3,0	Fran
Fleuve38	SM	48°24,591'	70°19,235'	NON	NON	35,1	5,01	45,30	227,0	Infran
1726	SM	48°23,780'	70°15,148'	NON	NON	0,0	0,81	28,55	23,0	Indét

1723	SM	48°21,630'	70°08,125'	NON	NON	60,0	1,15	35,55	40,8	Infran
Fleuve32	SM	48°21,295'	70°07,084'	NON	NON	60,9	0,34	22,80	7,7	Infran
Fleuve29_C1	SM	48°20,818'	70°03,638'	NON	NON	-9,6	1,40	33,75	47,2	Indét
Fleuve29_C2	SM	48°20,818'	70°03,638'	NON	NON	4,4	0,95	33,75	32,2	Indét
Fleuve29_C3	SM	48°20,818'	70°03,638'	NON	NON	12,6	0,39	33,75	13,0	Indét
NE_01_C1	SM	48°22,597'	69°49,347'	OUI	NON	23,0	0,99	21,00	20,8	Fran
NE_01_C2	SM	48°22,597'	69°49,347'	OUI	NON	1,8	2,42	21,00	50,8	Fran
Chemin Robert	SM	48°15,823'	69°52,950'	NON	NON	72,0	17,90	13,41	240,0	Infran
17215_C1	SM	48°25,875'	70°26,058'	NON	NON	6,0	0,86	45,25	39,0	Indét
17215_C2	SM	48°25,875'	70°26,058'	NON	NON	-13,2	1,29	39,20	50,6	Indét
17211	SM	48°24,923'	70°20,624'	NON	NON	0,0	1,45	30,00	43,6	Indét
810	MAT	48°32'58,7"	67°41'40,7"	NON	OUI	-40,8	0,76	14,99	11,4	Fran
758	MAT	48°31'18,9"	67°45'41,7"	OUI	OUI	-59,2	0,49	6,53	3,2	Fran
4142	MAT	48°30'08,8"	67°47'28,9"	OUI	NON	-25,2	1,12	20,80	23,2	Fran
2602	MAT	48°31'26,2"	67°45'29,6"	OUI	OUI	-43,4	-1,16	13,59	-15,8	Fran
2644	MAT	48°05'07,4"	67°15'25,2"	NON	NON	-32,8	0,65	15,00	9,8	Indét
2050_C1	MAT	48°04'05,4"	67°16'17,4"	NON	NON	-31,0	2,02	12,00	24,2	Indét
2050_C2	MAT	48°04'05,4"	67°16'17,4"	OUI	OUI	-4,4	-0,02	12,00	-0,2	Fran
34	MAT	48°03'02,0"	67°17'11,3"	NON	NON	-13,4	3,13	18,00	56,4	Indét
10000	MAT	48°00'32,0"	67°02'23,2"	OUI	NON	-18,2	1,85	23,15	42,8	Fran
4230	MAT	47°59'34,2"	67°02'15,5"	NON	NON	-3,2	2,23	15,80	35,2	Indét
4462	MAT	47°58'55,8"	67°02'34,7"	NON	OUI	-37,0	0,61	24,20	14,8	Fran
4238	MAT	47°58'14,3"	67°00'47,1"	NON	NON	-7,0	3,06	15,63	47,8	Indét
2	MAT	47°30'08,7"	67°47'28,4"	NON	NON	-20,2	8,65	9,60	83,0	Infran
922_C1	MAT	48°01'40,4"	67°57'28,6"	NON	NON	-28,0	2,38	9,00	21,4	Indét
922_C2	MAT	48°01'40,4"	67°57'28,6"	NON	NON	-25,4	2,27	9,00	20,4	Indét
1442	MAT	48°18'25,9"	67°07'42,2"	NON	NON	0,8	0,26	16,04	4,2	Fran
2362	MAT	48°19'05,9"	67°08'28,6"	OUI	NON	-28,2	0,70	15,05	10,6	Fran
422_C1	MAT	48°19'22,5"	67°08'08,0"	OUI	NON	-17,0	2,14	15,05	32,2	Fran
422_C2	MAT	48°19'22,5"	67°08'08,0"	NON	NON	-20,4	1,81	15,05	27,2	Indét
2350	MAT	48°21'07,0"	67°11'24,3"	OUI	NON	-30,2	0,61	15,00	9,2	Fran
1706_C1	MAT	48°27'00,8"	66°52'06,3"	NON	NON	-67,6	2,28	11,50	26,2	Indét
1706_C2	MAT	48°27'00,8"	66°52'06,3"	NON	NON	-60,4	2,33	11,50	26,8	Indét
1706_C3	MAT	48°27'00,8"	66°52'06,3"	NON	NON	-61,2	0,85	11,50	9,8	Indét
2756_C1	MAT	48°25'21,7"	66°55'01,6"	NON	NON	-24,4	2,09	11,85	24,8	Indét
2756_c2	MAT	48°25'21,7"	66°55'01,6"	NON	NON	-30,8	1,50	11,85	17,8	Indét
914	MAT	48°20'25,7"	67°03'48,9"	NON	NON	-28,0	0,51	29,64	15,2	Indét
2772	MAT	48°19'10,3"	67°01'42,8"	NON	NON	-6,0	-1,22	13,93	-17,0	Infran
446_C1	MAT	48°19'14,1"	67°01'29,5"	NON	NON	-43,8	0,69	20,23	14,0	Indét
446_C2	MAT	48°19'14,1"	67°01'29,5"	NON	NON	-41,4	0,79	20,23	16,0	Indét
454	MAT	48°17'50,5"	67°01'17,4"	NON	NON	-21,6	0,86	14,70	12,6	Indét
426_C1	MAT	48°18'00,1"	67°07'18,1"	OUI	NON	-24,4	1,15	15,00	17,2	Fran
426_C2	MAT	48°18'00,1"	67°07'18,1"	OUI	NON	-24,2	0,29	15,00	4,4	Fran
4270	MAT	48°20'21,7"	67°17'22,8"	NON	NON	-64,4	0,54	17,62	9,6	Indét
4486	MAT	48°19'44,6"	67°20'02,2"	NON	NON	-20,8	1,44	27,25	39,2	Indét

4102	MAT	48°19'43,2"	67°20'09,6"	NON	NON	-12,7	1,13	32,05	36,2	Indét
4026	MAT	48°17'44,6"	67°14'36,3"	OUI	NON	-37,4	4,10	25,00	102,4	Fran
4574	MAT	48°19'29,8"	67°07'34,7"	NON	NON	-33,6	2,63	15,20	40,0	Indét
434	MAT	48°20'44,0"	67°06'24,2"	NON	NON	-4,8	3,05	24,28	74,0	Infran
994	MAT	48°13'35,9"	67°14'58,1"	NON	NON	-29,0	1,94	11,05	21,4	Indét
4278	MAT	48°19'14,2"	67°21'29,0"	OUI	NON	-42,4	0,46	18,45	8,4	Fran
4558	MAT	48°16'15,3"	67°14'31,6"	NON	NON	-28,0	2,57	33,40	85,8	Infran
286	MAT	48°18'30,3"	67°15'26,9"	NON	NON	25,4	7,61	8,30	63,2	Infran
4498	MAT	48°17'39,6"	67°15'13,8"	NON	NON	37,2	3,79	10,23	38,8	Infran
270	MAT	48°25'52,7"	67°32'09,4"	NON	NON	5,0	0,97	17,18	16,6	Indét
1242	MAT	48°25'04,6"	67°33'20,3"	NON	NON	24,6	4,53	14,80	67,0	Infran
1186	MAT	48°23'16,4"	67°38'01,2"	NON	OUI	-53,2	1,67	6,45	10,8	Fran
1250	MAT	48°25'35,8"	67°32'51,6"	NON	NON	-27,2	3,58	18,20	65,2	Infran
226	MAT	48°25'30,1"	67°39'21,9"	NON	NON	12,2	0,45	12,05	5,4	Fran
142	MAT	48°21'59,8"	67°39'39,0"	NON	OUI	-39,8	-0,03	12,05	-0,4	Fran
238	MAT	48°22'32,2"	67°38'52,5"	NON	NON	-14,0	-0,62	13,50	-8,4	Fran
2170_C1	MAT	48°21'36,9"	67°34'48,8"	NON	NON	7,4	2,07	12,30	25,4	Indét
2170_C2	MAT	48°21'36,9"	67°34'48,8"	NON	NON	3,2	2,70	12,30	33,2	Indét
4198	MAT	48°29'42,1"	67°23'32,4"	NON	NON	-30,8	1,68	16,04	26,9	Indét
4510	MAT	48°24'05,7"	67°28'49,0"	NON	NON	41,0	0,60	18,60	11,2	Infran
4090	MAT	48°23'08,0"	67°30'00,7"	NON	NON	-10,8	0,73	41,19	30,0	Indét
4082	MAT	48°21'26,5"	67°31'27,3"	NON	NON	-3,8	5,32	38,34	204,0	Infran
4474	MAT	48°20'17,5"	67°32'04,4"	NON	NON	3,2	0,00	19,13	0,0	Fran
1042	MAT	48°17'50,4"	67°33'39,8"	NON	NON	12,2	4,64	12,47	57,8	Infran
2482	MAT	48°28'24,7"	67°24'21,0"	NON	NON	-22,0	2,83	18,47	52,2	Indét
2494	MAT	48°29'13,5"	67°23'35,8"	NON	NON	-36,4	1,08	21,63	23,4	Indét
2724	MAT	48°29'57,0"	67°23'25,8"	OUI	NON	-45,8	0,03	13,15	0,4	Fran
1754	MAT	48°30'46,6"	67°22'59,1"	NON	NON	-36,6	1,01	15,30	15,4	Indét
2692	MAT	48°26'38,8"	67°30'34,9"	NON	NON	-42,2	1,39	17,83	24,8	Indét
1962	MAT	48°31'06,8"	67°33'06,8"	NON	NON	-7,6	3,49	20,26	70,8	Infran
4354	MAT	48°31'16,5"	67°35'16,9"	NON	NON	2,6	6,22	15,38	95,6	Infran
4190	MAT	48°30'07,3"	67°33'47,4"	NON	NON	7,0	4,73	32,30	152,8	Infran
4094	MAT	48°29'52,9"	67°33'55,9"	NON	NON	-7,2	5,45	35,50	193,5	Infran
4194	MAT	48°21'04,8"	67°13'17,8"	NON	NON	1,4	2,62	26,70	70,0	Infran
4138	MAT	48°23'57,5"	67°13'03,6"	NON	NON	-40,4	2,15	22,20	47,8	Indét
4327	MAT	48°23'13,0"	67°15'58,5"	OUI	NON	-45,0	0,96	21,00	20,2	Fran
4327B	MAT	48°23'14,9"	67°15'58'6"	OUI	OUI	-54,2	-1,44	13,60	-19,6	Fran
4134_C1	MAT	48°23'01,0"	67°16'00,8"	NON	OUI	-31,8	-0,85	13,10	-11,2	Fran
4134_C2	MAT	48°23'01,0"	67°16'00,8"	NON	OUI	-29,8	-0,76	13,70	-10,4	Fran
2434	MAT	48°23'00,3"	67°18'00,5"	NON	NON	-33,6	4,96	17,12	85,0	Infran
1898	MAT	48°31'42,4"	67°37'20,6"	OUI	NON	-52,0	1,21	11,90	14,4	Fran
4182	MAT	48°32'45,5"	67°41'33,2"	OUI	NON	-20,0	1,30	13,74	17,8	Fran
4058	MAT	48°33'58,5"	67°39'12,1"	NON	NON	-34,2	0,83	27,20	22,6	Indét
2676	MAT	48°29'30,8"	67°33'54,8"	NON	NON	12,4	5,25	5,30	27,8	Infran
666	MAT	48°30'37,5"	67°25'38,5"	NON	NON	-20,8	0,51	15,40	7,8	Indét

100001	MAT	48°26'15,9"	67°22'54,7"	NON	NON	125,4	4,05	31,00	125,6	Infran
222	PAT	48°01'46,4"	67°12'36,7"	NON	NON	-36,2	0,94	21,24	20,0	Indét
8	PAT	48°01'46,4"	67°12'36,6"	NON	NON	14,8	0,21	14,35	3,0	Fran
4B	PAT	47°55'46,9"	67°16'05,5"	NON	OUI	-53,6	1,06	17,28	18,4	Fran
106	PAT	47°58'47,4"	67°18'55,6"	OUI	NON	-7,0	1,76	13,54	23,8	Fran
4	PAT	47°56'41,1"	67°13'33,1"	NON	NON	0,8	1,72	29,10	50,0	Indét
194	PAT	47°55'02,8"	67°00'56,2"	NON	NON	7,4	6,15	12,82	78,8	Infran

Annexe II : Longueurs, superficies et superficies potentiellement inaccessibles des cours d'eau en amont des sites d'étude (n=104) comprenant les ponceaux inventoriés en 2014 dans quatre bassins versants (Grande Cascapédia, n=27; Sainte-Marguerite, n=13; Matapédia, n=80; Patapédia, n=6) d'après le modèle prédictif du succès de passage des salmonidés juvéniles de (Coffman, 2005). BV= Bassin versant, GC= Grande Cascapédia, SM= Sainte-Marguerite, MAT = Matapédia et PAT = Patapédia. Classif = Classification du ponceau, Fran= Franchissable, Infran= Infranchissable, Indét= Indéterminé. Noter qu'un site peut contenir plusieurs ponceaux placés en parallèle. Par exemple, le site 378 est composé de deux conduites dont l'une est classée indéterminée (C1) et l'autre est classée franchissable (C2). Le site 378 est donc considéré comme franchissable.

Site	BV	Latitude (N)	Longitude (O)	Classif	Longueur du cours d'eau en amont (m)	Superficie du cours d'eau en amont (m ²)	Superficie potentiellement inaccessible (m ²)
Ruisseau Indian Falls	GC	48° 35.190'	66° 08.710'	Fran	8 838,14	41 892,78	-
P CHVAL	GC	48° 31.367'	66° 06.236'	Fran	4 575,43	18 759,25	-
Ruisseau little jonathan	GC	48° 26.314'	66° 01.410'	Fran	5 849,96	17 549,88	-
ARC BET	GC	48° 16.743'	65° 53.370'	Fran	40 463,35	368 216,49	-
Ruisseau Cormier 1	GC	48° 16.717'	65° 54.791'	Indét	3 346,86	10 040,58	10 040,58
P Bet Gallag	GC	48° 14.609'	65° 54.772'	Infran	5 418,53	12 462,62	12 462,62
P WOW	GC	48° 40.141'	66° 19.819'	Infran	3 886,29	8 744,15	8 744,15
P CAST	GC	48° 40.575'	66° 17.964'	Indét	343,28	789,54	789,54
378	GC	48° 46,004'	66° 32,480'	Fran	26 050,17	156 301,02	-
Ruisseau Washout	GC	48° 41,229'	66° 35,528'	Infran	7 708,24	30 832,96	30 832,96
297	GC	48° 40,890'	66° 37,086'	Infran	3 046,03	6 092,06	6 092,06
295	GC	48° 40,357'	66° 39,259'	Fran	10 245,67	40 982,68	-
P DOUBLE 2	GC	48° 43,3430'	66° 20,156'	Indét	6 403,96	29 778,41	29 778,41
P BOIS 3	GC	48° 46,485'	66° 18,593'	Infran	1 256,56	3 141,40	3 141,40
P BOIS	GC	48° 44,859'	66° 17,075'	Fran	3 507,12	10 521,37	-
342	GC	48° 40,882'	66° 05,875'	Fran	5 158,62	24 245,51	-
414	GC	48° 46,397'	66° 08,005'	Indét	7 452,41	6 279,46	6 279,46
Ruisseau Nord Berry	GC	48° 46,627'	66° 08,048'	Infran	5 401,81	16 205,43	16 205,43
P 299 3	GC	48° 42,402'	66° 09,420'	Fran	18 509,40	38 767,67	-
Fleuve38	SM	48°24,591'	70°19,235'	Infran	6 936,18	34 680,89	34 680,89
1726	SM	48°23,780'	70°15,148'	Indét	14 683,34	44 050,01	44 050,01
1723	SM	48°21,630'	70°08,125'	Infran	21 490,35	128 942,07	128 942,07
Fleuve32	SM	48°21,295'	70°07,084'	Infran	1 149,85	5 749,25	5 749,25
Fleuve29	SM	48°20,818'	70°03,638'	Indét	38 835,79	155 343,18	155 343,18
NE_01	SM	48°22,597'	69°49,347'	Fran	6 611,17	33 055,84	-
Chemin Robert	SM	48°15,823'	69°52,950'	Infran	1 933,81	5 801,44	5 801,44
17215	SM	48°25,875'	70°26,058'	Indét	30 485,67	304 856,69	304 856,69
17211	SM	48°24,923'	70°20,624'	Indét	4 194,12	33 552,92	33 552,92
2	MAT	47°30'08,7"	67°47'28,4"	Infran	755,72	2 267,16	2 267,16
2772	MAT	48°19'10,3"	67°01'42,8"	Infran	3 991,07	13 968,76	13 968,76

434	MAT	48°20'44,0"	67°06'24,2"	Infran	12 653,52	40 286,93	40 286,93
4558	MAT	48°16'15,3"	67°14'31,6"	Infran	7 309,33	29 237,34	29 237,34
286	MAT	48°18'30,3"	67°15'26,9"	Infran	2 244,50	4 489,00	4 489,00
4498	MAT	48°17'39,6"	67°15'13,8"	Infran	9 523,57	14 285,35	14 285,35
1242	MAT	48°25'04,6"	67°33'20,3"	Infran	1 415,84	2 831,68	2 831,68
1250	MAT	48°25'35,8"	67°32'51,6"	Infran	2 584,83	2 922,47	2 922,47
4510	MAT	48°24'05,7"	67°28'49,0"	Infran	3 618,31	5 427,47	5 427,47
4082	MAT	48°21'26,5"	67°31'27,3"	Infran	878,26	1 756,51	1 756,51
1042	MAT	48°17'50,4"	67°33'39,8"	Infran	3 485,58	5 228,37	5 228,37
1962	MAT	48°31'06,8"	67°33'06,8"	Infran	8 237,59	19 037,01	19 037,01
4354	MAT	48°31'16,5"	67°35'16,9"	Infran	1 162,46	2 906,16	2 906,16
4190	MAT	48°30'07,3"	67°33'47,4"	Infran	1 581,30	2 371,94	2 371,94
4094	MAT	48°29'52,9"	67°33'55,9"	Infran	1 891,92	1 127,76	1 127,76
4194	MAT	48°21'04,8"	67°13'17,8"	Infran	6 057,25	6 827,02	6 827,02
2434	MAT	48°23'00,3"	67°18'00,5"	Infran	2 213,53	5 533,82	5 533,82
2676	MAT	48°29'30,8"	67°33'54,8"	Infran	1 140,08	1 710,12	1 710,12
100001	MAT	48°26'15,9"	67°22'54,7"	Infran	2 919,11	5 838,23	5 838,23
2644	MAT	48°05'07,4"	67°15'25,2"	Indét	11 153,01	39 035,54	39 035,54
34	MAT	48°03'02,0"	67°17'11,3"	Indét	2 862,57	11 450,29	11 450,29
4230	MAT	47°59'34,2"	67°02'15,5"	Indét	1 354,02	2 639,13	2 639,13
4238	MAT	47°58'14,3"	67°00'47,1"	Indét	1 312,64	1 312,64	1 312,64
922	MAT	48°01'40,4"	67°57'28,6"	Indét	914,61	2 743,83	2 743,83
1706	MAT	48°27'00,8"	66°52'06,3"	Indét	18 950,44	121 699,84	121 699,84
2756	MAT	48°25'21,7"	66°55'01,6"	Indét	3 723,93	13 033,74	13 033,74
914	MAT	48°20'25,7"	67°03'48,9"	Indét	1 173,89	3 521,67	3 521,67
446	MAT	48°19'14,1"	67°01'29,5"	Indét	1 838,58	11 031,49	11 031,49
454	MAT	48°17'50,5"	67°01'17,4"	Indét	10 951,95	31 145,19	31 145,19
4270	MAT	48°20'21,7"	67°17'22,8"	Indét	33 760,84	153 340,92	153 340,92
4486	MAT	48°19'44,6"	67°20'02,2"	Indét	3 123,38	7 808,45	7 808,45
4102	MAT	48°19'43,2"	67°20'09,6"	Indét	7 058,26	8 615,03	8 615,03
4574	MAT	48°19'29,8"	67°07'34,7"	Indét	4 564,20	9 874,87	9 874,87
994	MAT	48°13'35,9"	67°14'58,1"	Indét	1 382,20	6 219,92	6 219,92
270	MAT	48°25'52,7"	67°32'09,4"	Indét	5 384,10	11 197,11	11 197,11
2170	MAT	48°21'36,9"	67°34'48,8"	Indét	2 637,83	5 275,66	5 275,66
4198	MAT	48°29'42,1"	67°23'32,4"	Indét	11 449,82	2 270,78	2 270,78
4090	MAT	48°23'08,0"	67°30'00,7"	Indét	2 027,13	4 054,26	4 054,26
2482	MAT	48°28'24,7"	67°24'21,0"	Indét	18 079,81	18 245,49	18 245,49
2494	MAT	48°29'13,5"	67°23'35,8"	Indét	14 430,72	13 414,04	13 414,04
1754	MAT	48°30'46,6"	67°22'59,1"	Indét	4 058,94	14 206,30	14 206,30
2692	MAT	48°26'38,8"	67°30'34,9"	Indét	5 636,19	16 908,57	16 908,57
4138	MAT	48°23'57,5"	67°13'03,6"	Indét	2 482,11	3 723,17	3 723,17
4058	MAT	48°33'58,5"	67°39'12,1"	Indét	3 608,47	10 825,42	10 825,42
666	MAT	48°30'37,5"	67°25'38,5"	Indét	1 218,52	2 437,04	2 437,04
810	MAT	48°32'58,7"	67°41'40,7"	Fran	8 614,02	946,30	-
758	MAT	48°31'18,9"	67°45'41,7"	Fran	5 707,42	11 414,83	-

4142	MAT	48°30'08,8"	67°47'28,9"	Fran	5 731,23	14 328,09	-
2602	MAT	48°31'26,2"	67°45'29,6"	Fran	6 048,60	1 023,55	-
2050	MAT	48°04'05,4"	67°16'17,4"	Fran	1 444,26	3 610,66	-
10000	MAT	48°00'32,0"	67°02'23,2"	Fran	3 309,00	7 819,93	-
4462	MAT	47°58'55,8"	67°02'34,7"	Fran	34,45	51,68	-
1442	MAT	48°18'25,9"	67°07'42,2"	Fran	7,12	14,25	-
2362	MAT	48°19'05,9"	67°08'28,6"	Fran	N/D	N/D	N/D
422	MAT	48°19'22,5"	67°08'08,0"	Fran	614,25	1 842,75	-
2350	MAT	48°21'07,0"	67°11'24,3"	Fran	3 326,45	6 652,89	-
426	MAT	48°18'00,1"	67°07'18,1"	Fran	488,40	3 174,58	-
4026	MAT	48°17'44,6"	67°14'36,3"	Fran	10 330,90	41 323,58	-
4278	MAT	48°19'14,2"	67°21'29,0"	Fran	4 170,75	12 512,26	-
1186	MAT	48°23'16,4"	67°38'01,2"	Fran	8 948,10	5 833,46	-
226	MAT	48°25'30,1"	67°39'21,9"	Fran	1 607,28	4 018,19	-
142	MAT	48°21'59,8"	67°39'39,0"	Fran	3 470,88	10 412,63	-
238	MAT	48°22'32,2"	67°38'52,5"	Fran	7 003,61	15 897,32	-
4474	MAT	48°20'17,5"	67°32'04,4"	Fran	N/D	N/D	N/D
2724	MAT	48°29'57,0"	67°23'25,8"	Fran	10 900,27	24 022,09	-
4327	MAT	48°23'13,0"	67°15'58,5"	Fran	3 436,28	652,22	-
4327B	MAT	48°23'14,9"	67°15'58,6"	Fran	N/D	N/D	N/D
4134	MAT	48°23'01,0"	67°16'00,8"	Fran	3 001,46	7 503,65	-
1898	MAT	48°31'42,4"	67°37'20,6"	Fran	13 331,09	41 124,29	-
4182	MAT	48°32'45,5"	67°41'33,2"	Fran	8 140,87	32 563,49	-
222	PAT	48°01'46,4"	67°12'36,7"	Indét	4 224,66	10 561,64	10 561,64
8	PAT	48°01'46,4"	67°12'36,6"	Fran	1 544,80	2 317,20	-
4B	PAT	47°55'46,9"	67°16'05,5"	Fran	8 543,79	25 631,36	-
106	PAT	47°58'47,4"	67°18'55,6"	Fran	467,22	934,45	-
4	PAT	47°56'41,1"	67°13'33,1"	Indét	5 574,77	11 149,55	11 149,55
194	PAT	47°55'02,8"	67°00'56,2"	Infran	4 622,14	6 933,22	6 933,22