

**Fragmentation des habitats piscicoles engendrée par les traverses de
cours d'eau en contexte minier**

Par
Alexandre Piroolley

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

Jury d'évaluation

Président du jury et examineur interne	Eva Enders INRS – ETE
Examineur externe	Olivier Morissette Faculté ou département UQAC
Examineur interne	Eva Enders INRS – ETE
Directeur de recherche	Normand Bergeron INRS - ETE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche Normand Bergeron pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce projet dans son laboratoire. Sa confiance et son expérience m'ont été précieuse pour la réussite de celui-ci. Je tiens également à le remercier pour l'ensemble des opportunités annexes à ce projet et les recommandations pour la suite de mon aventure au Québec.

Je voudrais également remercier l'ensemble du groupe de recherche MiraNor dans lequel s'inscrit mon projet et tout particulièrement Patrice Couture, Émilie Reny-Nolin et Mackenzie Anne-Clifford pour leur aide lors de l'organisation de mon terrain et le partage de leurs propres expériences à Schefferville. À Conrad André, notre guide de la communauté Matimekush – Lac John pour le partage de sa connaissance du territoire et son aide sur place. Un grand merci à Marika Breton et Pierre-Yves Normandin pour leur aide sur ce projet, dans des conditions par toujours évidentes.

Merci à l'ensemble du laboratoire Bergeron pour les conversations toujours stimulantes et les échanges entre les différents projets. À André « Maunonke » Boivin pour son aide technique tout au long de mon passage à l'INRS et pour tous les à-côtés qu'offre la station du CIRSA.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans mentionner ma famille pour leur soutien dans cette nouvelle vie Outre-Atlantique ainsi que ma seconde famille : Justine, Hippolyte et ma compagne Aurore pour tous ces bons moments et les nombreuses parties de pêche !

RÉSUMÉ

L'étude de la fragmentation des habitats aquatiques associée aux réseaux de transports fait l'objet d'un effort de recherche important depuis plusieurs années. Malgré près de 10 millions d'hectares de terres Québécoises classées sous titres miniers d'exploration en 2021, il n'existe aucune donnée relative à l'importance du blocage engendrée par les traverses de cours sur ces territoires.

En août 2022, 39 traverses de cours d'eau dont 29 ponceaux ont été diagnostiquées sur les réseaux routiers et ferroviaires des anciens sites miniers de la ville de Schefferville. L'impact des ouvrages sur le franchissement piscicole de 4 classes de tailles de salmonidés et deux groupes d'espèces d'accompagnement est évalué à l'aide du filtre théorique Indice de Continuité Écologique (ICE).

Plus de 50% des traverses diagnostiquées dans cette étude impactent négativement le franchissement piscicole pour l'ensemble des groupes cibles considérés. Les vitesses moyennes d'écoulement, les tirants d'eau, une configuration inadéquate de la chute en aval ainsi que l'accumulation de débris végétaux ou la présence d'embâcles constituent les principales variables pénalisantes. Ces résultats confirment la nécessité d'intégrer également les petites espèces dans l'étude du franchissement piscicole et soulignent la nécessité de réhabiliter les anciens sites à l'issue de leur exploitation.

Mots-clés : Fragmentation d'habitat, ponceaux, mines, filtre décisionnel, Indice de connectivité, salmonidés

ABSTRACT

Aquatic habitat fragmentation due to stream crossings has been a major study case for the past years. Close to 10 million hectares of land are assigned as exploration mineral title in the Quebec province and yet, no scientific literature focused specifically on fish passage impediment in these territories.

In August 2022, 39 stream crossings including 29 culverts were assessed on both road and train network of the old Schefferville's mines. Fish passage impediment was assessed for 4 size groups of salmonids and 2 size groups of other fish species found in this environment, using the Ecological Connectivity Index (ICE) decision tree.

More than 50 % of stream crossings showed fish passage impediment for all fish groups. Mean velocities, water depths, unsuitable outlet drop along with debris accumulation and logjam were the main bottleneck variables. The results highlight the need to also integrate small-bodied individuals in fish passage assessment and the requirement to establish a restoration strategy after the mining exploitation.

Keywords: Habitat fragmentation, culverts, mines, decision tree, connectivity index, salmonid species

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES ÉQUATIONS	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XVII
1 INTRODUCTION	19
2 MISE EN CONTEXTE	21
2.1 LES TYPES DE TRAVERSES DE COURS D'EAU	21
2.2 LA FRAGMENTATION DES HABITATS PISCICOLES PAR LES TRAVERSES DE COURS D'EAU	22
2.3 LES MECANISMES DE FRANCHISSEMENT PISCICOLE DANS LES PONCEAUX	24
2.4 ÉVALUER LA FRAGMENTATION DES HABITATS ENGENDREE PAR LES TRAVERSES DE COURS D'EAU.....	30
2.5 L'EXPLOITATION MINIERE ET LE RISQUE DE FRAGMENTATION DES HABITATS PISCICOLES	32
3 OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	35
4 MÉTHODOLOGIE	37
4.1 HISTORIQUE DE LA REGION ET SITE D'ETUDE	37
4.2 IDENTIFICATION ET SELECTION DES TRAVERSES DE COURS D'EAU.....	40
4.3 MESURES DE TERRAIN	41
4.4 ÉTAT STRUCTUREL DES PONCEAUX	44
4.5 SELECTION DU FILTRE DECISIONNEL POUR LE DIAGNOSTIC DES PONCEAUX	44
4.5.1 <i>Principe de l'évaluation</i>	44
4.5.2 <i>Présence de défauts</i>	46
4.6 VALEURS SEUILS	48
4.6.1 <i>Profondeur de la fosse d'appel</i>	48
4.6.2 <i>Tirant d'eau minimum</i>	48
4.6.3 <i>Chute maximale franchissable</i>	49
4.6.4 <i>Distance maximale franchissable</i>	52
4.6.5 <i>Facteur de constriction</i>	53
4.7 FRANCHISSABILITE DES AUTRES TRAVERSES DE COURS D'EAU	53
4.8 ESPECES CIBLES POUR L'EVALUATION DU FRANCHISSEMENT PISCICOLE	53
4.9 FRAGMENTATION DES HABITATS	56
4.10 ANALYSES STATISTIQUES	58

5	RESULTATS	59
5.1	DESCRIPTION DES TRAVERSES DE COURS D'EAU	59
5.1.1	<i>Types de traverses de cours d'eau.....</i>	<i>59</i>
5.1.2	<i>Caractéristiques des traverses composées de ponceaux</i>	<i>61</i>
5.1.3	<i>Défectuosité des ponceaux.....</i>	<i>66</i>
5.2	ÉVALUATION DU POTENTIEL DE FRANCHISSEMENT PISCICOLE DES PONCEAUX	67
5.3	QUANTIFICATION DE LA PERTE D'HABITAT	73
6	DISCUSSION	79
7	CONCLUSION.....	85
8	BIBLIOGRAPHIE	87
9	SITOGRAPHIE	97
10	ANNEXES	99
	ANNEXE I : APPROXIMATION DE LA PROFONDEUR DE FOSSE MINIMALE NECESSAIRE AU FRANCHISSEMENT D'UNE CHUTE EN AVAL D'UN PONCEAU– ADAPTE DE BAUDOIN <i>ET AL.</i> (2014)	99
	ANNEXE II : TIRANTS D'EAU MINIMUMS NECESSAIRES POUR LA NAGE – ADAPTE DE BAUDOIN <i>ET AL.</i> (2014).....	100
	ANNEXE III : COEFFICIENTS RETENUS POUR LE CALCUL DES VITESSES DE SPRINT ET VALEURS SEUILS DE CHUTE COEFFICIENTS RETENUS POUR LE CALCUL DES VITESSES DE SPRINT DES DIFFERENTES ESPECES CIBLES.....	101
	ANNEXE IV : COEFFICIENTS RETENUS POUR LE CALCUL DES PERFORMANCES DE NAGE ET CLASSES DE FRANCHISSABILITE EN FONCTION DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT	103
	ANNEXE V : REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE	106

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 : FORMES USUELLES DE PONCEAUX INSPIREES DE SCHALL <i>ET AL.</i> (2012).....	21
FIGURE 2.2 : EXEMPLE DE PASSAGE A GUE NON AMENAGE..	22
FIGURE 2.3 :REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES PRINCIPAUX MOUVEMENTS PISCICOLES NECESSAIRES AU DEROULEMENT DE LEUR CYCLE BIOLOGIQUE, ADAPTE DE BARAS (1992).....	23
FIGURE 2.4 : EXEMPLE DE PONCEAUX PENALISANTS DE FRANCHISSEMENT PISCICOLE.....	25
FIGURE 2.5 : COURBE SEUIL D'EPUISEMENT ISSU DE CASTRO-SANTOS (2004)..	27
FIGURE 2.6 : COUPE TRANSVERSALE SCHEMATIQUE DE LA DISTRIBUTION DES VITESSES D'ECOULEMENT DANS UN PONCEAU ISSU DE PEARSON <i>ET AL.</i> (2005).....	28
FIGURE 2.7 : EXEMPLE DE ROUTE DE PROSPECTION A PROXIMITE DE LA MINE GAGNON 1 EN VUE AERIENNE (SOURCE BING SATELLITE).....	32
FIGURE 2.8 : LAC PUIT DE MINE A L'EMPLACEMENT DE L'ANCIENNE MINE A CIEL OUVERT DE BURNT CREEK.....	33
FIGURE 4.1 : CARTE DE LOCALISATION DU TERRITOIRE D'ETUDE..	39
FIGURE 4.2 : SCHEMA TYPE DES VARIABLES STATIQUES ET DYNAMIQUES MESUREES SUR UN PONCEAU..	42
FIGURE 4.3 : DEBIT MOYEN MENSUEL INTERANNUEL ($m^3.s^{-1}$) EN PERIODE D'EAU LIBRE A LA STATION HYDROMETRIQUE 03OB009.....	43
FIGURE 4.4 : ARBRE DECISIONNEL POUR L'EVALUATION DU FRANCHISSEMENT PISCICOLE DES PONCEAUX (ADAPTE DE BAUDOIN <i>ET AL.</i> 2014).....	47
FIGURE 5.1 : REPARTITION DES TRAVERSES DE COURS D'EAU SELON LEUR CLASSIFICATION ET LA TYPOLOGIE DE VOIRIE.....	59
FIGURE 5.2 : CARTE DE LOCALISATION DES BASSINS VERSANTS PRINCIPAUX DU TERRITOIRE D'ETUDE.	60
FIGURE 5.3 : EXEMPLE DES DIFFERENTS RESEAUX DE TRANSPORT RENCONTRES.	62
FIGURE 5.4 : REPRESENTATION GRAPHIQUE EN BOITE A MOUSTACHE DE LA COMPARAISON STATISTIQUE ENTRE LE RESEAU DE TRANSPORT ET A) LA LONGUEUR DES PONCEAUX, B) LE DIAMETRE DES PONCEAUX, C) LE FACTEUR DE CONSTRICTION ET D) LARGEUR DES ROUTES.....	64
FIGURE 5.5 : CORRELATION ENTRE LES COUPLES DE VARIABLES A) LONGUEUR PONCEAU / LARGEUR DE VOIRIE ET B) DIAMETRE / FACTEUR DE CONSTRICTION.	65
FIGURE 5.6 : CLASSE ICE DES PONCEAUX (N=29) PAR GROUPES D'ESPECE CIBLE SANS PRISE EN COMPTE DES DEFAUTS PRESENTS SUR LES OUVRAGES.	69

FIGURE 5.7 : INDICE ICE DETAILLE DES PARAMETRES LIMITANT LE FRANCHISSEMENT PISCICOLE AU NIVEAU DE CHAQUE SITE.....	71
FIGURE 5.8 : NOMBRE DE PONCEAU RENDU INFRANCHISSABLE PAR LA PRESENCE D'EMBACLES (N=6).	72

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 4.1 : MATRICE DE NOTATION D'UN OUVRAGE AVEC CHUTE AVAL.....	45
TABLEAU 4.2 : GROUPES D'ESPECES SELECTIONNEES POUR L'EVALUATION DU FRANCHISSEMENT PISCICOLE.....	55
TABLEAU 4.3 : TRANSPOSITION DE L'ACCESSIBILITE DU TRONÇON EN FONCTION DE LA FRANCHISSABILITE DE LA TRAVERSE AVAL.....	56
TABLEAU 4.4 : MATRICE DE CALCUL POUR L'ACCESSIBILITE DU TRONÇON I+1.	57
TABLEAU 5.1 : PORTRAIT TYPE ET ANALYSES STATISTIQUES ASSOCIES DES VARIABLES HYDROLOGIQUES SELON LE RESEAU DE TRANSPORT.....	61
TABLEAU 5.2 : PORTRAIT TYPE ET ANALYSES STATISTIQUES ASSOCIES AUX CARACTERISTIQUES STRUCTURELLES DES PONCEAUX SELON LE RESEAU DE TRANSPORT.	63
TABLEAU 5.3 : TABLEAU DE CONTINGENCE DE LA PRESENCE DE DEFAUTS EN FONCTION DU RESEAU DE TRANSPORT OU DU NOMBRE DE PONCEAUX PAR SITE.	66
TABLEAU 5.4 : PORTRAIT TYPE ET ANALYSES STATISTIQUES ASSOCIES DES VARIABLES HYDRAULIQUES SELON LE RESEAU DE TRANSPORT.....	68
TABLEAU 5.5 : RESULTAT DES TESTS EXACTS DE FISCHER EFFECTUE SUR LA FRANCHISSABILITE DES OUVRAGES SELON LE RESEAU DE TRANSPORT ET LE NOMBRE D'OUVRAGES SUR SITE.	73
TABLEAU 5.6 : SUPERFICIES D'HABITATS ET ACCESSIBILITE ASSOCIEE SUR LES 4 SOUS-BASSINS VERSANTS ETUDIES.....	75
TABLEAU 5.7 : INDICES DE FRAGMENTATION DIADROME ET POTAMODROME DES QUATRE SOUS-BASSINS VERSANTS ETUDIES, TEL QUE FORMULE PAR COTE ET AL (2008).	76
TABLEAU 5.8 : LONGUEUR DU PLUS LONG TRONÇON TOTALEMENT FRANCHISSABLE ET POSITION ASSOCIEE SUR LES 4 SOUS-BASSINS VERSANTS ETUDIES.....	77

LISTE DES ÉQUATIONS

ÉQUATION 2.1 : INTENSITE DES TURBULENCES.....	29
ÉQUATION 2.2 : ÉNERGIE CINETIQUE DES TURBULENCES.....	29
ÉQUATION 2.3 : CISAILLEMENT HORIZONTAL.....	30
ÉQUATION 2.4 : APPROXIMATION DE LA TRAINÉE SUBIE PAR UN POISSON EN POSITION STATIONNAIRE.....	30
ÉQUATION 4.1 : FORMULE DU RATIO DE BASSIN VERSANT.....	44
ÉQUATION 4.2 : PROFONDEUR DE FOSSE MINIMALE POUR LA PRISE D'APPEL SELON BAUDOIN ET AL. (2014).	48
ÉQUATION 4.3 : PROFONDEUR D'AFFOUILLEMENT (FAHLBUSCH, 1994; VERONESE, 1937).....	48
ÉQUATION 4.4 : TIRANT D'EAU MINIMUM SELON BAUDOIN ET AL. (2014).	48
ÉQUATION 4.5 : CONDITION HYDRAULIQUE PERMETTANT DE FORMER UN JET DE SURFACE (BAUDOIN <i>ET AL.</i> , 2014).	49
ÉQUATION 4.6 : CONDITION HYDRAULIQUE PERMETTANT DE FORMER UN JET QUASI DE SURFACE (BAUDOIN <i>ET AL.</i> , 2014).	49
ÉQUATION 4.7 : ÉQUATION DE LA HAUTEUR MAXIMALE DE CHUTE FRANCHISSABLE PAR UNE ESPECE DE POISSON NON SAUTEUSE (BAUDOIN <i>ET AL.</i> , 2014).	49
ÉQUATION 4.8 : ÉQUATION DE LA TRAJECTOIRE PARABOLIQUE D'UN PROJECTILE ADAPTEE A LA TRAJECTOIRE D'UN POISSON LORS D'UN SAUT SELON BAUDOIN ET AL. (2014).	50
ÉQUATION 4.9 : ÉQUATION DE LA HAUTEUR MAXIMALE DE CHUTE FRANCHISSABLE PAR UNE ESPECE DE POISSON SAUTEUSE (BAUDOIN <i>ET AL.</i> , 2014).	51
ÉQUATION 4.10 : ÉQUATION DE LA VITESSE DE SPRINT D'UN INDIVIDU DONNE (KATOPODIS ET AL., 2016).	52
ÉQUATION 4.11 : ÉQUATION DE LA DISTANCE FRANCHISSABLE AU REGARD DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT PAR UN INDIVIDU DONNE (KATOPODIS ET AL., 2016).	53
ÉQUATION 4.12 : ÉQUATION DU FACTEUR DE CONSTRICTION DES PONCEAUX.	53
ÉQUATION 4.13 : INDICE DE FRAGMENTATION DES HABITATS SELON COTE ET AL. (2009).	57

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BDTQ : Banque de Données Topographiques du Québec

DSO : Direct Shipping Ore – Site à enfournement direct

ICE : Indice de Continuité Écologique

IOC : Iron Ore Company of Canada – Société Canadienne du minerai de fer

LQE : Loi sur la Qualité de l'Environnement

MELCCFP : Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs

MRNF : Ministère des Ressources naturelles et des Forêts

REAFIE : Règlement sur l'Encadrement d'Activités en Fonction de leur Impact sur l'Environnement

RHN : Réseau Hydrographique National

SIG : Système d'Information Géographique

TTOG : Tuyaux en Tôle Ondulée Galvanisée

1 INTRODUCTION

La circulation des Hommes et des marchandises joue un rôle pilier dans nos sociétés actuelles. Elle repose notamment sur un vaste réseau de transport terrestre qui représente plus de 656 300 km d'infrastructures carrossables au Québec (Transport Québec, en ligne). La création de ce type d'infrastructures entraîne nécessairement un impact sur les habitats terrestres, mais également aquatiques.

Les cours d'eau constituent de véritables voies de circulation, que l'on considère les flux d'eau, de nutriments, les sédiments charriés ou encore le déplacement de la faune aquatique. Ainsi l'ensemble de l'ichtyofaune effectue des déplacements d'ampleur variable selon les espèces pour trouver les habitats adaptés à leur cycle de vie. Si l'impact représenté par les grands barrages sur la faune piscicole est facilement perceptible pour tout un chacun, les ponceaux, de par leurs dimensions, semblent au contraire concilier l'exploitation du territoire et l'intégrité des écosystèmes aquatiques. Pourtant, leur omniprésence sur les réseaux hydrographiques entraîne des impacts cumulés qui dépassent celui des infrastructures hydrauliques de grande ampleur (Januchowski-Hartley *et al.*, 2013).

Les activités minières n'échappent pas à ce besoin d'infrastructures de transport pour leur fonctionnement (Kravitz *et al.*, 2019). L'extraction minière constitue un secteur d'activité particulièrement important dans la province de Québec avec 22 mines en production ou en démarrage en 2022 (Entreprise Québec, en ligne) pour près de 10 millions d'hectares de terres classées comme titre minier actif (Statistique Québec, en ligne). Pourtant, l'impact de cette industrie sur la fragmentation des habitats aquatiques est encore faiblement documenté. À ce titre, l'étude de la fragmentation des habitats piscicoles dans ce contexte constitue un prérequis indispensable à l'aménagement éclairé du territoire ainsi qu'au développement et à la mise en œuvre de solutions de restauration efficaces.

Ce projet de recherche est subventionné par le Fonds pour Dommage à l'Environnement et s'inscrit dans le cadre du groupe de recherche universitaire MiraNor (MiraNor, en ligne). Ce groupe de recherche s'intéresse aux impacts des activités minières sur différentes composantes associées aux milieux aquatiques nordiques.

2 MISE EN CONTEXTE

2.1 Les types de traverses de cours d'eau

Les ponts et les ponceaux constituent les deux grandes catégories d'infrastructure de génie civil utilisées pour la traversée des cours d'eau. Par définition, les ponts regroupent l'ensemble des infrastructures à portée libre, dont les culées sont positionnées hors du lit mineur et des berges d'un cours d'eau. Ces infrastructures de forte capacité hydraulique sont de ce fait particulièrement conciliantes avec la préservation des propriétés morpho-dynamiques des cours d'eau, mais engendrent des coûts de construction prohibitifs pour un emploi généralisé sur le territoire.

Par opposition les ponceaux désignent des ouvrages hydrauliques de formes et de matériaux variables, généralement de petite taille et positionnés sous un remblai. Cette catégorie regroupe à la fois des infrastructures à contour fermé et à contour ouvert dont la principale différence réside dans la nature des fondations et des ancrages de l'ouvrage (Figure 2.1). Contrairement aux ponceaux à contour fermé, les ponceaux à contour ouvert conservent le lit du cours d'eau au sein de l'ouvrage (ouvrages à fond libre) et préservent donc plus efficacement les propriétés morpho-dynamique du cours d'eau. Leur installation requiert toutefois un sol non érodable afin de limiter les risques d'affouillement des fondations.

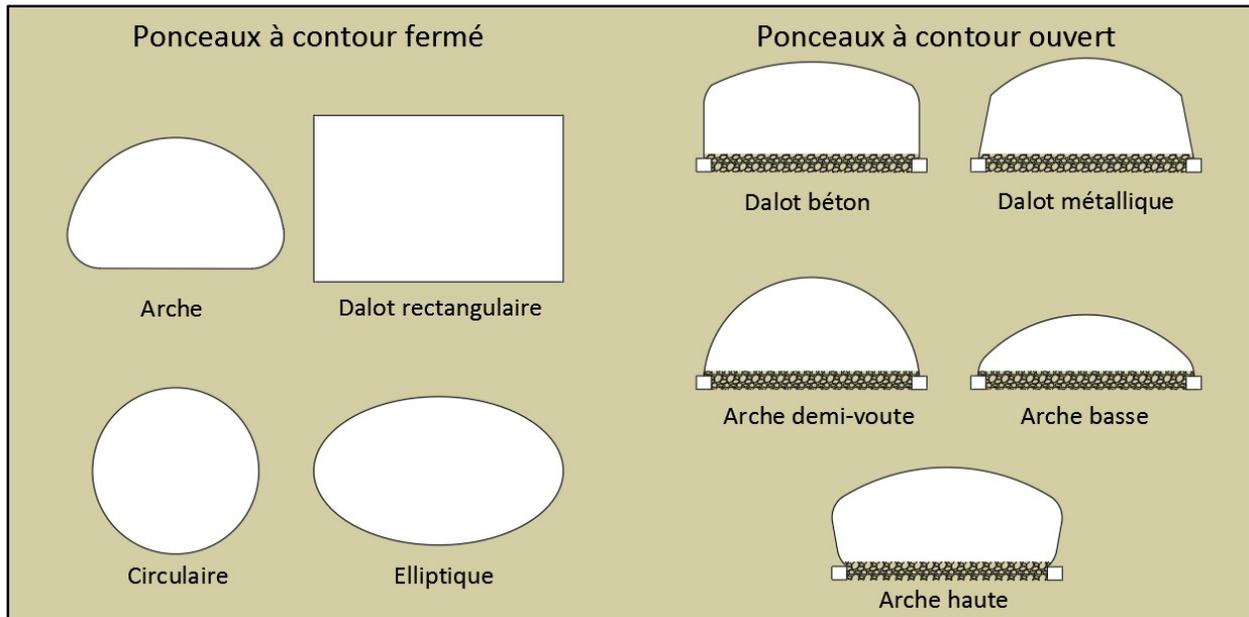


Figure 2.1 : Formes usuelles de ponceaux inspirées de Schall *et al.* (2012).

Les traverses à gué constituent une catégorie à part de traverses de cours d'eau (Figure 2.2). Il ne s'agit pas dans ce cas d'une infrastructure de génie civile, mais d'un passage pour véhicule directement dans le cours d'eau. De ce fait, leur création est réservée aux cours d'eau avec un lit stable et des berges de faible talutage sur des chemins utilisés ponctuellement. Il s'agit d'une alternative à la mise en œuvre d'ouvrage permanent qui fait l'objet d'un intérêt croissant (Jutras *et al.*, 2022) bien que leur implantation ne soit pas encore légale au Québec en terre publique (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, en ligne).



Figure 2.2 : Exemple de passage à gué non aménagé. Passage à gué localisé au nord de la mine Gagnon et de la route principale au point de coordonnées NAD83, UTM 19N : 632676,69 / 6080739,00 (crédits A. Pirolley).

2.2 La fragmentation des habitats piscicoles par les traverses de cours d'eau

Les poissons, de par leur physiologie et l'environnement dans lequel ils évoluent, sont des animaux pour lesquels les déplacements jouent un rôle essentiel dans le déroulement de leurs cycles biologiques (Figure 2.3). Les efforts de recherche relatifs aux mouvements piscicoles se sont principalement focalisés sur les migrateurs diadromes et les salmonidés résidents adultes (Bates *et al.*, 2003; Belford *et al.*, 1989; Burford *et al.*, 2009; Meixler *et al.*, 2009). Pour autant, il apparaît clairement que l'ensemble de l'ichtyofaune effectue des déplacements significatifs à différents stades de développement ou période de l'année (Lucas *et al.*, 2008). Historiquement considéré comme un stade sédentaire, l'importance des déplacements saisonniers chez les salmonidés juvéniles dans la colonisation d'habitats propices à leur développement sont désormais reconnus (Gowan *et al.*, 1994). Les résultats des opérations de marquage/recapture réalisées par Coffman (2005) ont quant à eux mis en évidence l'importance des mouvements

chez les cyprinidés, y compris hors des périodes de reproduction. Un constat similaire est observé sur un cortège d'espèces d'eaux tempérées dans le centre du Michigan (Briggs *et al.*, 2013).

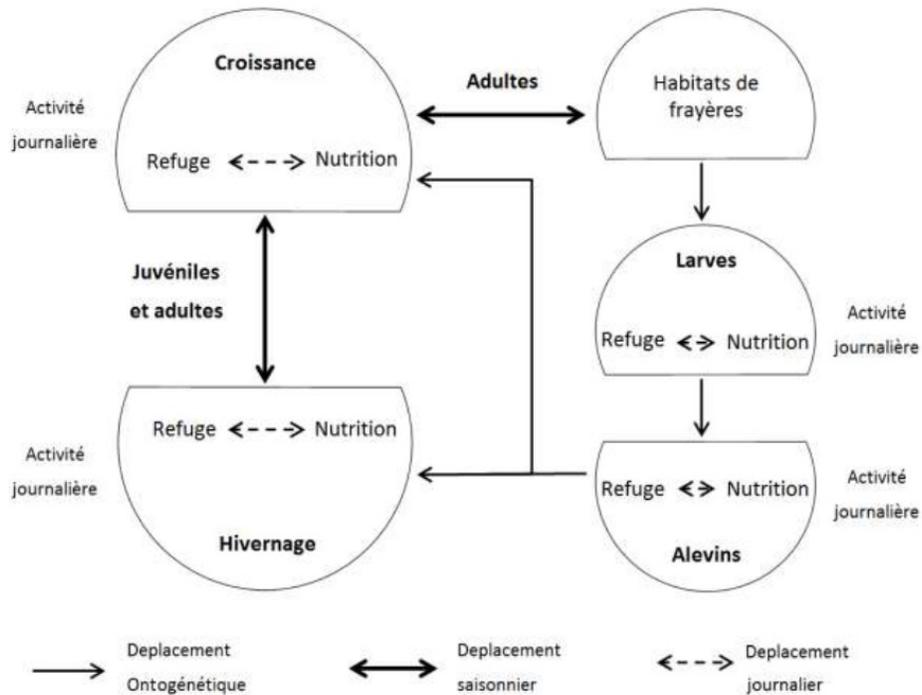


Figure 2.3 : Représentation schématique des principaux mouvements piscicoles nécessaires au déroulement de leur cycle biologique, adapté de Baras (1992).

La conception des ponceaux répond en premier lieu à la nécessité de favoriser un écoulement optimal de l'eau, particulièrement en condition de forts débits, afin de garantir l'intégrité structurelle des voies de transport (Makrakis *et al.*, 2012). La préservation des fonctionnalités morphologiques et biologiques a longtemps été considérée comme un objectif secondaire lors la conception puis l'installation de ces ouvrages (Gibson *et al.*, 2005; Jackson, 2003). Les caractéristiques d'un ponceau sont susceptibles d'entraîner une modification locale des caractéristiques morfo-dynamique d'un cours d'eau (Makrakis *et al.*, 2012) et donc de potentiellement bloquer le passage des poissons. Ce blocage peut entraîner une rupture totale, partielle ou temporaire de la continuité longitudinale des habitats (Frankiewicz *et al.*, 2021). La fragmentation des habitats piscicoles qui en résulte constitue l'une des principales causes du déclin des populations piscicoles, avec des conséquences directes sur la structure, la composition et l'abondance des populations piscicoles (Fuller *et al.*, 2015; MacPherson *et al.*, 2012; Pépino *et al.*, 2012). Le cloisonnement des populations favorise également une perte de

diversité génétique (Pavlova *et al.*, 2017; Van Leeuwen *et al.*, 2018) et une différenciation génétique des populations piscicoles au sein d'un même bassin versant (Nathan *et al.*, 2018; Torterotot *et al.*, 2014). La fragmentation des habitats perturbe par ailleurs les mécanismes de dispersion et de recolonisation, indispensables à la résilience des populations piscicoles face à des épisodes de stress hydrologiques ou thermiques (Adams *et al.*, 2005; Dugdale *et al.*, 2016; Gido *et al.*, 2023).

La fragmentation des habitats par les traverses de cours d'eau diffère selon la nature de l'ouvrage considéré. De par leur conception, les ouvrages à portée libre ou de taille avoisinant la largeur plein-bord du cours d'eau impactent peu le franchissement piscicole (Benton *et al.*, 2008b). Au contraire, des proportions de ponceaux entre 53% des ouvrages nouvellement installés (Gibson *et al.*, 2005) à plus de 90% sur des cours d'eau à forte pente (Poplar-Jeffers *et al.*, 2009) ont été diagnostiquées infranchissables. En ce sens, la conception de ponceaux dits « à simulation de cours d'eau » permet de créer dans l'ouvrage un lit similaire à celui du cours d'eau et dont les conditions de franchissement sont pressenties pour être sensiblement identiques au milieu naturel (Bates *et al.*, 2003; Clarkin *et al.*, 2005; Hotchkiss *et al.*, 2007; Jackson, 2003). La rugosité générée par la présence de substrat (Johnson *et al.*, 2019) ou les ondulations du matériau constitutif (Goerig *et al.*, 2016) favorisent en effet le passage du poisson comparativement aux ouvrages lisses.

2.3 Les mécanismes de franchissement piscicole dans les ponceaux

La relation entre les variables structurelles des ponceaux et les conditions hydrauliques qu'elles entraînent sont à l'origine des principaux blocages pour le passage du poisson, que ce soit à l'approche ou dans l'ouvrage. L'attractivité et la motivation des poissons à entrer dans le ponceau jouent un rôle prédominant dans les mécanismes de franchissement. Il s'agit d'un phénomène comportemental complexe et variable dans le temps, de plus en plus considéré dans les problématiques de franchissement (Goerig *et al.*, 2020). Les variables qui influencent ces comportements sont notamment l'approche de la période de reproduction, le débit, l'espèce, la longueur du poisson, l'heure du jour ou encore le nombre de poissons présents en aval du ponceau (Castro-Santos, 2004; Goerig *et al.*, 2017b). Un ponceau constitue un point fixe dans un milieu dynamique qui entraîne une modification locale des processus morpho dynamique du cours d'eau (Galia *et al.*, 2017). La formation d'une chute en aval de l'ouvrage peut être engendrée par un mauvais calage altimétrique ou par l'accroissement de l'énergie cinétique et donc du potentiel érosif au passage de celui-ci.

Une chute aval peut également constituer un point de blocage majeur pour le franchissement des ponceaux. Au contraire de l'aptitude à nager, peu d'espèces sont en mesure de sauter efficacement pour franchir un obstacle (Figure 2.4a). Bien que cette aptitude soit faiblement documentée, il est communément admis que cette faculté est exploitée par les salmonidés pour le franchissement de chutes verticales (Kondratieff *et al.*, 2006; Mueller *et al.*, 2008). Les performances des autres espèces sont plus limitées et circonscrites à des conditions hydrauliques particulières de type jet de surface (Ficke *et al.*, 2011; Prenosil *et al.*, 2016). La hauteur de la chute, la taille du poisson, la profondeur de la fosse de dissipation, la turbulence dans la fosse de dissipation ou encore la présence d'un ressaut hydraulique sont autant de paramètres qui influencent directement la capacité de saut d'une espèce (Stuart, 1962).

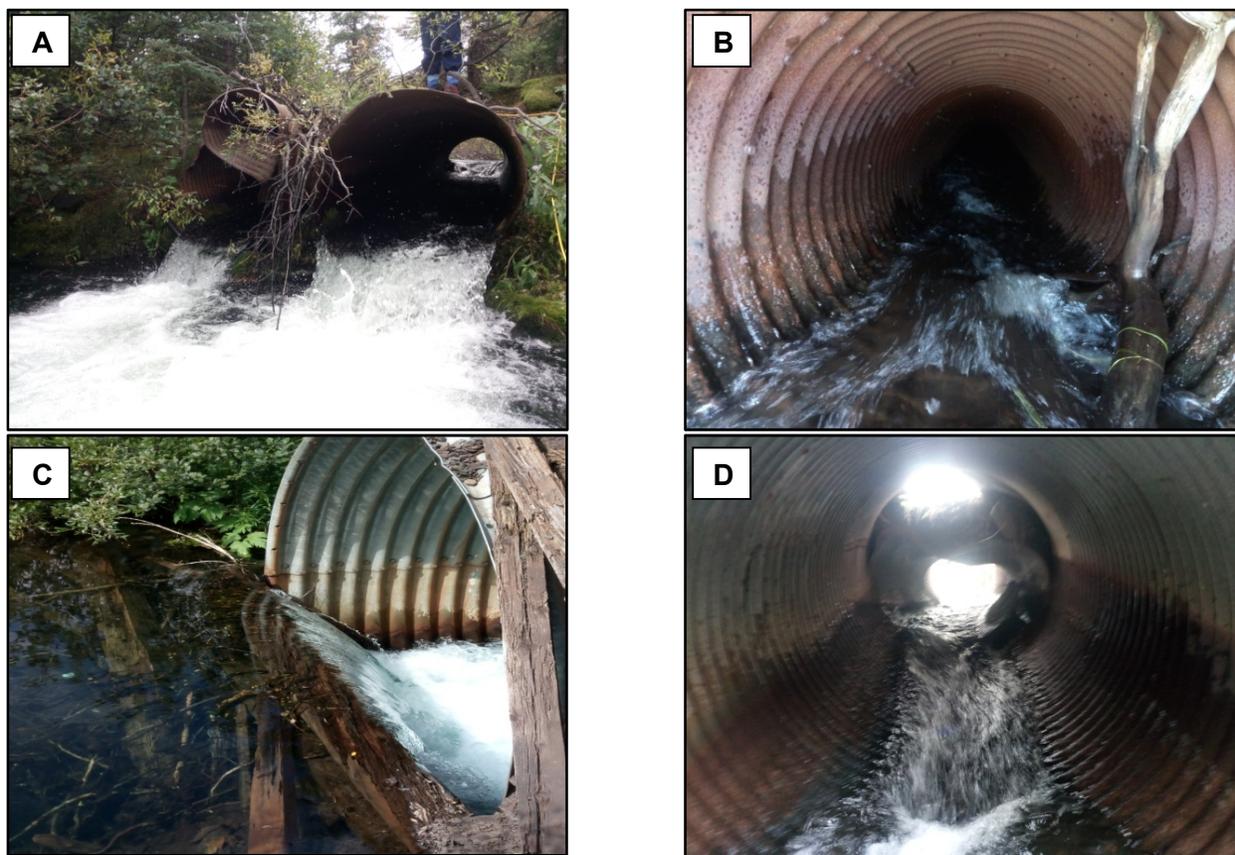


Figure 2.4 : Exemple de ponceaux pénalisants de franchissement piscicole. Formation d'une chute aval (A), vitesses excessives dans la partie amont de l'ouvrage (B), embâcles en amont (C) et tirants d'eau insuffisants suite à une dislocation de l'ouvrage (D).

Au sein de l'ouvrage, l'augmentation locale de pente, la réduction de la largeur d'écoulement plein-bord ou la diminution de la rugosité au passage d'un ponceau sont autant de variables structurelles susceptibles d'entraîner une modification des paramètres morpho-dynamiques des cours d'eau (Makrakis *et al.*, 2012). Celle-ci se traduit du point de vue hydraulique par une

diminution de la lame d'eau, un accroissement et une uniformisation des vitesses d'écoulements (Chow, 1959) qui contrastent avec l'hétérogénéité de l'écoulement dans le lit du cours d'eau (Figure 2.4b et d). La diminution de la lame d'eau peut également apparaître lorsque l'absence de lit d'étiage favorise un étalement de la lame d'eau et exerce un blocage physique en limitant la propulsion lors de l'activité de nage. En excédant les capacités de nage des espèces, la vitesse d'écoulement constitue la principale variable qui limite le franchissement piscicole dans les ponceaux (Goerig *et al.*, 2016; Shiau *et al.*, 2020).

Tous les poissons ne possèdent pas les mêmes performances de nage. Ces aptitudes sont le fruit d'une évolution morphologique et physiologique, directement liée aux biotopes dans lesquels ces espèces évoluent (Baudoin *et al.*, 2014). Outre les variations interspécifiques, les performances au sein d'une même espèce sont affectées par différents facteurs tels que la longueur du poisson (Goerig *et al.*, 2016; Ojanguren *et al.*, 2003; Shiau *et al.*, 2020) ou encore la température de l'eau (Rodgers *et al.*, 2014; Wardle, 1980). Le comportement natatoire des poissons est décrit par le biais de trois catégories de vitesses impliquant chacune une réponse physiologique différente (Beamish, 1978). La **vitesse de croisière** correspond principalement à l'utilisation d'un métabolisme aérobie permettant l'alimentation des fibres rouges des muscles. Dans ces conditions le poisson nage à une vitesse modérée qu'il peut soutenir durant une période importante (> 200 minutes) sans présenter de signes de fatigue. Au contraire, la **vitesse de sprint** implique que l'individu utilise une vitesse avoisinant sa vitesse maximale, propre à ses caractéristiques morphologiques et physiologiques. Cet effort intense est effectué selon un métabolisme anaérobie qui requiert l'utilisation des fibres blanches des muscles. Contrairement à la nage de croisière, le poisson ne peut maintenir sa vitesse de sprint que sur une très courte période inférieure à 15-20 s. Entre ces deux catégories, le poisson adopte une **vitesse de nage soutenue** qui requiert l'utilisation des deux métabolismes (aérobie et anaérobie) afin de mobiliser la contraction des fibres rouges et blanches. Selon la vitesse employée, la nage soutenue peut être maintenue durant une période excédant plusieurs minutes, mais implique à terme l'épuisement de l'individu. L'épuisement est atteint d'autant plus rapidement que la vitesse employée est importante. Les performances de nage sont majoritairement déterminées en laboratoire, à l'aide de protocole d'épuisement à vitesse fixe ou par accroissement de paliers constants. La seconde méthode permet de déterminer notamment la vitesse de nage critique qui constitue une catégorie particulière de la vitesse de nage soutenue (Brett, 1964).

La combinaison des différentes catégories de nage permet de construire des courbes seuils d'épuisement aussi appelées courbes de fatigue, soit la relation entre la vitesse de nage et le temps à l'épuisement (Figure 2.5). L'emploi de ces courbes permet notamment d'estimer le succès de franchissement d'un ponceau au regard de sa longueur ou des vitesses d'écoulement (Castro-Santos, 2004; Katopodis *et al.*, 2016). La distance d'ascension devient alors maximale si le poisson est capable d'optimiser sa vitesse de nage face à une vitesse d'écoulement donnée. De nombreuses espèces échouent toutefois à adopter ce comportement (Castro-Santos *et al.*, 2013).

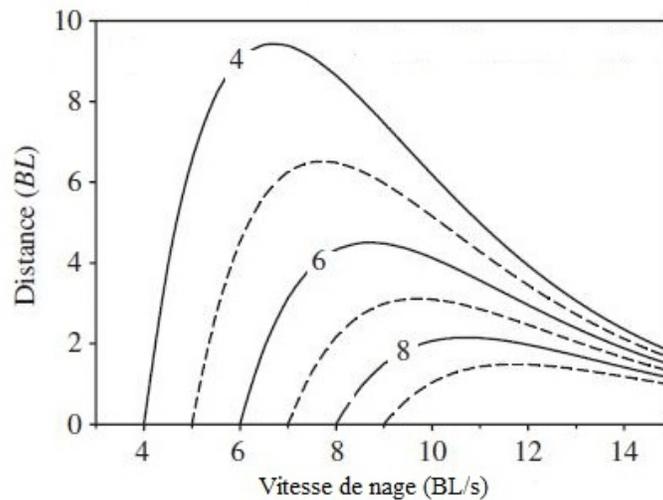


Figure 2.5 : Courbe seuil d'épuisement issu de Castro-Santos (2004). Les distances sont exprimées en longueur de corps du poisson (BL : Body Length) et les vitesses en longueur de corps par seconde (BL.s⁻¹). Les vitesses mentionnées sur les isolignes correspondent à la vitesse de l'écoulement affronté.

Le franchissement dans les ponceaux a été longtemps abordé au regard de la vitesse moyenne de l'écoulement, compte tenu, notamment, de la simplicité à quantifier cette variable hydraulique (Furniss *et al.*, 2006). Toutefois, la condition de « no-slip » aux parois et la viscosité du fluide entraînent la présence de faibles vitesses aux abords des parois et un accroissement des vitesses vers le centre de l'ouvrage (Figure 2.6). La rugosité des matériaux employés influence le gradient d'accroissement des vitesses et la présence d'ondulation favorise la formation de courants secondaires qui modifient la répartition des vitesses entre les différents types de ponceaux (Richmond *et al.*, 2007). La caractérisation de l'hydraulique et du comportement des poissons lors du franchissement a mis en évidence l'utilisation de ces zones de faibles vitesses (ZFV) aux abords des parois comme voie de franchissement privilégiée dans les ponceaux (Goodrich *et al.*, 2018). À ce titre, les ponceaux TTOG favorisent la présence de ZFV exploitables dont l'orientation des enroulements conditionne les voies de franchissement

privilegié (Richmond *et al.*, 2007). De façon similaire, la jonction perpendiculaire des parois dans les ponceaux rectangulaires favorise l'émergence d'une ZFV de taille importante. L'utilisation des ZFV permet aux poissons de réduire les coûts énergétiques liés à l'activité de nage en affrontant une vitesse d'écoulement plus faible (Enders *et al.*, 2005) et d'effectuer des périodes de repos entre les phases de progression (Constantin, 2017).

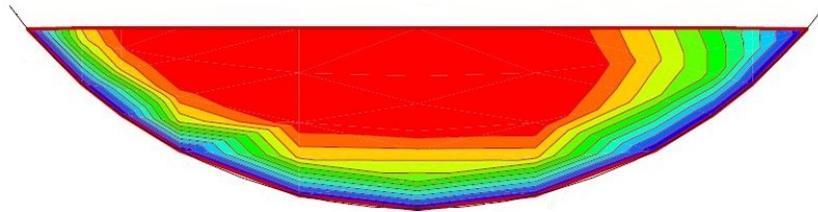


Figure 2.6 : Coupe transversale schématique de la distribution des vitesses d'écoulement dans un ponceau issu de Pearson *et al.* (2005). Les vitesses d'écoulement les plus faibles sont localisées près des parois (bleu) et s'accroissent vers le centre de l'ouvrage (rouge).

Les ponceaux circulaires lisses présentent quant à eux une ZFV de hauteur inférieure à celle des ponceaux TTOG, caractérisée par un gradient de vitesse important (Chanson, 2020). L'incapacité des poissons à exploiter ces ZFV de faibles dimensions peut en partie expliquer le plus faible succès de franchissement des poissons dans les ponceaux lisses par rapport aux ponceaux rugueux (Goerig *et al.*, 2016). L'autre biais associé à l'utilisation des courbes seuils d'épuisement est lié au comportement de nage dans le ponceau. Les poissons semblent en effet adopter un comportement de nage discontinu couplé à une trajectoire non rectiligne, notamment dans les ponceaux TTOG (Constantin, 2017). Malgré des conditions hydrauliques variables, les poissons ont effectué des phases de progression de longueur constante entrecoupées de pauses proches des parois. Dans cette étude, les phases d'arrêt représentent en moyenne 80% du temps passé dans l'ouvrage et leur durée augmente avec la contrainte des conditions hydrauliques. L'importance des phases d'arrêt semble notamment rendue possible par la disponibilité de ZFV exploitables au niveau des ondulations du ponceau.

En parallèle de la vitesse d'écoulement affronté lors du franchissement d'un ponceau, la turbulence constitue également une composante de l'écoulement susceptible de déstabiliser la posture des poissons (Lupandin, 2005) et d'accroître le coût énergétique de la nage (Enders *et al.*, 2003). La turbulence est un phénomène hydraulique complexe qui peut se définir par l'instabilité de l'écoulement, c'est-à-dire la fluctuation des vitesses instantanées dans l'espace, causée par une succession de tourbillons de différentes magnitudes dans l'écoulement. Selon les études, l'impact de la turbulence sur le succès de franchissement est estimé par l'intensité

des turbulences (Équation 2.1) (Goodrich *et al.*, 2018; Watson *et al.*, 2018) ou l'énergie cinétique des turbulences (Équation 2.2) (Duguay *et al.*, 2018; Smith *et al.*, 2005). Ces deux formulations correspondent à la somme des variances des composantes tridimensionnelles de l'écoulement.

Équation 2.1 : Intensité des turbulences.

$$TI [m.s^{-1}] = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)^{0.5}$$

Avec u , v et w correspondant respectivement aux composantes longitudinale, latérale et verticale de l'écoulement. σ [$m.s^{-1}$] correspond à l'écart-type de la vitesse sur la période de mesure.

Équation 2.2 : Énergie cinétique des turbulences.

$$\begin{aligned} TKE [J.m^{-3}] &= \frac{1}{2} * \rho * ((\overline{u'})^2 + (\overline{v'})^2 + (\overline{w'})^2) \\ &= \frac{1}{2} \left(\left(\frac{1}{T} \int_0^T (u(t) - \bar{u})^2 \right) + \left(\frac{1}{T} \int_0^T (v(t) - \bar{v})^2 \right) + \left(\frac{1}{T} \int_0^T (w(t) - \bar{w})^2 \right) \right) \end{aligned}$$

Où u , v et w [$cm.s^{-1}$] représentent respectivement aux composantes longitudinale, latérale et verticale de l'écoulement, u' [$cm.s^{-1}$] : la fluctuation moyenne de l'écoulement, $u(t)$ [$cm.s^{-1}$] : la vitesse instantanée, \bar{u} [$cm.s^{-1}$] : la vitesse moyenne de l'écoulement selon l'axe longitudinal, T [Ø] : le nombre de vitesses moyennes enregistrées et ρ [$g.cm^{-3}$] : la masse volumique de l'eau.

Selon les propriétés de la turbulence, le comportement natatoire adopté par les espèces est extrêmement variable (Ke *et al.*, 2020). Dans les ponceaux, la turbulence peut favoriser l'éjection des petits individus hors des ZFV (Johnson *et al.*, 2012; Richmond *et al.*, 2007) ou limiter leur capacité à les exploiter (Newbold *et al.*, 2015). À ce titre, le niveau de turbulence peut constituer une variable explicative du succès de franchissement dans les ponceaux. La déstabilisation des poissons par la turbulence apparaît principalement liée à l'occurrence de tourbillons larges et peu fréquents (Tritico *et al.*, 2010) dont la taille excède 2/3 de la taille du poisson (Lupandin, 2005). L'orientation et la vitesse des tourbillons semblent également jouer un rôle majeur, puisque les tourbillons horizontaux sont associés à des pertes de stabilité plus fréquente et durable que les tourbillons verticaux (Tritico *et al.*, 2010). Parallèlement, plusieurs espèces ont montré leur capacité à exploiter la turbulence pour maintenir une position stationnaire selon le principe du Kàrman gait (Liao *et al.*, 2003) et ainsi permettre une diminution de leur consommation énergétique (Taguchi *et al.*, 2011). Les poissons semblent par ailleurs sélectionner des zones de l'écoulement avec des faibles valeurs de cisaillement horizontal (Équation 2.3).

Équation 2.3 : Cisaillement horizontal.

$$\tau_{uv} [N \cdot m^{-2}] = -\rho (\overline{u'v'})$$

Où représente ρ [$g \cdot cm^{-3}$] la masse volumique de l'eau et \bar{u} [$cm \cdot s^{-1}$] : la vitesse moyenne de l'écoulement selon l'axe longitudinal.

Enfin, une approximation de la trainée subie par un poisson en position stationnaire (Équation 2.4) a été plus récemment proposée pour caractériser les conditions hydrauliques (Kerr *et al.*, 2016). Cette approche favorise une considération de la contrainte biologique plutôt qu'hydraulique en intégrant dans une seule formulation l'expression de la vitesse moyenne de l'écoulement et les composantes turbulentes.

Équation 2.4 : Approximation de la trainée subie par un poisson en position stationnaire.

$$D [\emptyset] \propto U \sqrt{U^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2} \text{ avec } U [m \cdot s^{-1}] = (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)^{0.5}$$

Où U [$m \cdot s^{-1}$] la vitesse moyenne de l'écoulement et u' [$cm \cdot s^{-1}$] : la fluctuation moyenne de l'écoulement.

2.4 Évaluer la fragmentation des habitats engendrée par les traverses de cours d'eau

L'identification des ouvrages hydrauliques susceptibles d'entraver le passage du poisson constitue un prérequis indispensable à la priorisation et à la restauration des milieux aquatiques. Pour ce faire, diverses méthodes ont été développées afin d'évaluer la franchissabilité des ouvrages en fonction des objectifs et des ressources allouées (Diebel *et al.*, 2015; Januchowski-Hartley *et al.*, 2013; King *et al.*, 2017).

Les méthodes indirectes consistent à quantifier les effets de la fragmentation des habitats par des mesures de présence/absence (Kemp *et al.*, 2010), de richesse ou de densité spécifique aux abords d'un ouvrage hydraulique (Nislow *et al.*, 2011). De nombreux paramètres biotiques et abiotiques peuvent toutefois entraîner la déviation de ces paramètres par rapport à un tronçon de cours d'eau non impacté (MacPherson *et al.*, 2012). Ces méthodes ne sont donc pas spécifiques à l'identification d'une fragmentation des habitats par les ponceaux, mais révèlent plutôt la présence de dysfonctionnements dans le milieu considéré. L'analyse de la structure génétique peut également servir à caractériser la connectivité des populations d'espèces dulçaquicoles à l'échelle de bassins versants (Kemp *et al.*, 2010).

Au contraire, les méthodes directes emploient le principe du marquage/recapture pour caractériser le succès de franchissement dans un ouvrage (Briggs *et al.*, 2013). Cette technique dépend toutefois du succès de recapture et ne permet pas d'identifier spécifiquement les variables qui pénalisent le franchissement dans l'ouvrage (Benton *et al.*, 2008a). Les études qui

utilisent la détection télémétrique ou le suivi des trajectoires par caméra (Castro-Santos, 2005; Constantin, 2017) ont en ce sens permis d'améliorer la compréhension des mécanismes comportementaux et des performances de nage dans les ponceaux (Goerig *et al.*, 2017a). Les méthodes d'évaluation directes sont toutefois difficilement applicables à grande échelle compte tenu des ressources physiques et financières que leur mise en œuvre nécessite (Kemp *et al.*, 2010).

Cette nécessité d'évaluer un nombre important d'ouvrages hydrauliques dans le cadre de ressources limitées a favorisé la création de filtres d'évaluation. Cette approche consiste à comparer les caractéristiques statiques et les conditions hydrauliques de l'ouvrage avec les capacités de nage des espèces ciblées par l'intermédiaire d'un arbre décisionnel. Une classe de franchissabilité est ainsi affectée à l'ouvrage selon les différents critères d'évaluation qui composent l'arbre décisionnel. Plusieurs filtres de diagnostic ont ainsi été développés selon les pays ou les espèces cibles avec toutefois une conception commune (Baudoin *et al.*, 2014; Clarkin *et al.*, 2005; Coffman, 2005; Poplar-Jeffers *et al.*, 2009). Sur le territoire Nord-américain, le logiciel *FishXing* (Furniss *et al.*, 2006) a été largement utilisé dans l'évaluation des ponceaux.

La complexité de l'évaluation du franchissement piscicole dans les ouvrages hydrauliques provient notamment de la variabilité des conditions hydrauliques affrontées par les différentes espèces selon la nature et la période de leurs déplacements. L'acquisition de données hydrauliques dans l'ouvrage peut être mesurée *in situ* lors de différentes visites ou dans le cadre d'une modélisation hydraulique sur la base des données hydrologiques disponibles. Afin de faciliter leur application, certains filtres ont été conçus pour minimiser l'emploi de variables hydrauliques pour l'évaluation du franchissement piscicole (Coffman, 2005; James *et al.*, 2008). La prise en compte de ces variables reste toutefois indispensable dans certaines conditions d'écoulement ou lorsque les ouvrages constituent une barrière partielle (Baudoin *et al.*, 2014; Clarkin *et al.*, 2005; Solà *et al.*, 2011).

L'approche théorique adoptée par les filtres favorise toutefois une importante variabilité des diagnostics avec parfois des résultats antagonistes selon l'outil choisit (Barry *et al.*, 2018; Bourne *et al.*, 2011; Poplar-Jeffers *et al.*, 2009). Dans l'optique de faciliter l'application des protocoles à un grand nombre d'ouvrages, les filtres considèrent que les poissons affrontent la vitesse moyenne de l'écoulement, sans considération de leur capacité à rechercher des zones d'écoulement moins contraignantes. L'approche implique également que les poissons optimisent leur comportement et leur vitesse de nage pour franchir la plus grande distance possible au regard des conditions hydrauliques. Les limites liées à cette approche sont

nombreuses et concernent autant la connaissance des performances de nage que le comportement adopté lors du franchissement des ouvrages. Les dimensions des tunnels de nage utilisés pour le recueil des performances de nage sont susceptibles de limiter les mouvements des poissons et leur aptitude à exploiter les différentes catégories de nage (Castro-Santos *et al.*, 2013; Tudorache *et al.*, 2007). Les poissons sont par ailleurs capables d'exploiter l'hétérogénéité du champ de vitesses dans l'obstacle pour se soustraire aux conditions les plus défavorables. La surestimation du nombre d'ouvrages infranchissables par l'emploi des filtres de diagnostic a été mise en évidence par comparaison avec des mesures directes, notamment lorsque les ponceaux caractérisés sont construits en tôle ondulée galvanisée dits TTOG (Goerig, 2016; Mahlum *et al.*, 2014).

2.5 L'exploitation minière et le risque de fragmentation des habitats piscicoles

Bien que chaque projet soit spécifique, un projet minier se caractérise par une phase de prospection préalable qui vise à définir les caractéristiques du gisement en termes de localisation, de quantité et de qualité du minerai afin d'évaluer le potentiel d'extraction (Figure 2.7). Durant cette phase le promoteur va procéder à des études extensives de terrain, sondages et autres excavations exploratoires qui nécessitent la création de voies de circulation pour l'acheminement du matériel et la réalisation de ces études (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, en ligne a).



Figure 2.7 : Exemple de route de prospection à proximité de la mine Gagnon 1 en vue aérienne (source Bing Satellite). La flèche indique l'une des nombreuses tranchées pour la réalisation de sondage visibles dans le secteur d'étude. Les lignes pointillées représentent les routes de prospection.

Si les gisements décelés en phase d'exploration sont valorisables du point de vue technique et économique, le développement de la mine à proprement parler peut débuter. La construction d'un réseau de transport terrestre est alors indispensable pour l'acheminement du matériel nécessaire à l'installation et au fonctionnement de la mine, ainsi que pour le transport des minerais. Ce dernier est généralement emprisonné sous une couche de sol ou de roche non valorisable. L'atteinte du minerai peut s'effectuer à ciel ouvert comme c'est le cas à Schefferville (Figure 2.8) ou via une exploitation souterraine. La première méthode consiste à entièrement décaper et évacuer la couche non valorisable pour atteindre le minerai tandis que l'exploitation souterraine permet d'accéder sous cette couche par l'intermédiaire de tunnels.



Figure 2.8 : Lac puit de mine à l'emplacement de l'ancienne mine à ciel ouvert de Burnt Creek.

L'étude de la fragmentation des habitats piscicoles par les ponceaux a principalement été étudiée sur les autoroutes (Gibson *et al.*, 2005; Price *et al.*, 2010), les chemins forestiers (Poplar-Jeffers *et al.*, 2009; Warren Jr *et al.*, 1998) ou agricoles (Briggs *et al.*, 2013). Au contraire, les informations relatives à la fragmentation des habitats piscicoles par les infrastructures minières sont extrêmement disparates notamment en contexte nordique. Le déroulement des activités minières requiert pourtant un réseau étendu d'infrastructure de transport et donc de traversées de cours d'eau, notamment lorsqu'elles sont établies sur des territoires peu développés (Kimberling, 2005). La problématique de la fragmentation des habitats piscicoles en contexte minier apparaît semblable à celle rencontrée sur les autres réseaux de transport, notamment au regard d'une mauvaise prise en considération des conséquences de la mise en œuvre de ponceaux et l'absence d'entretien à l'issue de l'exploitation (Azevedo-Santos *et al.*, 2021). En comparaison avec l'exploitation forestière, le

tonnage plus important des véhicules utilisés pour l'exploitation minière entraîne des contraintes de conception supérieure pour éviter l'usure prématurée des infrastructures de transport. La conception plus robuste des ponceaux dans les mines peut à ce titre limiter l'apparition de désordres structurels sévères en comparaison avec les infrastructures présentes sur d'autres industries (Kravitz *et al.*, 2019).

Sur le territoire québécois, l'activité minière est encadrée par la *Loi sur les mines* et le règlement sur les substances minérales autres que le pétrole, le gaz naturel et la saumure (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, En ligne a). Ils précisent notamment les modalités d'accès aux titres miniers d'exploration puis au bail minier ou au bail d'exploitation. Du point de vue environnemental, le développement de nouvelles mines requiert l'analyse d'une étude d'impact sur l'environnement qui est examinée par le Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs. Un plan de réaménagement et de restauration des sites doit également être déposé par le promoteur avant délivrance d'un des deux baux.

Quoi qu'il en soit les prescriptions relatives au passage du poisson sont encadrées par la *Loi sur la qualité de l'Environnement* (LQE) du Règlement sur l'encadrement d'activité en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE).

3 OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif de la présente étude est de qualifier et de quantifier l'impact des traverses de cours d'eau liées à l'exploitation minière sur la fragmentation des habitats piscicoles. Pour se faire, les objectifs suivants seront développés :

- 1) Synthétiser les différentes méthodologies permettant de caractériser l'impact d'un ouvrage hydraulique sur les mouvements piscicoles et définir un protocole adapté aux ressources et aux objectifs de l'étude.
- 2) Identifier les caractéristiques structurelles des ponceaux au regard des différents réseaux de transport miniers.
- 3) Évaluer l'impact des ponceaux sur le franchissement des poissons et identifier les variables pénalisantes.
- 4) Quantifier la fragmentation des habitats piscicoles entraînée par les réseaux routiers et ferroviaires sur le secteur d'étude.

D'après la bibliographie consultée, il s'agirait de la première étude de recherche s'intéressant spécifiquement à l'impact des ponceaux miniers sur la fragmentation des habitats. Elle constitue une étape préliminaire indispensable à l'évolution des règlements en vigueur ainsi qu'à la mise en œuvre de mesures correctives telles que la suppression d'ouvrages ou la création de dispositifs favorables au franchissement piscicole (Bates *et al.*, 2003; Larinier, 2002; Pêches et Océans Canada, 2016).

4 MÉTHODOLOGIE

4.1 Historique de la région et site d'étude

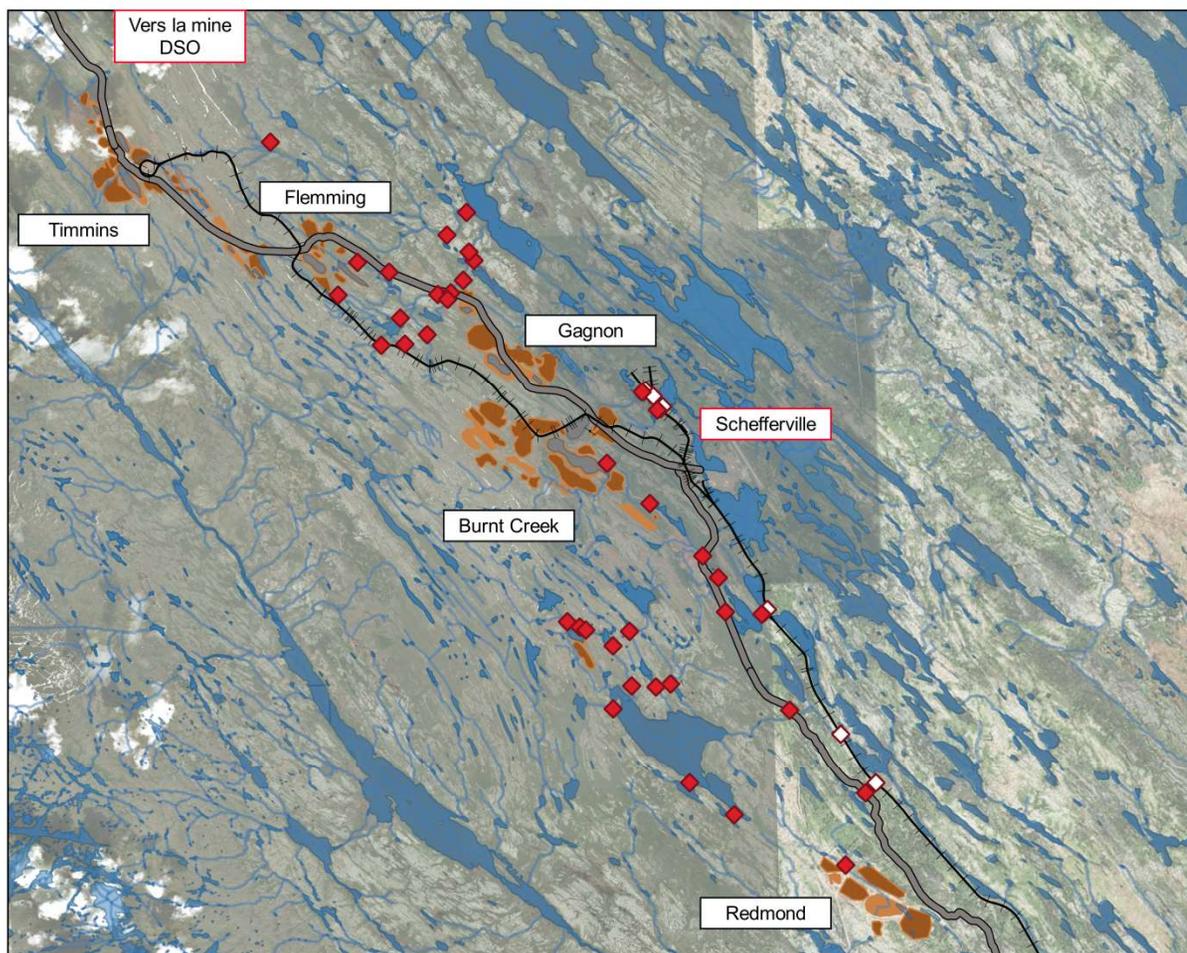
Située à proximité de la frontière provinciale avec le Labrador, la ville de Schefferville est localisée dans la province de Québec, région administrative de la Côte-Nord. La région constitue une partie du territoire des peuples premières nations Innue Matimekush – Lac John et Naskapi de Kawawachikamach, dont les communautés sont aujourd'hui établies à Schefferville et à quelques kilomètres au nord de la ville.

Le potentiel d'extraction du minerai de fer à ciel ouvert dans la région a été identifié dans les années 1945-1949. Cette découverte a conduit à la construction de la ville, des installations minières et de la voie de chemin de fer reliant Schefferville à Sept-Iles entre les années 1950 à 1954. Plusieurs compagnies minières se sont succédé sur le territoire. L'exploitation minière a initialement été réalisée par la société Iron Ore Corporation of Canada (IOC) jusqu'à son arrêt et la fermeture des mines de Schefferville en 1982 (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, En ligne b). Par la suite, le minerai de fer a été exploité par la firme Schefferville Mines Holding jusqu'en 2014, et TATA Steel Minerals. Depuis 2018, TATA Steel Minerals constitue la dernière exploitation minière en activité par l'intermédiaire de son site à enfournement direct (DSO). L'ensemble des compagnies préalablement citées possède toujours des titres miniers d'exploration actifs de part et d'autre de la frontière provinciale (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, en ligne c).

Le diagnostic des ponceaux sur le terrain a été réalisé du 18 au 25 août 2022, sur le réseau de transport des anciennes mines d'IOC et Schefferville Mines Holding. Parmi les infrastructures diagnostiquées, une partie est toujours utilisée pour l'accès à mine de TATA Steel Minerals ou le transport du minerai. Il s'agit de la route principale entre Schefferville et la mine de Flemming ainsi que de la voie ferrée active entre la mine Flemming et le point d'interconnexion avec le réseau exploité par Transport Ferroviaire Tshiuéti au sud de Schefferville (Figure 4.1). Cette portion de voie ferrée qui permet l'acheminement du minerai appartient à TATA Steel Minerals, mais est exploitée par Genesee & Wyoming Inc.

Pour des raisons d'autorisation d'accès et de sécurité, l'accès aux mines en activité de TATA Steel et à la portion de voie ferrée principale exploitée par la compagnie Transport Ferroviaire Tshiuéti n'a pu être obtenu et aucun diagnostic n'a été réalisé sur ses sites.

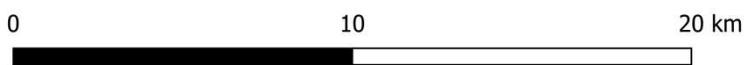
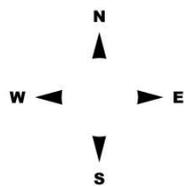
Le réseau routier des anciennes mines est aujourd'hui principalement utilisé par les communautés pour l'accès au territoire. Le réseau principal et d'exploitation est carrossable tandis que le réseau de prospection est majoritairement utilisé en véhicule tout terrain par les communautés autochtones pour l'accès aux territoires de pêche et de chasse.



Localisation du territoire d'étude

Légende

- ◆ Traverses diagnostiquées
- ◇ Traverses non diagnostiquées
- - - Frontière provinciale
- Réseau de transport principal**
- Route principale
- Route de contournement
- ++ Chemmin de fer actif
- Réseau hydrographique**
- Cours d'eau
- Lac
- Exploitation minière inactive**
- Fosse
- Halde de stérile



Sources : RHN, BDTQ, Google satellite

Projection : NAD83 / UTM zone 19N

Figure 4.1 : Carte de localisation du territoire d'étude. Les encadrés noirs indiquent le nom des anciennes mines exploitées par IOC et Schefferville Mine Holding. La mine DSO encore exploitée par TATA Steel est située au nord-ouest, hors de l'emprise de la carte.

4.2 Identification et sélection des traverses de cours d'eau

La localisation des traverses de cours d'eau présentes sur le territoire d'étude a été effectuée par SIG (QGIS, version 3.16). La présence d'une traverse est définie au point de recoupement entre les couches du réseau hydrographique national (RHN) et du réseau de transport (BDTQ). Cette étape est suivie d'une validation par photo-interprétation (Google satellite 2023 et Bing satellite 2023) afin de supprimer les doublons ou ajouter les éventuelles traverses manquantes liées aux erreurs de tracés du réseau.

Une première sélection est ensuite effectuée afin de ne conserver que les traverses qui possèdent une surface drainée supérieure à 3 km². D'après la littérature, ce seuil permet d'assurer la présence de populations piscicoles pérennes dans le réseau hydrographique (McCleary *et al.*, 2008; McCormick *et al.*, 2001; Petty *et al.*, 2005). La surface drainée est calculée à partir du modèle digital de surface ALOS World 3D (Japan Aerospace Exploration Agency, 2021) qui constitue le produit disponible avec la meilleure résolution spatiale pour ce territoire. Selon la localisation des différentes tuiles, les pixels du modèle digital de surface présentent une largeur de 23 m ou 30 m de côté. Ce produit n'est toutefois pas optimisé pour les applications hydrologiques. Une opération matricielle de brûlage du modèle est donc nécessaire pour en assurer la concordance avec les tracés d'écoulements.

Pour les traverses potentielles dont la surface drainée est inférieure à 3 km², une seconde sélection est effectuée sur la base des résultats de pêches électriques réalisées entre 2009 et 2013 par la firme *Hémisphère* (Communication personnelle, octobre 2019). Les ponceaux positionnés sur des cours d'eau où la présence de populations piscicoles est avérée ont également été sélectionnés pour la réalisation du diagnostic.

La présence des traverses de cours d'eau localisée sur SIG a été confirmée directement sur le terrain. Les traverses de cours d'eau ont été réparties dans quatre catégories qui répondent aux définitions suivantes :

- Ponceaux simple ou multiple ;
- Ouvrage mixte : combinaison d'un ouvrage à portée libre et d'un ponceau ;
- Passage à gué : La traversée est effectuée directement dans le lit mineur du cours d'eau. Les berges sont généralement talutées pour faciliter la descente des véhicules dans le lit et aucune différenciation granulométrique n'est observée entre le substrat au droit de la traverse et dans le cours d'eau ;

- Surverse sur route : Dépôt de remblais directement dans le lit mineur d'un cours d'eau sans installation d'ouvrage spécifique pour permettre l'écoulement du cours d'eau sous le revêtement de la voirie. Cette installation entraîne une différenciation de la granulométrie du lit mineur au droit de la traverse ainsi qu'un effet de retenue en amont jusqu'à la formation d'un écoulement en surface du revêtement.

4.3 Mesures de terrain

Le diagnostic des ponceaux sur le terrain a été réalisé du 18 au 25 août 2022. La localisation des ouvrages et le remplissage de la base de données sur le terrain sont effectués sur cellulaire à l'aide de l'application QField (OPENGIS.ch, version 2.6.3). Le type de traverse de cours d'eau, la nature et largeur du réseau de transport ainsi que la largeur moyenne du cours d'eau sont renseignés pour l'ensemble des sites diagnostiqués.

Lorsque la traverse de cours d'eau est un ponceau, les variables structurelles et hydrauliques de l'ouvrage sont renseignées (Figure 4.2) :

- La **nature**, la **localisation** et la **gravité des défauts structurels** selon les catégories présentées dans la section 4.4 État structurel des ponceaux ;
- La **configuration des extrémités** du ponceau selon les catégories suivantes : projetée, biseautée, pièce d'extrémité biseautée en béton ou mur de tête ;
- Le **matériau** de l'ouvrage selon les catégories suivantes : PVC, PEHD, béton ou tôle ondulée;
- La **longueur d'onde et la hauteur** des ondulations si présentes ;
- La **longueur** du ponceau ;
- Le **diamètre** du ponceau ;
- **L'élévation du radier et du niveau d'eau aux extrémités aval et amont** du ponceau;
- Le **tirant d'eau minimum** dans le ponceau, mesuré au centre de la section d'écoulement de l'ouvrage à l'aide d'une règle graduée ;
- Le **pourcentage de recouvrement en substrat** sur la longueur du ponceau ;

Les caractéristiques morphologiques additionnelles du site sont également renseignées :

- **L'élévation du lit et de la ligne d'eau au droit de la section de contrôle** en aval du ponceau ;
- **L'élévation du lit et de la ligne d'eau au droit de la fosse de dissipation** au pied du ponceau. Les mesures sont effectuées entre 0,5 à 1 m du point d'impact du jet dans la fosse de dissipation ;
- **L'élévation du lit et de la ligne d'eau en amont**, mesurés entre 0,5 à 1 m de l'extrémité du ponceau ;

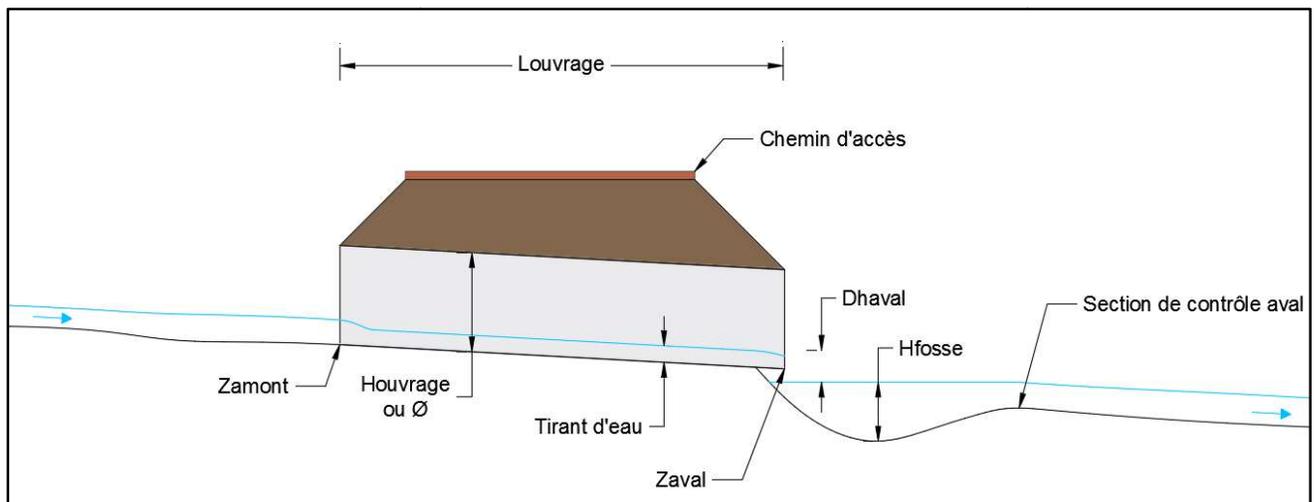


Figure 4.2 : Schéma type des variables statiques et dynamiques mesurées sur un ponceau. Où Zamont représente la côte altimétrique à l'amont de l'ouvrage, Zaval la côte altimétrique à l'aval de l'ouvrage et Dhaval la hauteur de chute aval.

Les mesures d'élévation sont réalisées dans un repère local à l'aide d'un altimètre (ZIPLEVEL Pro-2000, Technidea Corporation), tandis que les mesures de distance sont prises à l'aide d'un mètre ruban ou d'un télémètre laser. Un reportage photographique détaillé de l'ouvrage et du cours d'eau hors des zones d'influence amont et aval complète le diagnostic.

La **pente**, la **profondeur de fosse** (Hfosse), la **hauteur de chute aval** (Dhaval) ainsi que le pourcentage d'enneigement sur la longueur du ponceau sont calculés à posteriori à l'aide des variables précédemment présentées.

Une seule station hydrométrique active est recensée à proximité du territoire d'étude. Il s'agit de la station Ruisseau Joan en aval du lac Joan – Id 03OB009, qui présente une très faible chronique de données enregistrée (2019, 2022 et 2023 en cours). L'influence des glaces sur la station ne permet d'extraire les débits moyens mensuels en eau libre que pour les mois de juin

à novembre (Figure 4.3). Compte tenu de la courte période d'échantillonnage, la chronique présente une forte disparité interannuelle notamment à la suite de la débâcle des glaces, qui ne permet pas de souligner de réelle tendance annuelle des débits. Par comparaison, l'année 2019 se caractérise par des débits élevés durant toute la période estivale tandis que le début de l'année 2023 est marqué par des étiages sévères dès le mois de juin. Durant la campagne de terrain de la fin août 2022, les débits relevés à la station étaient compris entre $0.053 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $0.082 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Bien qu'inférieurs au débit moyen sur mesuré les trois années disponibles, ces débits moyens journaliers ne constituent pas des valeurs extrêmes pour le mois d'août, notamment pour l'année années 2022 ($0.085 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \pm 0.019$).

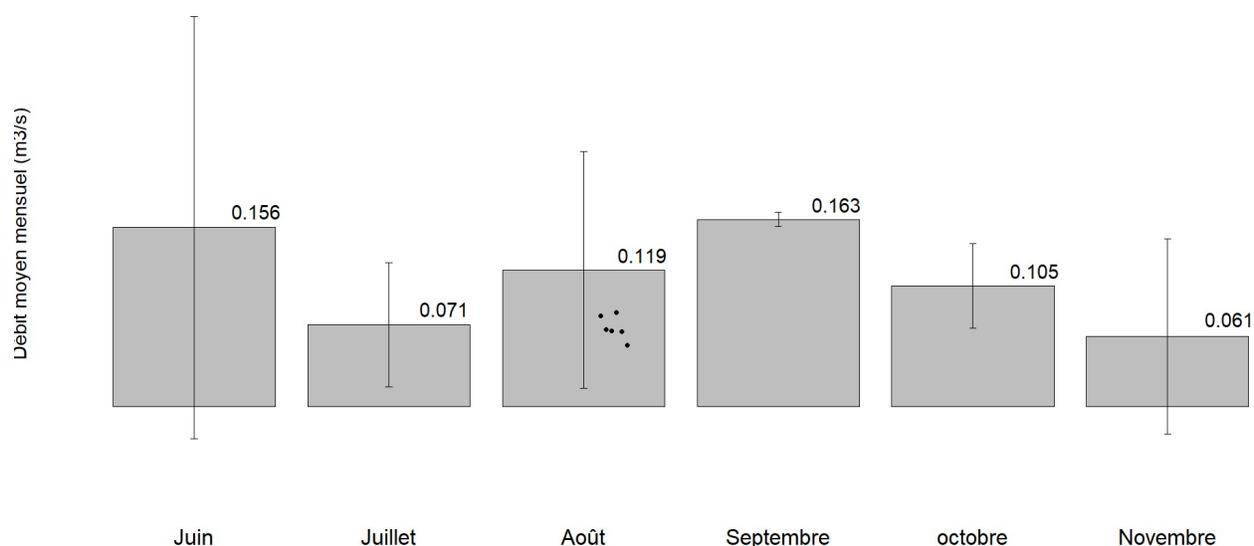


Figure 4.3 : Débit moyen mensuel interannuel ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) en période d'eau libre à la station hydrométrique 03OB009. Les nombres au dessus des histogrammes représentent la valeur moyenne du débit mensuel interannuel, les barres associées aux histogrammes représentent l'écart-type associé à la moyenne du débit mensuel interannuel et les points représentent le débit journalier lors des relevés de terrain.

Le débit dans les ponceaux est calculé à partir de la moyenne journalière enregistrée à la station hydrométrique par l'intermédiaire d'une loi ratio de bassin versant (Équation 4.1). Bien qu'aucune validation à partir de mesures in situ n'ait été réalisée, cette approche est retenue compte tenu du caractère non influencé des débits sur les différents bassins versants, de leur proximité géographique, et de l'absence de variation majeure dans l'occupation du sol. Une valeur de 1 est retenue par défaut pour l'exposant régional (World Meteorological Organization, 2008).

Équation 4.1 : Formule du ratio de bassin versant.

$$Q_{ouvrage} = \left(\frac{A_{ouvrage}}{A_{station}}\right)^a * Q_{station}$$

Où $Q_{ouvrage}$ correspond au débit calculé au droit de l'ouvrage, $Q_{station}$ au débit mesuré à la station hydrométrique [$m^3 \cdot s^{-1}$]. $A_{ouvrage}$ à l'aire drainée au droit de l'ouvrage [km^2], $A_{station}$ à l'aire drainée au droit de la station hydrométrique [km^2] et a l'exposant régional.

La vitesse moyenne dans l'ouvrage est quant à elle modélisée à posteriori à l'aide du module hydraulique du logiciel *FishXing* (Furniss *et al.*, 2006). Les valeurs des coefficients de rugosité des ponceaux et du substrat sont sélectionnées en concordance entre les valeurs du logiciel et les caractéristiques relevées sur le site. Cette approche permet une modélisation des conditions hydrauliques sans considération de la présence éventuelle d'embâcles.

4.4 État structurel des ponceaux

La caractérisation structurelle des ponceaux a été effectuée selon le Manuel d'inspection des Ponceaux (Direction des normes et des documents d'ingénierie du ministère des Transports du Québec, 2019) en considérant six catégories de défauts: déformation de la structure, dislocation de la structure, présence d'embâcles, minage sous l'ouvrage, corrosion de la structure et présence d'écoulement sous-jacent.

Les défauts sont ensuite évalués selon cinq classes de gravité croissante : défaut négligeable, léger, significatif, important, très important. Seuls les ouvrages qui présentent une classe de gravité significative ou supérieure sont retenus pour l'analyse des données.

4.5 Sélection du filtre décisionnel pour le diagnostic des ponceaux

4.5.1 Principe de l'évaluation

La caractérisation du franchissement piscicole dans les ponceaux est réalisée par l'intermédiaire du filtre adapté de Baudoin *et al.* (2014) (Figure 4.4). Initialement développé pour une utilisation sur le territoire français, ce filtre favorise l'identification des variables structurelles ou hydrauliques susceptibles de pénaliser le franchissement piscicole. Par ailleurs, les valeurs seuils utilisées pour chaque variable sont explicitées de sorte qu'il est possible de transposer son application aux espèces présentes sur le territoire nord-américain.

L'impact de l'ouvrage au regard du franchissement piscicole est défini selon un indice de continuité écologique (ICE) :

- **Classe ICE = 0** Barrière infranchissable pour les individus étudiés en condition hydrologique normale ;
- **Classe ICE = 0,33** Barrière à impact majeur. Pénalise les migrations durant une période importante de l'année et/ou une grande partie de la population ;
- **Classe ICE = 0,66** Barrière à impact significatif. Le franchissement de l'ouvrage est possible, mais sa présence impacte les migrations dans certaines conditions hydrologiques et pour une partie de la population ;
- **Classe ICE = 1** Barrière franchissable.

À l'échelle d'un ouvrage, un indice ICE est donc calculé pour chaque groupe d'espèce cible ou classe de taille sélectionnée. Ainsi, si les performances de nage des plus petits individus de la classe de taille sont supérieures à la valeur seuil de la variable, un indice ICE=1 est appliqué à celle-ci. Dans le cas extrême où les performances de nage des plus grands individus de la classe de taille ne seraient pas suffisantes, une classe ICE=0 est appliquée à la variable. Les indices intermédiaires sont obtenus en considérant la longueur moyenne de la classe de taille.

Lorsque l'ouvrage présente une chute aval, l'indice ICE est dans un premier temps calculé séparément pour la chute aval (ICE chute) et à l'intérieur de l'ouvrage (ICE ouvrage). L'indice ICE global est obtenu en confrontant les indices obtenus pour la chute et l'ouvrage selon la matrice de notation suivante (Tableau 4.1). Une dégradation de l'indice ICE de l'ouvrage dans son intégralité est ainsi préconisée afin d'intégrer le cumul des impacts sur le franchissement piscicole, d'abord au niveau de la chute aval puis au sein de l'ouvrage (Baudoin *et al.* 2014).

Tableau 4.1 : Matrice de notation d'un ouvrage avec chute aval.

Classe ICE ouvrage	Classe ICE chute aval			
	0	0,33	0,66	1
0	0	0	0	0
0,33	0	0	0,33	0,33
0,66	0	0,33	0,33	0,66
1	0	0,33	0,66	1

Dans le cas d'ouvrages multiples, chaque ouvrage est analysé individuellement tout en quantifiant la répartition des débits. La franchissabilité d'un site correspond alors à l'indice ICE obtenu par l'ouvrage qui présente le débit d'attrait le plus important (Bunt *et al.*, 2016).

4.5.2 Présence de défauts

La présence de défauts tels que les embâcles ou un écoulement sous-jacent sur tout ou partie de la longueur du ponceau peut empêcher physiquement le passage du poisson. L'impact des défauts sur le passage du poisson est pris en compte dans une seconde analyse afin de discriminer les ouvrages rendus infranchissables par cette problématique. De ce fait chaque ouvrage présente deux indices ICE : le premier correspond à l'application du filtre sur les paramètres hydrauliques simulés et un second qui intègre cette fois l'impact de l'absence d'entretien.

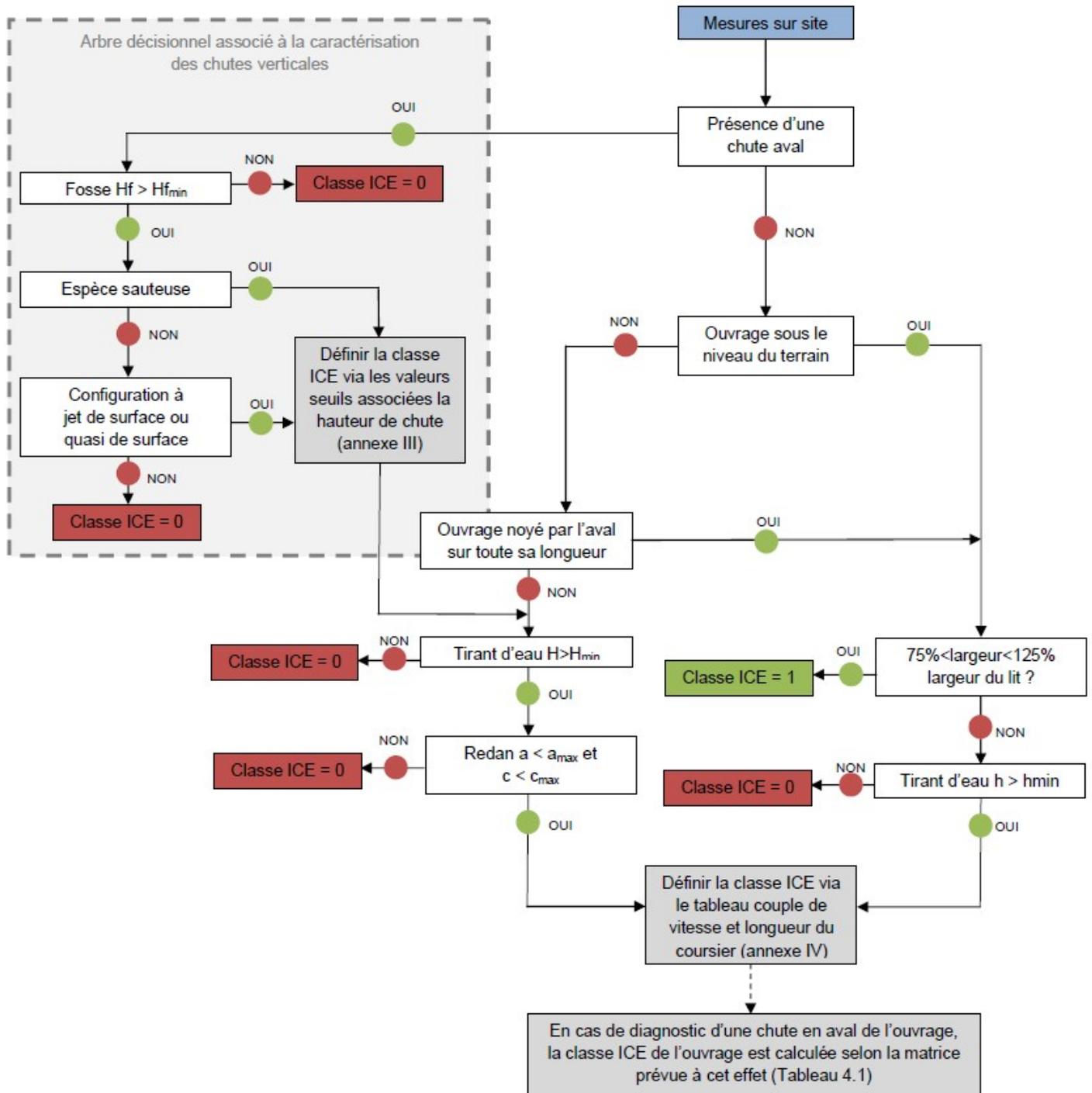


Figure 4.4 : Arbre décisionnel pour l'évaluation du franchissement piscicole des ponceaux (adapté de Baudoin et al. 2014).

4.6 Valeurs seuils

4.6.1 Profondeur de la fosse d'appel

Une dissipation suffisante de l'énergie en pied de la chute est nécessaire afin de permettre aux poissons de s'orienter et de s'engager dans celle-ci. Une formulation de la profondeur minimale de la fosse aval est en ce sens proposée par Baudoin *et al.* (2014) (Équation 4.2).

Équation 4.2 : Profondeur de fosse minimale pour la prise d'appel selon Baudoin *et al.* (2014).

$$Hf_{min} \approx \sqrt{DH * \sin \alpha}$$

$$Hf_{min} \approx \sqrt{DH}$$

Où Hf_{min} [m] représente la profondeur de la fosse de dissipation minimale pour permettre la prise d'appel, Dh [m] la hauteur de chute et α [degré d'angle] l'angle d'incidence du jet.

Il s'agit d'une simplification de la profondeur d'affouillement engendrée par l'impact d'un jet, qui facilite l'application du protocole en éliminant les considérations de débit unitaire (Équation 4.3).

Équation 4.3 : Profondeur d'affouillement (Fahlbusch, 1994; Veronese, 1937).

$$Hf = 1,88 * q^{0,5} * DH^{0,25} * (\sin \alpha)^{0,5}$$

$$Hf_{max} = 1,88 * q^{0,5} * DH^{0,25} \text{ pour une chute verticale}$$

Où Hf [m] représente la profondeur de la fosse de dissipation en pied du jet, q [$m^3.s^{-1}$] le débit unitaire du jet, Dh [m] la hauteur de chute et α [degré d'angle] l'angle d'incidence du jet.

Les profondeurs minimales de fosse de dissipation retenues pour le diagnostic sont présentées en Annexe I.

4.6.2 Tirant d'eau minimum

Au sein de l'ouvrage, une hauteur d'eau minimum est nécessaire pour permettre au poisson d'assurer pleinement sa propulsion lors des ondulations du corps et de la nageoire caudale (Équation 4.4). Le tirant d'eau minimum nécessaire varie donc suivant la morphologie des espèces cibles.

Équation 4.4 : Tirant d'eau minimum selon Baudoin *et al.* (2014).

$$h_{min} = 1,5 * h_p$$

Où h_{min} [m] représente le tirant d'eau minimum dans l'ouvrage hydraulique et h_p [m] la hauteur moyenne des poissons dans la classe de taille concernée.

Les valeurs de tirant d'eau retenues sont déterminées par correspondance avec les valeurs proposées par Baudoin *et al.* (2014) en considérant les familles qui constituent les différents groupes ICE. Les valeurs de tirants d'eau minimums retenus sont présentées en Annexe II.

4.6.3 Chute maximale franchissable

Cas des espèces non sauteuses :

Le franchissement des chutes aval pour les espèces dépourvues de capacités de saut dépend de la possibilité de ces espèces à nager dans le jet formé au droit de la chute (Baudoin *et al.*, 2014). Pour que ce comportement puisse être adopté, la chute aval doit présenter une configuration de jet de surface (Équation 4.5) ou quasi de surface (Équation 4.6).

Équation 4.5 : Condition hydraulique permettant de former un jet de surface (Baudoin *et al.*, 2014).

$$h \geq 2Dh$$

Où h [m] représente le tirant d'eau dans l'ouvrage hydraulique avant la chute et Dh [m] la hauteur de chute.

Équation 4.6 : Condition hydraulique permettant de former un jet quasi de surface (Baudoin *et al.*, 2014).

$$Dh \leq h \leq 2Dh$$

Où H_{eau} [m] représente le tirant d'eau dans l'ouvrage hydraulique avant la chute et Dh [m] la hauteur de chute.

La vitesse d'écoulement dans la chute doit de ce fait rester compatible avec les performances de nage en mode sprint de l'espèce cible (Équation 4.7). À ce titre, la hauteur maximale de chute franchissable par les espèces non sauteuses est assimilée à l'énergie cinétique de l'écoulement dans la chute.

Équation 4.7 : Équation de la hauteur maximale de chute franchissable par une espèce de poisson non sauteuse (Baudoin *et al.*, 2014).

$$Dh \leq \frac{U_{\text{max}}^2}{2g}$$

Où Dh [m] représente la hauteur de chute, U_{max} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] la vitesse de sprint de l'espèce considérée et g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] l'accélération gravitationnelle.

Cas des espèces sauteuses :

Au contraire, les chutes à jet plongeant sont franchissables uniquement par les espèces capables d'effectuer des sauts hors de l'eau. Ce comportement est principalement effectué par les salmonidés, même si certaines espèces de cyprinidés d'eau vive peuvent adopter ce comportement de façon anecdotique. La formulation de la hauteur maximale de saut d'un poisson est assimilée à la trajectoire parabolique d'un projectile (Équation 4.8) depuis un point

initial de coordonnées ($x_0 = 0, y_0 = 0$) et avec une vitesse initiale U_{max} de composante (U_x, U_y). Les frottements de l'air sont négligés et la seule force qui s'applique sur le poisson pendant le saut est la gravité. Selon les travaux réalisés sur les aptitudes de saut chez plusieurs espèces de salmonidés, l'angle d'incidence de saut la plus fréquente est d'environ 60 degrés d'angle (Lauritzen *et al.*, 2005; Lauritzen *et al.*, 2010). Cette valeur est retenue pour le calcul des valeurs seuils de chutes franchissables.

Équation 4.8 : Équation de la trajectoire parabolique d'un projectile adaptée à la trajectoire d'un poisson lors d'un saut selon Baudoin *et al.* (2014).

$$ax = 0 \text{ et } ay = -g$$

$$\int_0^t ax = Ux = C1 \text{ et } \int_0^t ay = Uy = -gt + C2$$

$C1$ et $C2$ sont déterminées à partir des conditions initiales du problème à savoir qu'à $t = 0$

$$Ux = C1 \text{ et } Uy = C2$$

En considérant les composantes de la vitesse initiale U_{max} selon l'angle duquel le poisson sort de l'eau

$$C1 = Ux = U_{max} * \cos \beta \text{ et } C2 = Uy = U_{max} * \sin \beta$$

$$Ux = U_{max} * \cos \beta \text{ et } Uy = -gt + (U_{max} * \sin \beta)$$

La position du poisson au cours du temps est donc définie selon :

$$\int_0^t Ux = X(t) = (U_{max} * \cos \beta) * t + cst \quad \int_0^t Uy = Y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + (U_{max} * \sin \beta) * t + cst$$

$$\text{Avec } X(t = 0) = 0 \text{ et } Y(t = 0) = 0$$

$$(1) X(t) = (U_{max} * \cos \beta) * t$$

$$(2) Y(t) = (U_{max} * \sin \beta) * t - (0.5 * g * t^2)$$

$$\text{La hauteur maximale de saut est atteinte pour : (1) } t = \frac{X(t)}{U_{max} * \cos \beta}$$

En remplaçant (1) dans (2) :

$$(2) Y(t) = (U_{max} * \sin \beta) t - (0.5 * g * t^2)$$

$$= (U_{max} * \sin \beta) * \frac{X(t)}{U_{max} * \cos \beta} - (0.5 * g * (\frac{X(t)}{U_{max} * \cos \beta})^2)$$

$$(3) Y(X) = (\tan \beta * X(t)) - \frac{0.5 * g * X(t)}{(U_{max} * \cos \beta)^2}$$

La hauteur maximale de saut est atteinte lorsque $\frac{dY(X)}{dX} = 0$. Pour rappel $\tan \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta}$

$$\frac{dY(X)}{dX} = \tan \beta - \frac{g * X_{max}}{(U_{max} * \cos \beta)^2} = 0$$

$$(4) X_{max} = \frac{U_{max}^2 * \sin \beta * \cos \beta}{g}$$

En remplaçant (4) dans (3) :

$$Y_{max} = (\tan \beta * X_{max}) - \frac{0.5 * g * X_{max}}{(U_{max} * \cos \beta)^2}$$

$$Y_{max} = \left(\frac{\sin \beta}{\cos \beta} * \left(\frac{U_{max}^2 * \sin \beta * \cos \beta}{g} \right) \right) - \frac{0.5 * g * \left(\frac{U_{max}^2 * \sin \beta * \cos \beta}{g} \right)}{(U_{max} * \cos \beta)^2}$$

$$Y_{max} = \frac{(U_{max} * \sin \beta)^2}{g} - \frac{1}{2} \frac{(U_{max} * \sin \beta)^2}{g} = \frac{2(U_{max} * \sin \beta)^2 - (U_{max} * \sin \beta)^2}{2g}$$

$$(5) Y_{max} = \frac{(U_{max} * \sin \beta)^2}{2g}$$

Où Y_{max} [m] représente la hauteur de saut maximale atteignable, U_{max} [m.s⁻¹] la vitesse de sprint, β [degré d'angle] l'angle d'incidence du saut considéré égale à 60° et g [m.s⁻²] l'accélération gravitationnelle.

Comme mentionné par Baudoin *et al.* (2014), il peut être considéré que le poisson utilise sa force propulsive tant qu'une partie de son corps est toujours en contact avec la surface de l'eau. La hauteur maximale de chute franchissable tenant compte de ce paramètre est présentée ci-dessous (Équation 4.9).

Équation 4.9 : Équation de la hauteur maximale de chute franchissable par une espèce de poisson sauteuse (Baudoin *et al.*, 2014).

$$Dh_{franchissabl} = Y_{max} + \frac{L_p}{2}$$

Où Dh [m] représente la hauteur de chute maximale franchissable, Y_{max} [m] la hauteur de saut maximale atteignable, L_p [m] la longueur de poisson considéré.

Vitesse de sprint U_{max} :

Afin de permettre une adaptation des valeurs seuils retenues dans le *protocole ICE* aux performances de nage des espèces nord-américaines, les vitesses de sprint sont issues des courbes de fatigues proposées par Katopodis *et al.* (2016). Cette étude propose une compilation des performances de nage de différentes espèces dulçaquicoles et amphibiotiques

nord-américaines. Une approche adimensionnelle des courbes de fatigue est adoptée dans l'étude afin de permettre le regroupement de plusieurs espèces au regard de leurs performances de nage. Ce regroupement permet ainsi d'établir des régressions valides sur l'ensemble du comportement natatoire, indépendamment du manque de données pour différentes espèces.

La vitesse initiale U_{max} pour le calcul de la hauteur de chute maximale franchissable correspond à la vitesse de sprint, telle que déterminée à partir des équations des courbes de fatigue (Équation 4.10). Un temps d'endurance de 3 s est retenu pour le calcul des valeurs seuils, en considération de la gamme de validité des régressions fournies par l'étude. Les coefficients retenus pour la définition des valeurs seuils de vitesse de sprint et de classes de chutes sont présentés en Annexe III.

Équation 4.10 : Équation de la vitesse de sprint d'un individu donné (Katopodis et al., 2016).

$$U_* = K * (t_*)^b \text{ avec } U_* = \frac{U}{\sqrt{g * L_p}} \text{ et } t_* = \frac{t}{\sqrt{\frac{L_p}{g}}}$$

Où U^* et t^* [Ø] représentent respectivement la vitesse de nage adimensionnelle et le temps d'endurance adimensionnelle ; K et b [Ø] les coefficients des courbes d'endurance obtenues pour une espèce ou un regroupement d'espèce donné ; U [$m.s^{-1}$] la vitesse de nage, L_p [m] la longueur du poisson considéré, t [s] le temps d'endurance et g [$m.s^{-2}$] l'accélération gravitationnelle.

4.6.4 Distance maximale franchissable

La distance maximale franchissable dans un ouvrage est déterminée au regard des performances de nage d'une espèce et de la vitesse moyenne de l'écoulement affrontée. L'adaptation des valeurs seuils retenues dans le *protocole ICE* aux performances de nage des espèces nord-américaines est réalisée à partir des équations de distance franchissable au regard de la vitesse d'écoulement (Équation 4.11).

Les classes ICE concernant les vitesses d'écoulement sont calculées par intervalle de 5 m de longueur afin de faciliter la mise en œuvre du protocole. Au sein d'un intervalle de longueur, la valeur de vitesse d'écoulement est calculée en considérant la borne supérieure de l'intervalle. Les coefficients retenus pour le calcul des performances de nage et les classes de vitesses maximales d'écoulement franchissables sont présentés en Annexe IV.

Équation 4.11 : Équation de la distance franchissable au regard de la vitesse d'écoulement par un individu donné (Katopodis et al., 2016).

$$X_* = M * V_*^a \text{ avec } X_* = \frac{D}{Lp} \text{ et } V_* = \frac{V}{\sqrt{g * Lp}}$$

Où X_* et V_* [Ø] représentent respectivement la distance adimensionnelle parcourue et la vitesse d'écoulement adimensionnelle parcourue ; M et a [Ø] : les coefficients des courbes de distance obtenues pour une espèce ou un regroupement d'espèces donné ; D [Ø] la distance à franchir, L_p [m] la longueur du poisson considéré, V [$m.s^{-1}$] la vitesse d'écoulement, g [$m.s^{-2}$] l'accélération gravitationnelle.

4.6.5 Facteur de constriction

Le facteur de constriction (Équation 4.12) rend compte de l'effet de réduction engendré par le ponceau, par rapport à la largeur mouillée moyenne du cours d'eau. La largeur moyenne du cours d'eau est mesurée hors de la zone d'influence de l'ouvrage.

Équation 4.12 : Équation du facteur de constriction des ponceaux.

$$Fc = \frac{\emptyset_{\text{ponceau}}}{\frac{L_{ce \text{ amont}} + L_{ce \text{ aval}}}{2}}$$

Où Ø [m] représente le diamètre du ponceau et L [m] la largeur mouillée du cours d'eau mesurée en amont ou en aval du ponceau.

4.7 Franchissabilité des autres traverses de cours d'eau

En l'absence de modifications substantielles des conditions morphologiques et hydrauliques du lit mineur au droit des ouvrages à portée libre (pont) et des passages à gué, aucun impact sur le passage du poisson n'est considéré pour ces traverses de cours d'eau. Un indice ICE = 1 est donc appliqué aux traverses à gué.

Au contraire, les surverses sur route entraînent une rupture abrupte du profil en long du cours d'eau ainsi qu'une modification importante des conditions d'écoulement au droit de la traverse. En ce sens, le passage du poisson est totalement bloqué et un indice ICE = 0 est appliqué pour les surverses sur route.

4.8 Espèces cibles pour l'évaluation du franchissement piscicole

Historiquement, les évaluations sur le franchissement piscicole se sont principalement focalisées sur les espèces diadromes et les salmonidés adultes. Cette surreprésentation s'explique principalement par la forte valeur patrimoniale et économique de ces espèces (Jackson, 2003).

Les cours d'eau étudiés sur le territoire présentent un fort potentiel salmonicole, confirmé par les données de pêche électrique locale (Hémisphère, communication personnelle, octobre 2019) et de répartitions des espèces d'eau douce du Québec (Bernatchez *et al.*, 2000). D'autres espèces sont également présentes sur le territoire, comme la lotte *Lota lota* et le grand brochet *Esox lucius*. Leur aire de répartition sur le territoire d'étude est toutefois circonscrite à quelques secteurs spécifiques et ces espèces n'ont donc pas été considérées dans l'évaluation du franchissement piscicole.

En ce sens et dans le but d'obtenir une approche holistique, trois groupes d'espèces cibles ont été constitués pour l'étude de la fragmentation des habitats : les salmonidés, les grandes espèces d'accompagnement et les petites espèces d'accompagnement. Ces groupes sont notamment formés au regard des similarités morphologiques et de leurs performances de nage (Baudoin *et al.*, 2014; Katopodis *et al.*, 2016). Pour le groupe salmonidé, les différents stades de vie juvéniles et adultes sont considérés. L'évaluation du franchissement piscicole est effectuée sur la base de ces trois groupes sur l'ensemble du territoire d'étude, sans considération des répartitions spécifiques au sein des bassins versants (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Groupes d'espèces sélectionnées pour l'évaluation du franchissement piscicole.

Familles	Espèces	Groupe ICE	Classes de taille du groupe ICE
Cottidae	Chabots <i>Cottus sp</i>	Petites espèces d'accompagnement	[4 – 14 cm]
Cyprinidae	Méné de lac <i>Couesius plumbeus</i>		
Castostomidae	Meunier rouge <i>Catostomus catostomus</i> Meunier noir <i>Catostomus commersoni</i>	Grandes espèces d'accompagnement	[18 – 50 cm]
	Grand corégone <i>Coregonus clupeaformis</i>		
	Ménomini rond <i>Prosopium cylindraceum</i>		[5 – 15 cm]
			[15 – 30 cm]
Salmonidae	Ombre de fontaine <i>Salvelinus fontinalis</i>	Salmonidés	[30 – 50 cm]
	Ouananiche (forme résidente du saumon atlantique) <i>Salmo salar</i>		[50 – 80 cm]
	Touladi <i>Salvelinus namaycush</i>		

4.9 Fragmentation des habitats

Afin d'appréhender la fragmentation des habitats à l'échelle d'un bassin versant, le réseau hydrographique est conceptualisé sous la forme d'une série de tronçons dont les extrémités sont délimitées par les traverses de cours d'eau. L'accessibilité d'un tronçon est ainsi directement reliée au degré de franchissabilité des traverses situées en aval. La déconnexion longitudinale des habitats qui en résulte peut ainsi être quantifiée en termes de surfaces ou représentée par un indice de fragmentation.

La quantification de la perte d'habitat engendrée par la présence de traverses pénalisant le libre passage du poisson est exprimée par deux métriques : la surface d'habitats en m² et le pourcentage d'habitat inaccessible depuis l'exutoire de chaque bassin versant. La surface d'habitat des différents bassins versants est calculée par multiplication de la longueur des différents tronçons hydrographiques issus du RHN et de la largeur moyenne du tronçon. Cette dernière est obtenue en moyennant les largeurs mouillées mesurées sur le terrain au niveau des traverses amont et aval qui encadrent ce tronçon. À noter que pour les tronçons en tête de bassin versant et le tronçon exutoire, seule la largeur de l'ouvrage le plus proche est utilisée. L'intégralité de la surface d'un lac connecté au réseau hydrographique est par ailleurs considérée dans le calcul. L'accessibilité d'un tronçon peut ainsi être exprimée pour ces deux métriques selon 4 catégories dépendantes de la classification ICE de la traverse de cours d'eau située en aval de ce tronçon (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Transposition de l'accessibilité du tronçon en fonction de la franchissabilité de la traverse aval.

Classe ICE de la traverse aval	Accessibilité du tronçon
ICE 1 : Barrière franchissable	Accessible
ICE 0,66 : Barrière à impact significatif	Moyennement accessible
ICE 0,33 : Barrière à impact majeur	Faiblement accessible
ICE 0 : Barrière infranchissable	Inaccessible

La prise en compte de l'effet cumulatif des ouvrages hydrauliques sur la perte d'habitat est plébiscitée par de nombreuses études pour une prise en compte globalisée de la problématique du franchissement piscicole (Cooke *et al.*, 2005; Harris *et al.*, 2016). En ce sens, l'accessibilité d'un tronçon donné est prise en compte en considérant la classe ICE de l'ouvrage et l'accessibilité du tronçon aval selon la matrice suivante (Tableau 4.4). Selon la même logique

que pour l'évaluation des ponceaux avec une chute aval, un effet pénalisant est appliqué afin de prendre en compte l'impact négatif de la présence d'ouvrages successifs sur un même réseau hydrographique.

Tableau 4.4 : Matrice de calcul pour l'accessibilité du tronçon i+1.

Classe ICE traverse i	Accessibilité tronçon i			
	Accessible	Moyennement accessible	Faiblement accessible	Inaccessible
ICE 1	Accessible	Moyennement accessible	Faiblement accessible	Inaccessible
ICE 0,66	Moyennement accessible	Faiblement accessible	Faiblement accessible	Inaccessible
ICE 0,33	Faiblement accessible	Faiblement accessible	Inaccessible	Inaccessible
ICE 0	Inaccessible	Inaccessible	Inaccessible	Inaccessible

L'étude de la fragmentation des habitats par l'intermédiaire d'indices (Équation 4.13) constitue une approche similaire qui favorise la conceptualisation des patrons migratoires diadrome et potamodrome et la prise en compte de l'effet cumulatif des ouvrages (Cote *et al.*, 2009). Bien que le territoire d'étude n'abrite que des espèces dulçaquicoles, l'indice de fragmentation des espèces diadromes peut être utilisé et interprété comme la fragmentation de l'habitat subit par des individus qui remonteraient dans les bassins versants depuis les lacs dans lesquels ils se drainent. L'approche est alors identique à celle de la quantification d'habitats.

Équation 4.13 : Indice de fragmentation des habitats selon Cote *et al.* (2009).

$$DCI_{potamodromes} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \frac{l_i l_j}{L L} * 100$$

$$DCI_{diadromes} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{L} c_{ij}$$

Où c_{ij} [Ø] est la somme de la franchissabilité des obstacles entre les points i et j sur le bassin versant, l [m] est la longueur des tronçons en m et L [m] est la longueur totale cumulée du bassin versant.

4.10 Analyses statistiques

Les variables hydrologiques, structurelles et hydrauliques sont étudiées par analyse de la variance (ANOVA). Le respect des suppositions d'application d'homoscédasticité et normalité est respectivement validé par les tests formels de Levene et Anderson-Darling. La comparaison multiple des moyennes est effectuée avec le test de Tukey HSD à posteriori de l'ANOVA. En dernier recours, l'utilisation du test non paramétrique de Kruskal-Wallis est appliquée aux données pour lesquelles aucune transformation opérée n'a permis d'atteindre les suppositions. Dans ce cas, un test de Dunn est effectué à postériori pour la comparaison multiple des moyennes.

Les variables relatives à la présence de défauts ou à la franchissabilité des ouvrages sont analysées à l'aide de tableaux de contingence. Compte tenu de la présence de fréquences théoriques < 5 , le test exact de Fischer est utilisé pour la comparaison des proportions.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R 4.1.1 (<https://www.r-project.org>). Le seuil de significativité des tests statistiques $\alpha < 0.05$.

5 Résultats

5.1 Description des traverses de cours d'eau

5.1.1 Types de traverses de cours d'eau

Parmi les 39 traverses caractérisées à l'échelle du territoire, 29 sont constituées de ponceaux simples ou multiples, 6 de passage à gué non aménagés, 3 surverses directement sur le revêtement de la voirie et un ouvrage mixte (Figure 5.1). Compte tenu de son étendue, le réseau de prospection regroupe à lui seul presque 60% des traverses de cours d'eau, toutes classifications confondues.

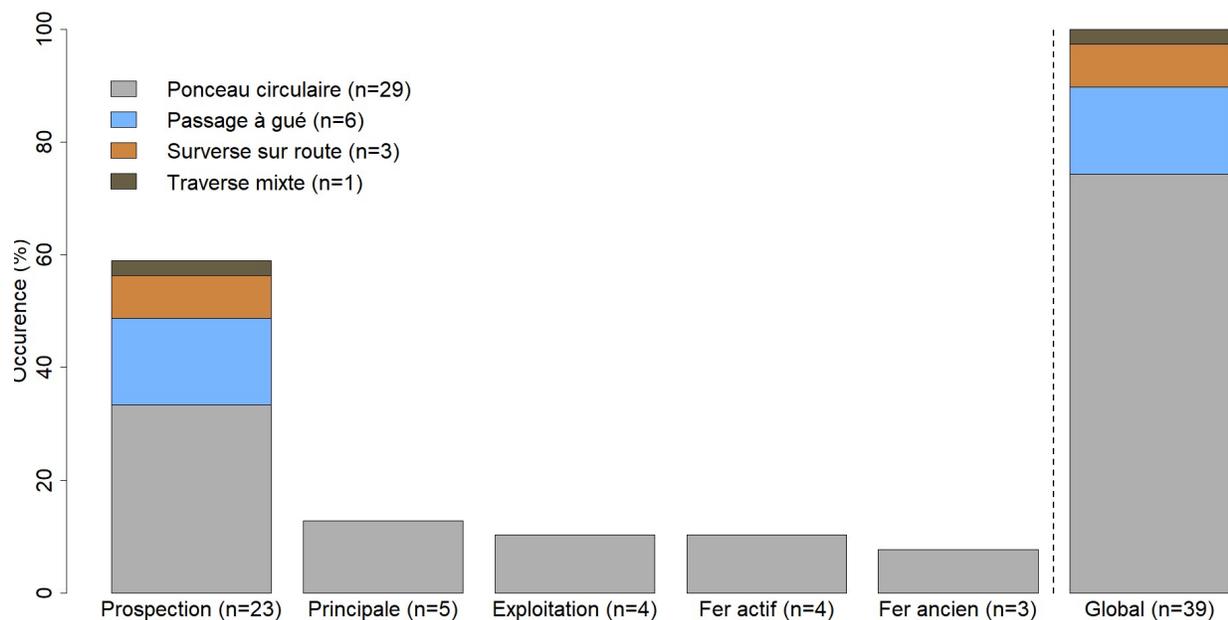
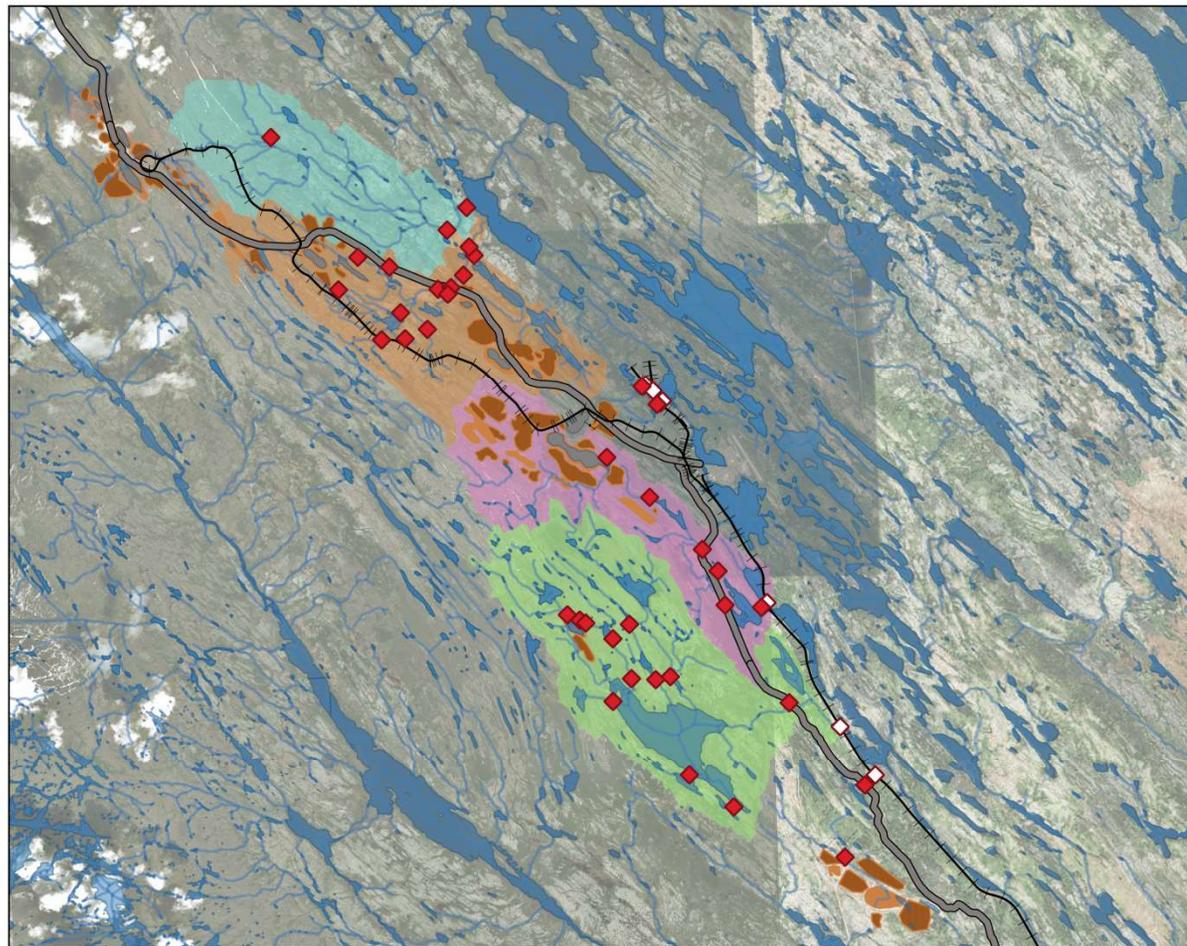


Figure 5.1 : Répartition des traverses de cours d'eau selon leur classification et la typologie de voirie.

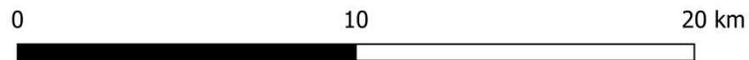
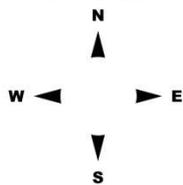
Près de 90% des traverses diagnostiquées sont regroupées sur quatre bassins versants principaux tandis que les traverses restantes sont réparties sur quatre bassins versants de superficie restreinte (Figure 5.2). En l'absence d'autorisation pour accéder à la portion de voie ferrée exploitée par la compagnie Tshuëtin, la part des ouvrages non diagnostiqués sur ces quatre petits bassins versants représente plus de 50% des ouvrages prélocalisés.



Bassins versants principaux étudiés

Légende

- ◆ Sites diagnostiqués
- ◇ Traverses non diagnostiquées
- - - Frontière provinciale
- Sous-bassins versants étudiés**
- BV 1
- BV 2
- BV 5
- BV 6
- Réseau de transport principal**
- Route principale
- Route de contournement
- Chemmin de fer actif
- Réseau hydrographique**
- Cours d'eau
- Lac
- Exploitation minière inactive**
- Fosse
- Halde de stérile



Sources : RHN, BDTQ, Google satellite

Projection : NAD83 / UTM zone 19N

Figure 5.2 : Carte de localisation des bassins versants principaux du territoire d'étude.

5.1.2 Caractéristiques des traverses composées de ponceaux

Comme mentionné précédemment, 29 des traverses de cours d'eau sont composées de ponceaux sur le territoire. Ces sites sont dans un premier temps caractérisés selon le type de réseau de transport sur lesquels ils sont localisés.

Du point de vue hydrologique, les bassins versants drainés au niveau des ponceaux ainsi que la largeur moyenne des cours d'eau aux abords du site sont relativement homogènes, quel que soit le réseau de transport considéré. Aucune différence statistique n'a pu être mise en évidence pour ces variables (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 : Portrait type et analyses statistiques associés des variables hydrologiques selon le réseau de transport.

Variable	Moyenne (\pm écart-type)					Statistique
	Route de prospection	Route principale	Route d'exploitation	Chemin de fer actif	Ancien chemin de fer	
Bassin versant drainé (km ²)	6,9 (\pm 6,7)	14,9 (\pm 17,9)	7,9 (\pm 4,0)	15,4 (\pm 10,2)	4,5 (\pm 3,2)	ANOVA (p=0,32)
Largeur cours d'eau (m)	2,4 (\pm 0,9)	3,6 (\pm 2,5)	3,2 (\pm 2,0)	2,2 (\pm 1,0)	2,0 (\pm 0,0)	ANOVA (p=0,51)

Une différenciation de la nature du revêtement employé est observée entre les réseaux de transport. Le réseau de prospection, réalisé lors des phases préliminaires de développement des mines, est simplement constitué d'un décapage des couches de sol de surface tandis que la création des autres réseaux résulte d'un apport de remblais. Dans le cas des routes carrossables, le remblai est constitué à partir des matériaux d'extraction de surface non valorisable tandis que les voies ferrées sont formées de ballast, matériau le plus communément employé pour la stabilisation et le drainage de celle-ci (Tableau 5.2 et Figure 5.3)



Figure 5.3 : Exemple des différents réseaux de transport rencontrés.

Route de prospection à l'est du lac Cosa (A), Route d'exploitation de l'ancienne mine Redmond (B), route principale proche de l'ancienne mine Gagnon (C), chemin de fer actif exploité par Genesee & Wyoming Inc. (D) et ancien chemin de fer située au nord du lac Wishart (E).

La largeur de surface des voiries est variable selon le type de réseau, mais également au sein d'un même groupement notamment pour le chemin de fer actif qui présente des infrastructures de transport associées en parallèle. L'analyse statistique des données met en évidence la largeur plus restreinte du réseau de prospection de l'ordre de 4 m contrairement aux autres réseaux routiers qui permettent une circulation à double sens simultanée avec des largeurs supérieures à 10 m. L'ancien chemin de fer présente quant à lui une largeur intermédiaire de

l'ordre de 6 m qui n'entraîne pas de différenciation statistique avec les autres réseaux de transport.

Tableau 5.2 : Portrait type et analyses statistiques associés aux caractéristiques structurales des ponceaux selon le réseau de transport.

Variable	Moyenne (\pm écart-type)					Statistique
	Route de prospection	Route principale	Route d'exploitation	Chemin de fer actif	Ancien chemin de fer	
Nombre de ponceaux	1,8 (\pm 1,0)	1,6 (\pm 0,9)	1,8 (\pm 1,5)	1,0 (\pm 0,0)	1,0 (\pm 0,0)	ANOVA (p=0,46)
Largeur voirie (m)	3,7 (\pm0,3)	11,7 (\pm1,4)	11,5 (\pm3,2)	13,7 (\pm11,9)	6,0 (\pm0,9)	Kruskal-Wallis (p<0,001)
Diamètre* (mm)	980 (\pm300)	1270 (\pm910)	1030 (\pm350)	2760 (\pm1250)	1000 (\pm347)	ANOVA (p=0,001)
Longueur ponceau (m)	8,3 (\pm2,7)	33,3 (\pm15,9)	33,3 (\pm15,2)	38,4 (\pm15,0)	46,0 (\pm7,0)	ANOVA (p<0,001)
Pente (%)	2,6 (\pm 3,3)	2,4 (\pm 2,2)	3,0 (\pm 1,9)	2,7 (\pm 2,8)	3,4 (\pm 1,8)	ANOVA (p=0,99)
Facteur de constriction	0,4 (\pm0,1)	0,4 (\pm0,3)	0,4 (\pm0,2)	1,2 (\pm0,3)	0,4 (\pm0,3)	ANOVA (p< 0,001)

* Valeurs arrondies à la dizaine de mm

Près de 66% (n=19) des sites diagnostiqués sont composés de ponceaux simples. Pour les sites restants, le nombre de ponceaux est variable jusqu'à un maximum de quatre ouvrages comptabilisés. Excepté pour les réseaux de chemin de fer, le nombre de ponceaux au droit de chaque site présente une forte variabilité, mais aucune différence statistique n'est mise en évidence selon le réseau de transport. Au sein des variables structurales, les pentes relevées sur les ouvrages présentent une valeur moyenne de 2,8%, caractérisée par une forte variabilité. Des ouvrages en contrepente hydrauliques sont observés sur le territoire tandis que les pentes maximales atteignent 4%. Aucune différence statistique n'est également observée entre les différents réseaux de transport pour cette variable. Au contraire, le diamètre des ponceaux ainsi que leur longueur diffèrent significativement selon le réseau de transport considéré.

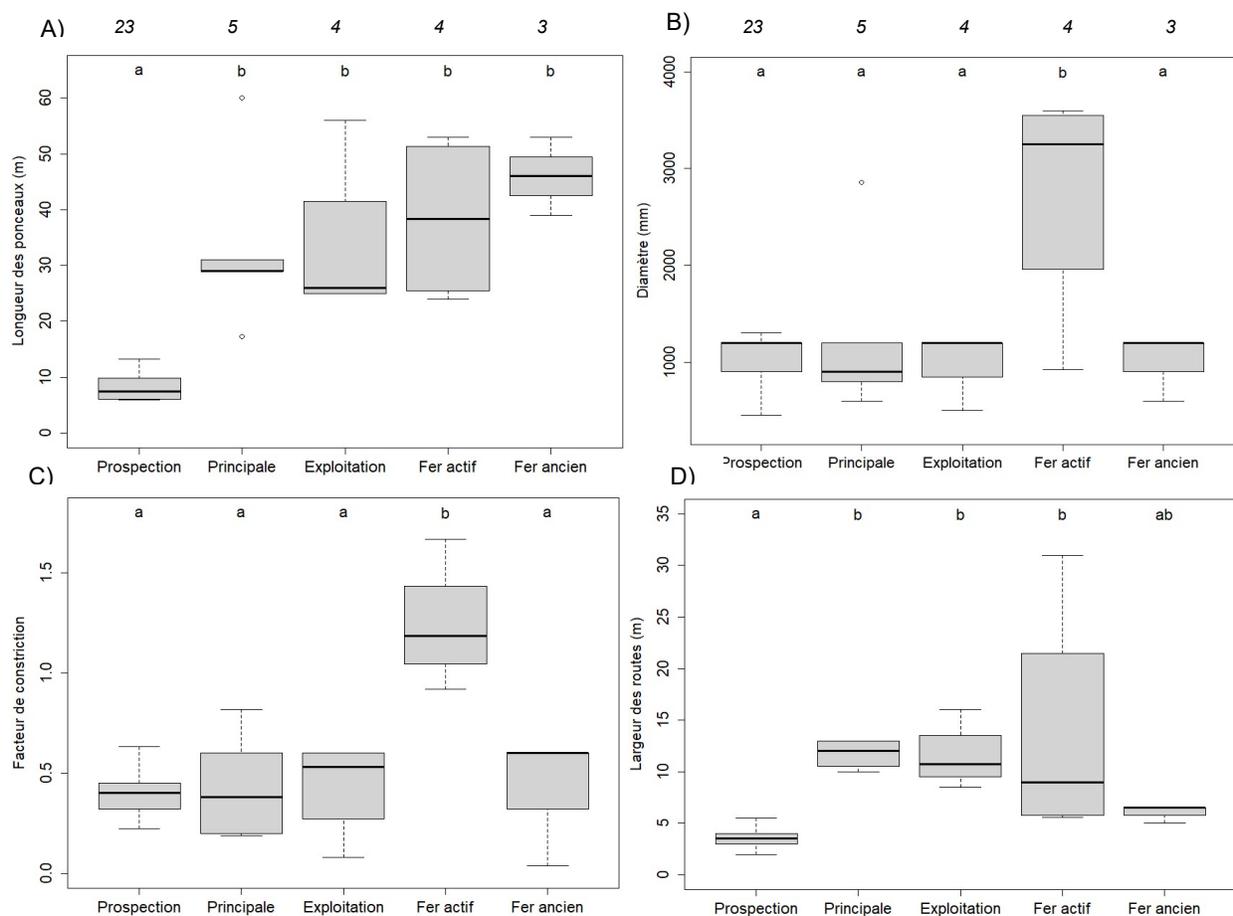


Figure 5.4 : Représentation graphique en boîte à moustache de la comparaison statistique entre le réseau de transport et a) la longueur des ponceaux, b) le diamètre des ponceaux, c) le facteur de constriction et d) Largeur des routes. Les chiffres au-dessus des graphiques indiquent le nombre de sites inventoriés par type de réseau. La présence de différence statistique significative est représentée par des lettres différentes au-dessus des boîtes à moustaches.

L'analyse par test de comparaisons multiples des moyennes (Figure 5.4) souligne la mise en œuvre de ponceaux d'un diamètre plus important sur le réseau de chemin de fer actif (2760 ± 1250 mm), tandis que la taille standard est nettement inférieure pour le réseau de prospection (980 ± 300 mm), le réseau principal (1270 ± 910 mm), le réseau d'exploitation (1030 ± 1250 mm) et l'ancien chemin de fer (1000 ± 1250 mm). La présence de ponceaux avec un diamètre plus important sur le chemin de fer actif n'entraîne pas d'effet de constriction au passage des ponceaux ($1,2 \pm 0,3$) au contraire des autres réseaux. Ces éléments indiquent un surdimensionnement des installations ferroviaires toujours en activité contrairement aux autres sites qui entraînent un rétrécissement du lit mineur de plus de 50% au droit des ouvrages. Les ponceaux recensés sur le réseau de prospection présentent une longueur systématiquement inférieure ou égale à 10 m ($8,3 \pm 2,7$ m). Au contraire, les ponceaux sur les autres réseaux présentent une longueur moyenne supérieure à 30 m malgré une forte variabilité intragroupe

notamment pour les réseaux principal ($33,3 \pm 15,9$ m), exploitations ($33,3 \pm 15,2$ m) et le chemin de fer actif ($38 \pm 15,0$ m).

Une analyse de corrélation permet d'identifier que 30% de la variation de la longueur des ponceaux est expliquée par celle de la largeur de la voirie (Figure 5.5). De façon similaire, le diamètre des ponceaux est fortement corrélé positivement avec le facteur de constriction.

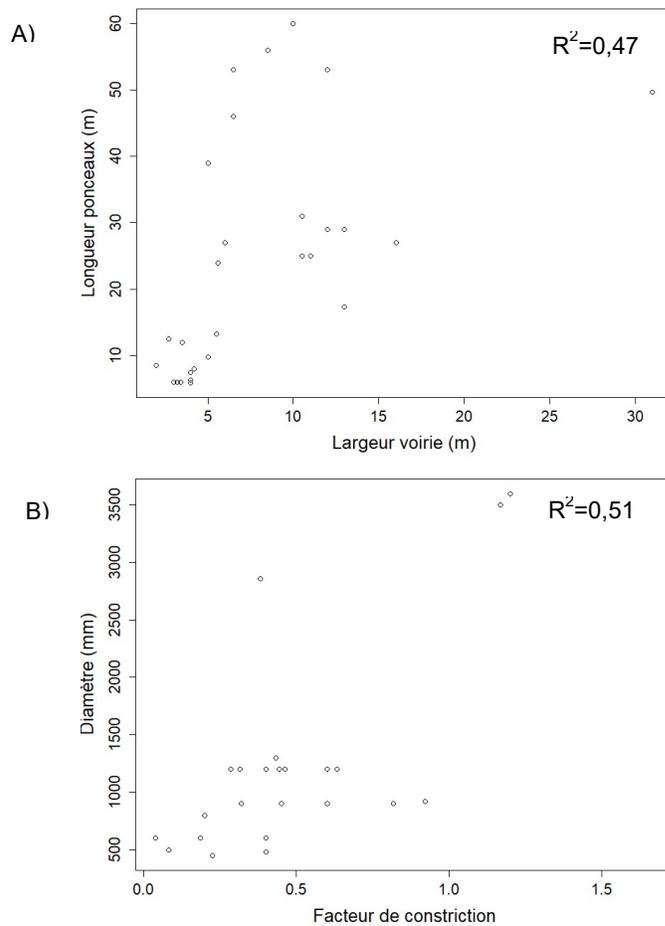


Figure 5.5 : Corrélation entre les couples de variables A) Longueur ponceau / Largeur de voirie et B) Diamètre / Facteur de constriction. La force de la corrélation est caractérisée par l'indice R^2 .

5.1.3 Défectuosité des ponceaux

La présence de défauts majeurs est généralisée à l'ensemble des ponceaux du territoire puisque presque 86% (n=25) des sites sont concernés par un état structural dégradé dont 68% (n=15) par des défauts multifactoriels. Les défauts rencontrés sur le territoire concernent principalement la déformation de la structure (n=13), la présence d'embâcles à l'amont des ouvrages (n=13) et la dislocation d'une ou plusieurs des sections qui composent le ponceau (n=11). Les problématiques de corrosion, de minage et d'écoulement sous-jacent reste quant à elles confinées à un maximum de deux ouvrages. Parmi l'ensemble des sites diagnostiqués, seuls deux ponceaux ayant fait l'objet d'un remplacement en 2012 sur le réseau de chemin de fer actif sont exempts de défauts.

L'analyse des données par l'intermédiaire de tableaux de contingence permet de conclure que la proportion d'ouvrages défectueux ne diffère pas significativement selon le type de réseau considéré (Fischer Exact Test, $p=0,85$) ou le nombre de ponceaux présents sur les sites (Fischer Exact Test, $p=1$) (Tableau 5.3). Aucun réseau de transport n'apparaît par ailleurs statistiquement plus favorable à la présence de défauts multiples (ANOVA, $p=0,13$).

Tableau 5.3 : Tableau de contingence de la présence de défauts en fonction du réseau de transport ou du nombre de ponceaux par site.

Défauts	Type de voirie					Total
	Route de prospection	Route principale	Route d'exploration	Chemin de fer actif	Ancien chemin de fer	
Absence	1	0	1	2	0	4
Présence	12	5	3	2	3	25
Total	13	5	4	4	3	29

Défauts	Nombre de ponceau sur site		Total
	Simple	Multiple	
Absence	3	1	4
Présence	16	9	25
Total	19	10	29

5.2 Évaluation du potentiel de franchissement piscicole des ponceaux

Deux sites sur les 29 constitués de ponceaux n'ont pas pu être caractérisés au regard du franchissement piscicole en l'absence d'écoulement dans les ponceaux.

La présence d'une chute aval a pu être mesurée au niveau de 55% (n=15) des sites, dont 53% sont inférieures à 0,07 m (n=8) et donc jugées négligeables. Les 7 sites restants présentent quant à eux une chute supérieure à 0,20 m à leur extrémité aval dont 3 sont supérieures à 0,80 m, ce qui excède les performances de saut de la majorité des groupes d'espèces cibles. La proportion de sites qui présente une chute aval ne diffère pas statistiquement selon le type de réseau considéré (Fischer exact test, $p=0,85$). Bien que le réseau de prospection semble être associé à des hauteurs de chute moyenne plus faibles, la forte variabilité relevée entraîne une indépendance statistique de cette variable au regard du type de réseau de transport (Tableau 5.4).

Les autres variables hydrauliques présentent également une grande variabilité entre les sites d'un même réseau qui entraîne une indépendance statistique. On notera toutefois la présence de tirants d'eau inférieurs à 0,10 m sur le réseau d'ancien chemin de fer qui pénalisent les plus grandes espèces. Malgré leur forte variabilité, la vitesse d'écoulement moyenne modélisée excède $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour plusieurs ouvrages répartis sur l'ensemble des réseaux de transport. La vitesse moyenne modélisée est dépendante de la configuration des ponceaux (nombre, largeur, pente, rugosité, etc.) et du débit drainé au droit de chaque site ($Q = 0,073 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\pm 0,066$).

L'analyse du libre passage du poisson est, dans un premier temps, réalisée en ne considérant que les caractéristiques structurelles et hydrauliques de l'ouvrage. La prise en compte de défauts susceptibles de pénaliser le libre passage du poisson est abordé dans une seconde section.

Tableau 5.4 : Portrait type et analyses statistiques associés des variables hydrauliques selon le réseau de transport.

Variable	N	Moyenne (\pm écart-type)					Statistique ANOVA
		Route de prospection	Route principale	Route d'exploitation	Chemin de fer actif	Ancien chemin de fer	
Profondeur fosse d'appel (m)	28	0,44 ($\pm 0,43$)	0,52 ($\pm 0,30$)	0,80 ($\pm 0,62$)	0,50 ($\pm 0,06$)	0,61 ($\pm 0,28$)	p=0,66
Hauteur de chute aval (m)	15	0,09 ($\pm 0,16$)	0,50 ($\pm 0,43$)	0,58 ($\pm 0,80$)	0,07	0,37	(*)(**) p=0,20
Tirant d'eau (m)	27	0,21 ($\pm 0,18$)	0,18 ($\pm 0,20$)	0,31 ($\pm 0,42$)	0,28 ($\pm 0,17$)	0,08 ($\pm 0,01$)	(**) p=0,75
Vitesse moyenne d'écoulement ($m.s^{-1}$)	26	0,63 ($\pm 0,55$)	0,95 ($\pm 0,37$)	0,62 ($\pm 0,52$)	0,71 ($\pm 0,48$)	1,02 ($\pm 0,38$)	p=0,64

(*) Analyse réalisée seulement sur les réseaux routiers en l'absence de multiples ouvrages avec chute sur les réseaux ferrés.

(**) Analyse statistique réalisée sur la variable Log transformée pour le respect des conditions d'application de la normalité.

Analyse du franchissement piscicole à partir des variables structurelles et hydrauliques :

Sur le territoire étudié, le franchissement piscicole est pénalisé pour l'ensemble des groupes cibles puisqu'entre 34% (n=10) et 55% des sites (n=16) obtiennent un indice ICE=0 et sont donc évalués comme barrière infranchissable à la montaison (Figure 5.6). Les groupes *salmonidés [15 - 30 cm]* et *[30-50 cm]* sont les moins impactés puisqu'ils présentent à la fois le plus fort taux d'ouvrage franchissable soit 48% (n=13) des ouvrages classifiés ICE 1 ; ainsi que le plus faible taux d'ouvrages totalement pénalisant avec respectivement 37% (n= 10) et 48% (n=13) des ouvrages classifiés ICE=0. Au contraire, les groupes *salmonidés [5 - 15 cm]* et *Petites espèces d'accompagnement* sont en mesure de franchir sans impacts seulement 26% (n=7) des ouvrages. Le franchissement de ces groupes est toutefois contrasté puisqu'ils présentent avec respectivement 22% et 26% (n=6 et 7) des ouvrages dans un état de franchissabilité intermédiaire. Les groupes *salmonidés [50 - 80 cm]* et *grandes espèces d'accompagnement* sont les plus impactés par la présence d'ouvrages infranchissables malgré leurs performances de nage élevées, avec 59% (n=16) et 56% (n=15) des ouvrages classifiés

ICE 0. À ce titre, le groupe *salmonidés [50 - 80 cm]* est le seul à présenter une situation totalement binaire en l'absence d'ouvrages de franchissabilité intermédiaire.

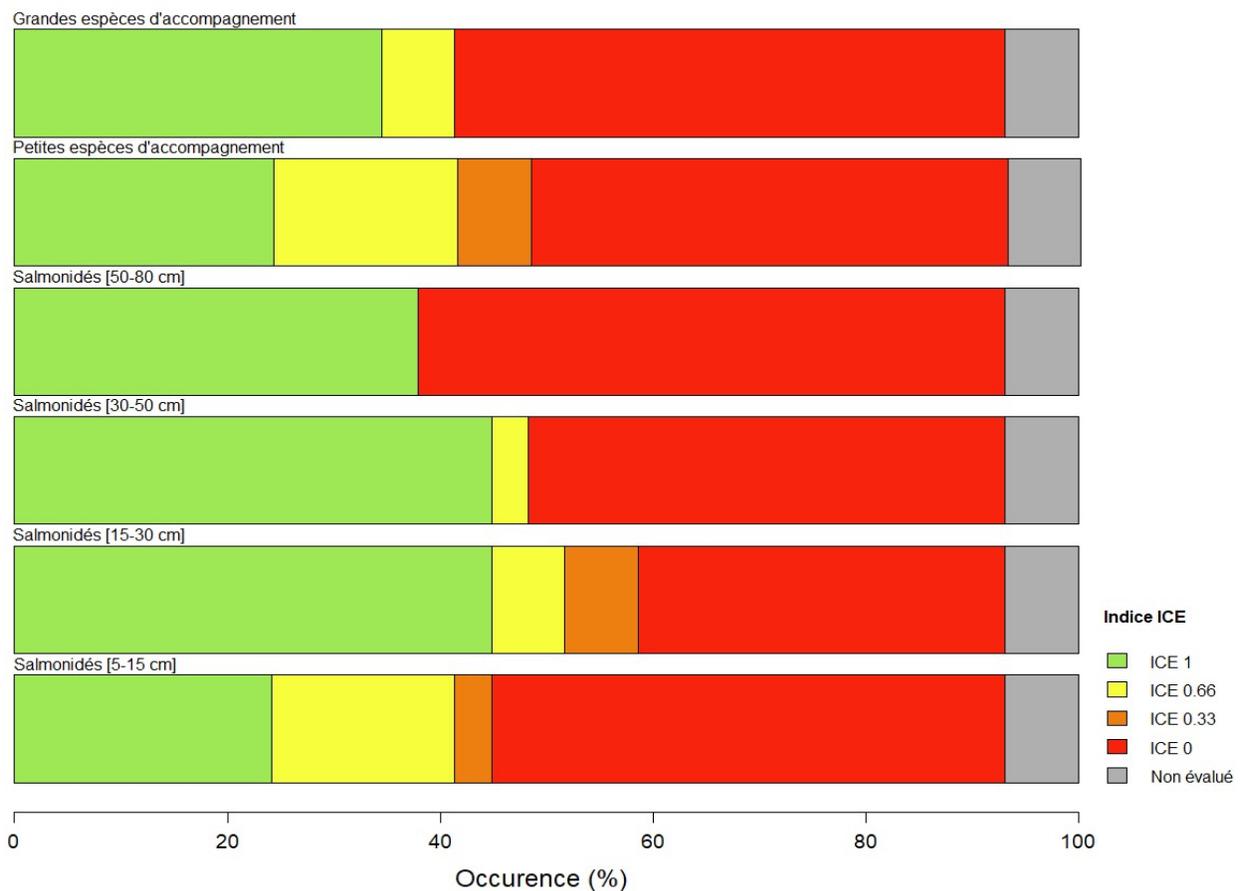


Figure 5.6 : Classe ICE des ponceaux (n=29) par groupes d'espèce cible sans prise en compte des défauts présents sur les ouvrages.

Les variables qui pénalisent le plus le franchissement découlent directement des performances de nage et caractéristiques morphologiques du groupe cible considéré. Comme mentionné précédemment, les 8 sites qui présentent des chutes aval < 0,10 m présentent tous une configuration à jet de surface et n'entraînent donc aucune perturbation du franchissement piscicole. Parmi les 7 sites qui possèdent une chute aval notable (> 0,10 m), 6 d'entre eux sont à configuration de jet plongeant dont 4 ne présentent pas une profondeur suffisante en pied pour permettre la prise d'appel de poissons. Les chutes à jet plongeant sont totalement rédhitoires pour les groupes *Espèces d'accompagnement* compte tenu de l'inaptitude de ces espèces à sauter (Figure 5.7). Par ailleurs, l'absence d'une fosse adaptée en pied de certains de ces ouvrages entraîne le déclassement systématique de ceux-ci, y compris pour les groupes *salmonidés* pourtant capables de saut. Pour les autres sites qui présentent une chute, les faibles performances de saut du groupe *Salmonidés [5 - 15 cm]* ne leur permettent de ne

franchir aucun des 2 sites à jet plongeant dont la hauteur de chute avoisine 0,40 m. Le site à configuration jet de surface constitue également une barrière partielle pour ce groupe à cause des vitesses importantes dans la chute. Au contraire, la franchissabilité s'améliore pour les classes de taille supérieure des groupes *Salmonidés* jusqu'à être totalement franchissable par les groupes *Salmonidés [30 - 50 cm]* et *[50 - 80 cm]*. Pour les *Espèces d'accompagnement*, la hauteur de chute de 0,23 m du jet à configuration de surface ne présente pas un point de blocage majeur.

À l'intérieur des ouvrages, deux situations sont observées. La première situation correspond aux groupes avec des performances de nage réduites pour qui la variable vitesse moyenne constitue un critère pénalisant. Cette configuration impacte principalement pour les groupes *Salmonidés [5 - 15 cm]* et *petites espèces d'accompagnement* au niveau de 20 sites, et 15 sites le groupe *Salmonidés [15 - 30 cm]* au niveau de 15 sites. Au contraire, l'augmentation des performances de nage associée aux différents groupes *Salmonidés* entraîne une transition des ouvrages infranchissables vers les classes de franchissabilité supérieure. Le groupe *Salmonidés [50 - 80 cm]* est à ce titre le moins impacté puisque aucun des sites n'est infranchissable et seulement deux sites sont à impact partiel pour cette variable. À noter que la présence d'un embâcle total au niveau d'un ouvrage n'a pas permis de modéliser la vitesse moyenne de l'écoulement pour celui-ci.

La seconde situation correspond aux espèces de taille plus importantes pour qui la hauteur d'eau est insuffisante pour leur permettre de nager efficacement. La présence de tirants d'eau inférieurs à 0,10 m recensée dans plusieurs ponceaux entraîne donc le déclassement d'une part importante des ouvrages pour ces grandes espèces, soit 37% (n=10) pour le groupe *Salmonidés [30 - 50 cm]*, 41% (n=11) pour le groupe *Grandes espèces d'accompagnement* et jusqu'à un maximum de 63% (n=17) des sites pour le groupe *Salmonidés [50 - 80 cm]*.

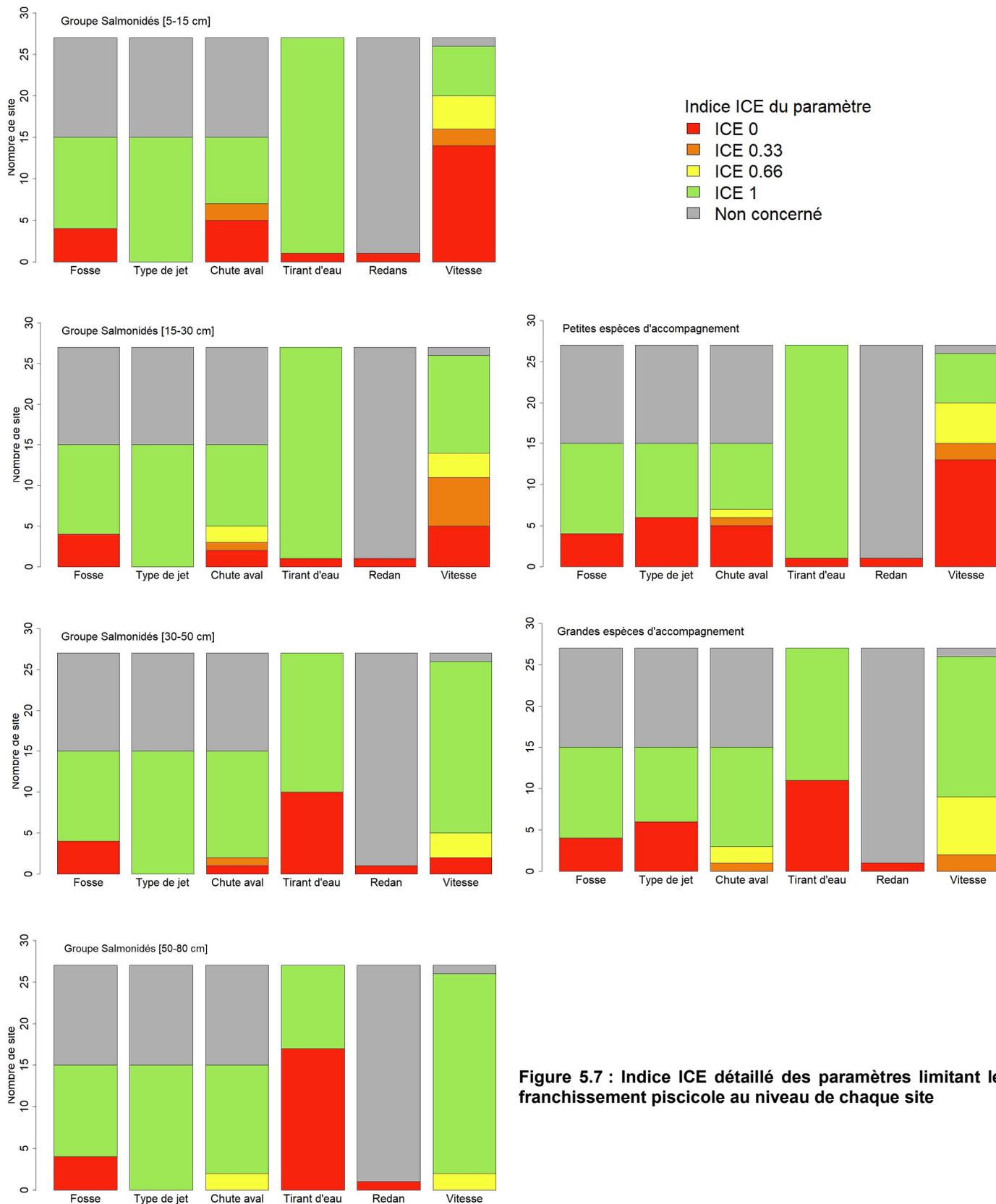


Figure 5.7 : Indice ICE détaillé des paramètres limitant le franchissement piscicole au niveau de chaque site

Analyse du franchissement piscicole en incluant la présence de défauts sur les ponceaux :

La présence de défauts majeurs au niveau de 7 sites impacte directement le franchissement du poisson (Figure 5.8). Pour la majorité d'entre eux (n=6), la présence d'embâcles importants à l'amont des ponceaux forme un seuil à jet plongeant qui constitue une barrière physique pour le passage du poisson tandis que le dernier site est impacté par une corrosion du radier. Bien que les variables hydrauliques et structurelles rendent d'ores et déjà les ouvrages infranchissables à l'ensemble des groupes cibles pour deux ouvrages, l'absence d'entretien est l'unique variable qui pénalise totalement le franchissement pour l'un des ouvrages. Les 4 sites restants constituent une situation intermédiaire dans laquelle les variables structurelles et hydrauliques présentent déjà un impact sur le franchissement pour certains groupes cibles.

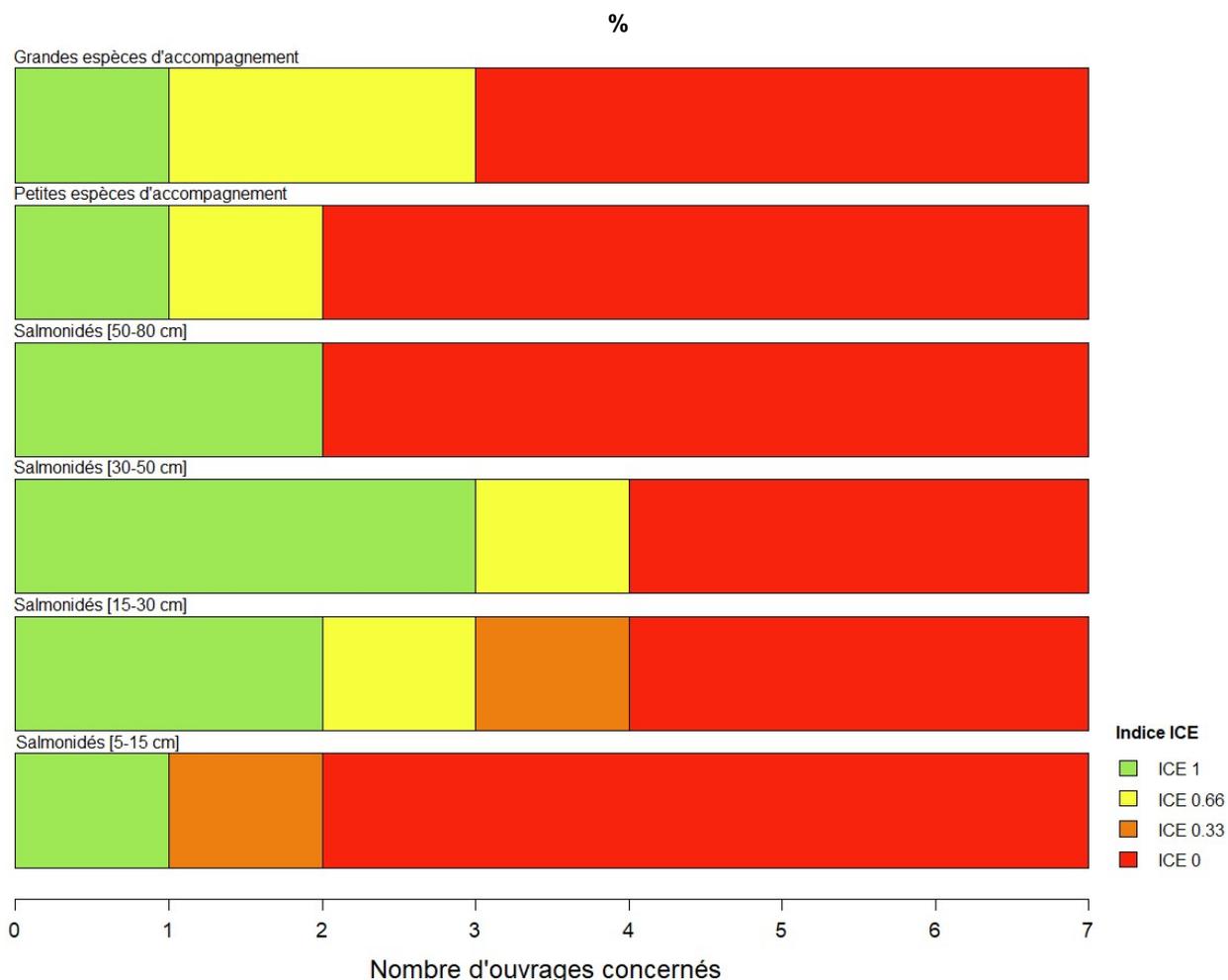


Figure 5.8 : Nombre de ponceau rendu infranchissable par la présence d'embâcles (n=6).

L'analyse du franchissement piscicole par l'intermédiaire de tableaux de contingence n'a toutefois pas permis de mettre en évidence de proportions significativement différentes

d'ouvrages infranchissables parmi les différents réseaux de transport étudiés (Tableau 5.5). Un constat identique est effectué entre la proportion d'ouvrages infranchissables et le nombre d'ouvrages par site.

Tableau 5.5 : Résultat des tests exacts de Fischer effectué sur la franchissabilité des ouvrages selon le réseau de transport et le nombre d'ouvrages sur site.

Variables	Groupe ICE					
	Salmonidés				Espèces d'accompagnement	
	[5 - 15 cm]	[15 - 30 cm]	[30 - 50 cm]	[50 - 80 cm]	Petites	Grandes
Type de réseau (p-value)	0,24	0,19	0,07	0,88	0,24	0,13
Simple / multiple (p-value)	0,77	0,97	0,99	0,97	0,71	0,99

5.3 Quantification de la perte d'habitat

En raison de la proportion importante d'ouvrage non diagnostiqué sur certains bassins versants, la fragmentation des habitats est caractérisée uniquement sur les 4 bassins versants principaux du territoire.

Excepté le sous-bassin versant n°1, l'accès aux habitats depuis l'exutoire des bassins versants principaux est fortement altéré sur le territoire d'étude (Tableau 5.6). Au moins 124 500 m² (65%) d'habitat sont rendus inaccessibles par la présence d'ouvrages bloquants sur les portions aval des réseaux hydrographiques. À l'échelle de ces 4 entités hydrographiques, la surface d'habitat librement accessible est de l'ordre de 707 975 m² (7.1%) pour les groupes *Salmonidés [5 - 15 cm]* et *petites espèces d'accompagnement* tandis que les performances de nage plus importantes des autres groupes cibles favorisent l'accès à près de 1 065 418 m² (10.7%) du territoire. Cette différence entre les différents groupes est entièrement expliquée au niveau du sous-bassin versant n°1 puisque le second ouvrage depuis l'exutoire pénalise partiellement le passage des groupes cibles aux plus faibles performances de nage.

Les conclusions de l'analyse des indices de fragmentation diadromes sont identiques. Les indices pour le premier sous-bassin versant tendent vers une valeur de 1 ce qui confirme l'accessibilité générale du réseau hydrographique du fait du faible nombre de traverses présentes et de leur position aux extrémités du bassin versant (Tableau 5.7).

Au contraire la situation est critique pour les groupes aux faibles performances de nage au niveau du sous-bassin versant n°2 tandis qu'elle concerne l'ensemble des groupes cibles pour le sous-bassin versant n°6.

L'indice potamodrome représente quant à lui la capacité des différents groupes à se déplacer au sein du réseau hydrographique. Là encore le bassin versant n°1 est logiquement le moins fragmenté compte tenu du faible nombre d'ouvrages sur la partie centrale et amont du bassin versant. Ce constat est également illustré par l'importance du tronçon non fragmenté le plus long qui représente plus de 75 % du linéaire de réseau hydrographique. Pour les autres sous-bassins versants, la multiplicité des traverses pénalisantes pour le passage du poisson entraîne une déconnexion longitudinale importante des habitats. Cela est mis en évidence par les indices de fragmentations inférieurs à 40%. Ce constat est maximal au niveau du sous-bassin versant n°5 compte tenu de sa forme allongée et de la présence d'ouvrages bloquants régulièrement répartis sur le réseau hydrographique. Toutefois, il convient de noter que chacun des bassins présente au moins un tronçon continu franchissable qui représente en moyenne 43% de la longueur du réseau hydrographique pour l'ensemble des espèces.

Tableau 5.6 : Superficies d'habitats et accessibilité associée sur les 4 sous-bassins versants étudiés.

Bassin versant	Groupe piscicole cible	Accessibilité (m ² et %)				Total (m ²)
		Accessible	Moyenne	Faible	Inaccessible	
BV 1	Salmonidés [5 - 15 cm] Petites espèces d'accompagnement	89 307 (19,3%)	357 443 (77,1%)	-	16 498 (3,6%)	463 248
	Autres groupes de salmonidés Grandes espèces d'accompagnement	446 750 (96,4%)	-	-	16 498 (3,6%)	
BV 2	Salmonidés [5 - 15 cm]	3 225 (0,3%)	-	-	1 350 322 (99,7%)	1 353 547
	Salmonidés [15 - 30 cm]	3 225 (0,3%)	1 135 334 (83,8%)	-	214 988 (15,8%)	
	Salmonidés [30 - 50 cm] / [50 - 80 cm] Grandes espèces d'accompagnement	3 225 (0,3%)	-	1 135 334 (83,8%)	214 988 (15,8%)	
	Petites espèces d'accompagnement	3 225 (0,3%)	-	1 135 334 (83,8%)	214 988 (15,8%)	
BV 5	Tous groupes cibles	570 166 (38,8%)	-	-	898 454 (61,2%)	1 468 620
BV6	Tous groupes cibles	45 277 (0,6%)	-	-	6 601 109 (99,4%)	6 646 386

Tableau 5.7 : Indices de fragmentation diadrome et potamodrome des quatre sous-bassins versants étudiés, tel que formulé par Cote et al (2008).

Bassin versant	Groupe piscicole cible	Nombre de traverses	DCI _{diadrome}	DCI _{potamodrome}
BV 1	Salmonidés [5 - 15 cm] Petites espèces d'accompagnement	3	0,60	0,71
	Salmonidés [15 - 30 cm], [30 - 50 cm] et [50 - 80 cm]		0,87	0,77
	Grandes espèces d'accompagnement		0,87	0,75
BV 2	Salmonidés [5 - 15 cm] Petites espèces d'accompagnement	12	0,02	0,27
	Salmonidés [15 - 30 cm]		0,21	0,32
	Salmonidés [30 - 50 cm] / [50 - 80 cm] et Grandes espèces d'accompagnement		0,30	0,28
	Tous groupes cibles		0,34	0,18
BV6	Salmonidés [5 - 15 cm], [30 - 50 cm] et [50 - 80 cm]	12	0,08	0,29
	Salmonidés [15 - 30 cm]			0,38
	Petites espèces d'accompagnement			0,27
	Grandes espèces d'accompagnement			0,26

Tableau 5.8 : Longueur du plus long tronçon totalement franchissable et position associée sur les 4 sous-bassins versants étudiés.

Bassin versant	Groupe piscicole cible	Longueur du tronçon franchissable le plus long (m)	Position du tronçon sur le bassin versant	Longueur totale du réseau (m)
BV 1	Salmonidés [5 - 15 cm] Petites espèces d'accompagnement	31 199 (77,6%)	Aval	40 199
	Autres groupes de salmonidés Grandes espèces d'accompagnement	34 349 (85,4%)	Aval	
BV 2	Salmonidés [5 - 15 cm] Salmonidés [15 - 30 cm] Salmonidés [30 - 50 cm] Salmonidés [50 - 80 cm] Grandes espèces d'accompagnement Petites espèces d'accompagnement	20 510 (42,2%)	Intermédiaire	48 559
BV 5	Tous groupes cibles	9 626 (34,1%)	Amont	28 150
BV6	Salmonidés [5 - 15 cm] Petites et Grandes espèces d'accompagnement	31 440 (42,7%)	Intermédiaire	73 582
	Salmonidés [15 - 30 cm] Salmonidés [30 - 50 cm] / [50 - 80 cm]	35 593 (48,3%) 34 440 (46,8%)		

6 Discussion

La présente étude caractérise la fragmentation des habitats piscicoles engendrée par les traverses de cours d'eau en contexte minier. Bien que quelques chercheurs se soient déjà intéressés à cette thématique au stade de l'étude d'impact (Kravitz *et al.*, 2019), il s'agit à notre connaissance de la première étude qui se focalise sur la fragmentation des habitats aquatiques existante, à l'échelle d'un territoire. L'étude de la fragmentation des habitats aquatiques constitue toutefois un axe de recherche majeur depuis plusieurs années, mais les efforts de recherche se sont principalement sur les réseaux de transport les plus communs comme les routes (Gibson *et al.*, 2005; Price *et al.*, 2010) ou les chemins forestiers (Poplar-Jeffers *et al.*, 2009; Warren Jr *et al.*, 1998).

Franchissabilité et variables limitantes :

Sur les 27 traverses composées de ponceaux caractérisées dans cette étude, entre 52% et 74% des sites présentent un impact sur le libre passage du poisson selon les groupes considérés (Indice ICE \neq 1). Ce constat est d'autant plus alarmant que 34% à 55% des sites obtiennent un indice ICE=0 et sont donc infranchissables à la montaison, hors période hydrologique exceptionnelle. Cet impact des ponceaux sur le libre passage des poissons identifiés sur le territoire d'étude est similaire à celui caractérisé pour d'autres réseaux de transports routiers. Des taux relevés entre 30% (Price *et al.*, 2010) et 50% (Gibson *et al.*, 2005; Langill *et al.*, 2002) ont ainsi été identifiés à l'aide de filtre décisionnel à la fois pour des salmonidés et d'autres espèces piscicoles. Des résultats similaires ont également été rapportés sur le franchissement des tacons de saumon atlantique dans 4 rivières du Québec en utilisant le filtre de Coffman (Gagnon-Poiré, 2017). Dans le cas de ponceaux à fortes pentes, des taux supérieurs à 90% d'ouvrages infranchissables pour l'omble de fontaine, *Salvelinus fontinalis*, ont également été rapportés par Poplar-Jeffers *et al.* (2009), mais ces caractéristiques excèdent largement celles des ouvrages de notre territoire d'étude.

Compte tenu de la très forte variabilité des caractéristiques des ponceaux utilisés sur les différents réseaux de transport, la fragmentation des habitats n'a pu être associée à certains types d'infrastructures particulières. Les résultats indiquent que le franchissement piscicole est principalement pénalisé à l'intérieur des ouvrages, par la présence de tirants d'eau insuffisants ou d'une vitesse moyenne de l'écoulement trop élevée. La problématique de tirants d'eau insuffisants concerne jusqu'à 63% des ouvrages étudiés et pénalise majoritairement les individus de grandes tailles. Ce phénomène est notamment rapporté par Gibson *et al.* (2005)

pour près de 36% des sites lors de leur inventaire des traverses de cours d'eau nouvellement créées sur l'autoroute TransLabrador. Il apparaît notamment en période d'étiage (Kozarek *et al.*, 2021) et concerne également les milieux tropicaux (Makrakis *et al.*, 2012). Au contraire, les vitesses d'écoulement moyennes importantes pénalisent majoritairement les petites espèces aux performances de nage plus faibles (Gibson *et al.*, 2005). Dans notre étude, la présence de sites avec une chute aval supérieure à 0,10 m concerne près de un quart (26%) des traverses composées de ponceaux. Leur configuration est majoritairement défavorable au passage du poisson au niveau de la profondeur de la fosse de dissipation, de la configuration du jet ou de la hauteur de chute. Ces variables sont reconnues pour entraîner un blocage en pied des ouvrages (Gibson *et al.*, 2005, Price *et al.*, 2010), mais la littérature scientifique reste limitée sur ce sujet. Les travaux de Ficke *et al.* (2011) ont par ailleurs démontré l'impact significatif de chutes verticales même de faibles hauteurs (>0,05 m) sur des petites espèces d'accompagnement des grandes plaines américaines.

Au regard des faibles chroniques de débit disponible sur le territoire d'étude, il est difficile d'analyser finement l'hydrologie. L'évaluation du franchissement piscicole a été réalisée dans une seule condition hydrologique du 18 au 25 août 2022, dans des conditions hydrologiques qui semblent correspondre à une situation de d'étiage estival modéré. Dans les régions nordiques du Québec, la reproduction des salmonidés s'étale de la fin du mois d'août au mois d'octobre (Albert, 1993) tandis que celle des espèces d'accompagnement a lieu au printemps (Dion *et al.* 1994). Le diagnostic a donc eu lieu dans la tranche basse des conditions qui peuvent être affrontées par les géniteurs de salmonidés lors de leur migration pour la reproduction. Une projection des critères pénalisants dans d'autres conditions hydrologiques que celles du diagnostic permet toutefois d'anticiper une problématique persistante pour le franchissement piscicole. En effet, l'augmentation des conditions hydrologiques est synonyme d'un accroissement à la fois du tirant d'eau et de la vitesse moyenne d'écoulement dans les ponceaux (Johnson *et al.*, 2012). Si le tirant d'eau est insuffisant pour la nage (*grands salmonidés* et *grandes espèces d'accompagnement* majoritairement), une amélioration du franchissement pourrait survenir dans de plus fortes conditions hydrologiques. Toutefois la vitesse moyenne d'écoulement pourrait alors devenir limitante. Pour les plus petites espèces, la vitesse constituait déjà la variable bloquante prédominante et donc l'ouvrage reste infranchissable. Au contraire, les conditions d'étiage favorisent une diminution de la vitesse moyenne d'écoulement et du tirant d'eau. Le passage des plus petites espèces pourrait être favorisé pour le critère vitesse, mais un blocage au niveau du tirant d'eau serait alors à prévoir pour de nombreux ouvrages puisque cette variable était proche des valeurs seuils lors des

inventaires. À l'échelle du Québec, la région hydrologique de la Baie d'Ungava se caractérise toutefois par des débits d'étiages automnaux plus élevés que dans les régions du sud (Daigle *et al.*, 2011) et la projection en situation d'étiage est donc moins susceptible de se produire au moment de la reproduction des salmonidés.

Cette approche souligne l'intérêt d'une prise en compte des juvéniles de salmonidés et des espèces d'accompagnement, groupes historiquement moins étudiés dans l'étude du passage du poisson (Franklin *et al.*, 2019). Dans cette étude, l'ajout des juvéniles de salmonidé et des petites espèces d'accompagnement entraînent une réduction de 15 et 22 % de la part des ouvrages franchissables sans impact, comparativement aux différents groupes de salmonidés adultes. La prise en compte des espèces d'accompagnement souligne également l'impact systématique des chutes aval à jet plongeant comparativement aux salmonidés adultes soit près de 21 % des sites caractérisés. La complexité de cette problématique réside dans la différenciation des variables qui affectent le franchissement puisque l'amélioration des conditions de passage pour certains groupes cibles se fait au détriment de variables pénalisantes pour les autres (Goodrich *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2018). Il est donc nécessaire d'intégrer différentes classes d'âge et différentes espèces de poisson dans l'étude et la restauration de la fragmentation des habitats (Birnie-Gauvin *et al.*, 2019).

L'utilisation des filtres pour la caractérisation du franchissement piscicole présente toutefois une importante variabilité avec le franchissement réel (Goerig *et al.*, 2016; Rogers *et al.*, 2021). La prise en compte de la vitesse moyenne d'écoulement ne tient en effet pas compte du comportement de recherche des zones de faibles vitesses (Peterson *et al.*, 2013) ni de la progression irrégulière des poissons (Constantin, 2017) lors de la traversée d'un ponceau. Cette approche ne tient également pas compte de l'impact du comportement et de la motivation des poissons à franchir un ouvrage hydraulique (Goerig *et al.*, 2017b). Malgré tout, il s'agit d'un outil pertinent pour la caractérisation d'ouvrages hydrauliques à large échelle et la priorisation d'actions de restauration.

Estimation de la fragmentation des habitats :

L'estimation de la surface d'habitat est basée sur l'utilisation de la largeur mouillée mesurée aux abords directs des ponceaux et la superficie totale des lacs présents sur les différents réseaux hydrographiques. De manière générale, la largeur mouillée diminue vers l'amont du réseau hydrographique et de ce fait la quantité d'habitats inaccessibles est surestimée notamment en tête de bassin versant. Par ailleurs, l'habitat dans les lacs est utilisé différemment selon les espèces (Keast *et al.*, 1978) et la période de l'année (Douglas *et al.*, 2009). L'utilisation de la

superficie totale des lacs dans le calcul constitue donc un second axe de surestimation. Enfin, la quantité d'habitats inaccessibles n'indique pas que l'ensemble constitue un habitat adéquat et exploitable pour les espèces considérées, notamment en tête des bassins versants. Afin de pallier à l'absence de prise en compte de l'effet cumulatif des ponceaux (Kemp *et al.*, 2010), les indices de fragmentation ont été développés pour modéliser cet impact à l'échelle de bassins versants (Cote *et al.*, 2008 ; Braco, 2014). Leur utilisation est notamment préconisée pour cibler les ouvrages à privilégier afin de maximiser les gains associés aux actions de restauration de la connectivité à l'échelle de réseaux hydrographiques (McKay *et al.*, 2017).

État structurel des ponceaux :

Sur le territoire d'étude, 86% des ponceaux présentent un état structurel dégradé par la présence de défauts majeurs multiples. Ce mauvais état s'explique notamment par la période de création des mines de Schefferville il y a environ 70 ans. La durée de vie effective des ponceaux TTO, habituellement comprise entre 15 et 50 ans (Gillespie *et al.*, 2014; Levine *et al.*, 2013; Manual, 2002), est donc largement excédée sur le territoire. L'usure des matériaux par différents facteurs environnementaux impacte principalement la structure à la fin de la durée de vie utile de l'ouvrage (Schall, 2012), bien qu'il existe également un risque élevé de défauts durant les premières années d'installations suite à l'utilisation de matériaux défectueux ou d'une mauvaise conception (Najafi *et al.*, 2021). Dans le nord du Québec, la proportion d'ouvrages défectueux pourrait être encore plus importante que celle constatée sur le site en raison du contexte de pergélisol (Périer *et al.*, 2015). Cette vulnérabilité des ponceaux nordiques aux déformations est renforcée par le tassement des terrains associé au contexte de réchauffement climatique (L'Hérault *et al.*, 2012). L'absence d'entretien constitue également un facteur d'aggravation de l'état structurel des ponceaux. Sur le territoire, les deux sites qui ont fait l'objet de réparation ont été entièrement remplacés bien que la réparation des ouvrages TTOG par gainage constitue pourtant une alternative souvent considérée plus avantageuse que le remplacement (Syachrani *et al.*, 2010). La présence d'embâcles majeurs sur 7 sites constitue également un marqueur de cette absence d'entretien. L'exposition des ponceaux aux embâcles est un phénomène reconnu qui peut notamment entraîner une perte de capacité hydraulique par rapport au débit de conception en l'absence d'entretien (Goodridge *et al.*, 2011; Schall, 2012) et engendrer des conséquences préjudiciables sur la qualité des habitats aquatiques (Julien *et al.*, 2006; Louhi *et al.*, 2011; Paradis-Lacombe *et al.*, 2016; Rinella *et al.*, 2003). Il est intéressant de noter que sur le territoire d'étude, l'absence d'embâcles n'est pas favorisée par la présence de ponceaux simples ou surdimensionnés comme cela a pu être souligné dans

d'autres études (Gillespie *et al.*, 2014). Ce constat est partiellement expliqué par la nature singulière des embâcles piégés sur les ponceaux de grands diamètres tels qu'un barrage de castor ou des madriers en bois d'origine anthropique.

Malgré la superficie couverte par cette étude, le nombre d'ouvrages caractérisés reste limité ce qui impacte la puissance des tests statistiques effectués. Le principal frein à une caractérisation extensive des traverses de cours d'eau concerne l'accès aux territoires de mines en activités. L'aspect sécuritaire pour l'accès aux traverses est à ce titre avancé par les exploitants. Les approches de caractérisations informatisées à l'aide de l'imagerie LIDAR pourraient permettre de contourner cette problématique (Arsenault *et al.*, 2022), mais ces données sont encore indisponibles pour la majorité du Québec septentrional. Avec près de 10 millions d'hectares de terres québécoises classées sous titres d'exploration et les enjeux désormais reconnus que représente la fragmentation des habitats piscicoles, l'accès aux territoires miniers pour l'étude du passage du poisson devrait faire l'objet d'une politique prioritaire, notamment par le Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts (MRNF).

7 CONCLUSION

La localisation et l'identification des traverses de cours d'eau qui impactent le passage du poissons ont un préalable indispensable à la planification des actions de restauration. Les résultats de ce projet participent à compléter les connaissances sur cette problématique de la fragmentation des habitats, en se concentrant sur une activité faiblement documentée : les infrastructures de transport minier.

Les mines requièrent des réseaux de transport extensifs et spécialisés pour l'ensemble des stades de développement de l'activité. Sur le territoire d'étude, les traverses de cours d'eau sont presque exclusivement composées de ponceaux, complétées par quelques traverses à gué. Les ponceaux présentent des disparités structurelles selon le réseau de transport considéré, mais ce constat reste modéré par l'importante variabilité des infrastructures sur le territoire. Les ponceaux analysés sont dans un état structurel défectueux sur la majorité du territoire, engendré principalement par une absence d'entretien global des infrastructures de transport à l'issue de l'exploitation. Pourtant, certains de ces réseaux sont toujours utilisés pour accéder à des sites miniers actifs et offrent des voies d'accès au territoire pour les communautés locales. L'utilisation du filtre décisionnel développé par Baudoin *et al.* (2014) indique qu'environ 50% des ponceaux du territoire impactent significativement la libre circulation de l'ensemble des stades de développement et des espèces cibles présentes sur le territoire. Cet impact sur l'ensemble des communautés piscicoles est susceptible d'impacter la pérennité d'écosystèmes diversifiés (Bunt *et al.*, 2012). Des vitesses d'écoulement moyennes excédant les performances de nage des espèces considérées, des tirants d'eau insuffisants ou la présence d'une chute en aval des ouvrages, pénalisent le franchissement piscicole. La répartition d'ouvrages bloquants sur l'ensemble des bassins versants entraîne jusqu'à une perte d'habitats piscicole conséquente qui représente jusqu'à 66% de la surface totale du réseau hydrographique.

Sur les mines aujourd'hui inactives, il est urgent de quantifier l'impact de l'absence de restauration après l'arrêt de l'activité minière. Une comparaison avec des territoires qui ont fait l'objet de plans de réhabilitation à l'issue de l'exploitation permettrait également de quantifier l'efficacité de ces actions sur la continuité des habitats. La préparation de ce projet a par ailleurs mis en avant les difficultés de coopérations pour l'accès aux mines actives. L'installation de ces traverses fait aujourd'hui l'objet d'une réglementation spécifique et la réalisation d'inventaires permettrait de valider le respect des installations vis-à-vis du libre passage du poisson. Gibson

et al. (2005) et Price *et al.* (2010) ont en effet démontré l'absence de conformité de nombreux ponceaux autorisés au regard du franchissement du poisson. Dans ce contexte, l'accès à ces mines devrait être appuyé par les institutions gouvernementales ou, pour les territoires concernés, par les communautés autochtones si ces problématiques rencontrent leurs intérêts.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Adams SB, Warren Jr ML (2005) Recolonization by warmwater fishes and crayfishes after severe drought in upper coastal plain hill streams. *Transactions of the American Fisheries Society* 134(5):1173-1192.
- Albert, E. (1989). Parasite acquisition in relation to brook trout *Salvelinus fontinalis* population structure in a subarctic lake.
- Arsenault M, O'Sullivan AM, Ogilvie J, Gillis C-A, Linnansaari T, Curry RA (2022) Remote sensing framework details riverscape connectivity fragmentation and fish passability in a forested landscape. *Journal of Ecohydraulics* :1-12.
- Azevedo-Santos VM, Arcifa MS, Brito MF, Agostinho AA, Hughes RM, Vitule JR, Simberloff D, Olden JD, Pelicice FM (2021) Negative impacts of mining on Neotropical freshwater fishes. *Neotropical Ichthyology* 19.
- Baras E (1992) Etude des stratégies d'occupation du temps et de l'espace chez le barbeau fluviatile, *Barbus barbus* (L.). *Cahiers d'éthologie* 12(2-3).
- Barry J, Coghlan B, Cullagh A, Kerr JR, King JJ (2018) Comparison of coarse-resolution rapid methods for assessing fish passage at riverine barriers: ICE and SNIFFER protocols. *River Research and Applications* 34(9):1168-1178.
- Bates K, Bernard B, Heiner B, Klavas J, Powers P (2003) Design of road culverts for fish passage. Washington Department of Fish and Wildlife. 110 p.
- Baudoin J-M, Burgun V, Chanseau M, Larinier M, Ovidio M, Sremski W, Steinbach P, Voegtle B (2014) Informations sur la Continuité Ecologique-ICE-Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. Onema. 200 p.
- Beamish FW (1978) Swimming capacity. *Fish physiology* 7:101-187.
- 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 (2008a) The effect of road crossings on fish movements in small Etowah Basin streams. *Southeastern Naturalist* 7(2):301-310.
- Benton PD, Ensign WE, Freeman BJ (2008b) The effect of road crossings on fish movements in small Etowah Basin streams. *Southeastern Naturalist* :301-310.
- Bernatchez L, Giroux M (2000) Les poissons d'eau douce du Québec et leur distribution dans l'est du Canada. *Éditions Broquet Inc* 350 p.
- Birnie-Gauvin K, Franklin P, Wilkes M, Aarestrup K (2019) Moving beyond fitting fish into equations: Progressing the fish passage debate in the Anthropocene. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 29(7):1095-1105.
- Bourne CM, Kehler DG, Wiersma YF, 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 J (1964) The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 21(5):1183-1226.

- Briggs AS, Galarowicz TL (2013) Fish Passage through Culverts in Central Michigan Warmwater Streams. *North American Journal of Fisheries Management* 33(3):652-664.
- Bunt C, Castro-Santos T, Haro A (2012) Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration. *River Research and Applications* 28(4):457-478.
- Bunt C, Castro-Santos T, Haro A (2016) Reinforcement and validation of the analyses and conclusions related to fishway evaluation data from Bunt *et al.*: 'Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration'. *River Research and Applications* 32(10):2125-2137.
- Burford DD, McMahon 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 (2005) Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes. *Journal of Experimental Biology* 208(3):421-432.
- 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.
- Chanson H (2020) Low-Velocity Zone in Smooth Pipe Culvert with and without Streamwise Rib for Fish Passage. *Journal of Hydraulic Engineering* 146(9):04020059.
- Chow VT (1959) Open-channel hydraulics. Caldwell. (New Jersey, USA: The Blackburn Press).
- Clarkin K, Connor A, Furniss MJ, Gubernick B, Love M, Moynan K, Musser SW (2005) National Inventory and Assessment Procedure. *US Department of Agriculture Forest Service National Technology and Development Program. San Dimas, California.*
- Coffman J (2005) *Evaluation of a predictive model for upstream fish passage through culverts.* (Master's thesis. James Madison University, Harrisonburg, Virginia).
- Constantin P-M (2017) *Analyse du comportement spatial de l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis) dans un ponceau ondulé par suivi vidéo à éclairage infrarouge.* (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- Cooke SJ, Bunt CM, Hamilton SJ, Jennings CA, Pearson MP, Cooperman MS, Markle DF (2005) Threats, conservation strategies, and prognosis for suckers (Catostomidae) in North America: insights from regional case studies of a diverse family of non-game fishes. *Biological Conservation* 121(3):317-331.
- Cote D, Kehler DG, Bourne C, Wiersma YF (2009) A new measure of longitudinal connectivity for stream networks. *Landscape Ecology* 24:101-113.
- Daigle A, St-Hilaire A, Beveridge D, Caissie D, Benyahya L (2011) Multivariate analysis of the low-flow regimes in eastern Canadian rivers. *Hydrological Sciences Journal* 56(1):51-67.
- Diebel M, Fedora M, Cogswell S, O'Hanley J (2015) Effects of road crossings on habitat connectivity for stream-resident fish. *River Research and Applications* 31(10):1251-1261.

- Dion, R., Richardson, M., Roy, L., & Whoriskey, F. G. (1994). Spawning patterns and interspecific matings of sympatric white (*Catostomus commersoni*) and longnose (*C. catostomus*) suckers from the Gouin Reservoir system, Quebec. *Canadian Journal of Zoology*, 72(2), 195-200.
- Direction des normes et des documents d'ingénierie du ministère des Transports du Québec (2019) Manuel d'inspection des ponceaux.).
- Douglas J, Hunt T, Aberly N, Allen M (2009) Application of GIS modelling to quantify fish habitats in lakes. *Lakes & Reservoirs: Research & Management* 14(2):171-174.
- 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.
- Duguay J, Foster B, Lacey J, Castro-Santos T (2018) Sediment infilling benefits rainbow trout passage in a baffled channel. *ecological engineering* 125:38-49.
- Enders EC, Boisclair D, Roy AG (2003) The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60(9):1149-1160.
- Enders EC, Boisclair D, Roy AG (2005) A model of total swimming costs in turbulent flow for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62(5):1079-1089.
- Fahlbusch F (1994) Scour in rock riverbeds downstream of large dams. *Reprint from Hydropower & Dams, pp 30-32, 1994.*
- Ficke A, Myrick C, Jud N (2011) The swimming and jumping ability of three small Great Plains fishes: implications for fishway design. *Transactions of the American Fisheries Society* 140(6):1521-1531.
- Frankiewicz P, Radecki-Pawlik A, Wałęga A, Łapińska M, Wojtal-Frankiewicz A (2021) Small hydraulic structures, big environmental problems: is it possible to mitigate the negative impacts of culverts on stream biota? *Environmental Reviews* (ja).
- Franklin P, Gee E (2019) Living in an amphidromous world: perspectives on the management of fish passage from an island nation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 29(9):1424-1437.
- Fuller MR, Doyle MW, Strayer DL (2015) Causes and consequences of habitat fragmentation in river networks. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1355(1):31-51.
- Furniss M, Love M, Firor S, Moynan K, Llanos A, Guntle J, Gubernick R (2006) FishXing, version 3.0. *US Forest Service, Corvallis, Oregon.*
- Gagnon-Poiré R (2017) *Fragmentation de l'habitat du saumon atlantique (Salmo salar) par les ponceaux routiers et forestiers.* (Institut National de la Recherche Scientifique (Canada)).
- Galia T, Šilhán K, Škarpich V (2017) The geomorphic impacts of culverts at paved forest roads: Examples from Carpathian headwater channels, Czech Republic. *Catena* 157:424-435.
- Gibson RJ, Haedrich RL, Wernerheim CM (2005) Loss of Fish Habitat as a Consequence of Inappropriately Constructed Stream Crossings. *Fisheries* 30(1):10-17.

- Gido KB, Hedden SC, Bruckerhoff LA, Pennock CA, Hedden CK, Hopper GW, Renner EA, Johnson ER, Postlethwait BJ (2023) A perched culvert and natural obstructions limit fish dispersal in an intermittent prairie stream. *Freshwater Science* 42(1):33-43.
- Gillespie N, Unthank A, Campbell L, Anderson P, Gubernick R, Weinhold M, Cenderelli D, Austin B, McKinley D, Wells S (2014) Flood effects on road–stream crossing infrastructure: economic and ecological benefits of stream simulation designs. *Fisheries* 39(2):62-76.
- Goerig E (2016) *Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis) à franchir les ponceaux*. (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- Goerig E, Bergeron NE, Castro-Santos T (2017a) Swimming behaviour and ascent paths of brook trout in a corrugated culvert. *River Research and Applications* 33(9):1463-1471.
- Goerig E, Castro-Santos T (2017b) 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.
- Goerig E, Wasserman BA, Castro-Santos T, Palkovacs EP (2020) Body shape is related to the attempt rate and passage success of brook trout at in-stream barriers. *Journal of Applied Ecology* 57(1):91-100.
- Goodrich HR, Watson JR, Cramp RL, Gordos MA, Franklin CE (2018) Making culverts great again. Efficacy of a common culvert remediation strategy across sympatric fish species. *ecological engineering* 116:143-153.
- Goodridge WH, Rahmeyer WJ (2011) Culvert design for flood routing considering sediment transport. *Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering*. Engineers Australia Barton, ACT, p 122-129.
- Gowan C, Young MK, Fausch KD, Riley SC (1994) Restricted movement in resident stream salmonids: a paradigm lost? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 51(11):2626-2637.
- Harris J, Kingsford R, Peirson W, Baumgartner L (2016) Mitigating the effects of barriers to freshwater fish migrations: The Australian experience. *Marine and Freshwater Research* 68(4):614-628.
- Hotchkiss RH, Frei CM (2007) *Design for fish passage at roadway-stream crossings: synthesis report*. United States. Federal Highway Administration, p
- Jackson SD (2003) Ecological considerations in the design of river and stream crossings. *International Conference on Ecology and Transportation*. North Carolina State University, p 24-29.
- James A, Joy M (2008) *A preliminary assessment of potential barriers to fish migration in the Manawatu River catchment, North Island, New Zealand*. Citeseer,
- Januchowski-Hartley SR, McIntyre PB, Diebel M, Doran PJ, Infante DM, Joseph C, Allan JD (2013) Restoring aquatic ecosystem connectivity requires expanding inventories of both dams and road crossings. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11(4):211-217.

- Johnson GE, Pearson WH, Southard SL, Mueller RP (2012) Upstream movement of juvenile coho salmon in relation to environmental conditions in a culvert test bed. *Transactions of the American Fisheries Society* 141(6):1520-1531.
- Johnson K, Wait L, Monk S, Rader R, Hotchkiss R, Belk M (2019) Effects of Substrate on Movement Patterns and Behavior of Stream Fish through Culverts: An Experimental Approach. *Sustainability* 11(2).
- Julien H, Bergeron N (2006) Effect of fine sediment infiltration during the incubation period on Atlantic salmon (*Salmo salar*) embryo survival. *Hydrobiologia* 563(1):61.
- Jutras, S., Paradis-Lacombe, P., Ferland, O., Gilbert, K., Grenier, A-A., Goerig, E. et Bergeron, N.É. 2022. Guide de saines pratiques pour les chemins forestiers à faible utilisation – Stratégies de gestion et de mise en application. Université Laval. Québec, Québec, Canada. 80 pages.
- Katopodis C, Gervais R (2016) *Fish swimming performance database and analyses*. Canadian Science Advisory Secretariat (CSAS),
- Ke S, Tu Z, Tan J, Liu D, Sun S, Shi X (2020) Effects of obstacles and flow velocity on locomotory behavior in juvenile, silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*. *River Research and Applications*.
- Keast A, Harker J, Turnbull D (1978) Nearshore fish habitat utilization and species associations in Lake Opinicon (Ontario, Canada). *Environmental biology of fishes* 3:173-184.
- Kemp P, O'hanley J (2010) Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis. *Fisheries Management and Ecology* 17(4):297-322.
- Kerr JR, Manes C, Kemp PS (2016) Assessing hydrodynamic space use of brown trout, *Salmo trutta*, in a complex flow environment: a return to first principles. *Journal of Experimental Biology* 219(21):3480-3491.
- Kimberling J (2005) Indigenous peoples and the oil frontier in Amazonia: The case of Ecuador, ChevronTexaco, and Aguinda v. Texaco. *NYUJ Int'l. L. & Pol.* 38:413.
- King S, O'Hanley JR, Newbold LR, Kemp PS, Diebel MW (2017) A toolkit for optimizing fish passage barrier mitigation actions. *Journal of Applied Ecology* 54(2):599-611.
- Kondratieff MC, Myrick CA (2006) How high can brook trout jump? A laboratory evaluation of brook trout jumping performance. *Transactions of the American Fisheries Society* 135(2):361-370.
- Kozarek J, Herb W, Bentelspacher N (2021) Assessing Culverts in Minnesota: Fish Passage and Storm Vulnerability.
- Kravitz M, Blair G (2019) On Assessing Risks to Fish Habitats and Populations Associated with a Transportation Corridor for Proposed Mine Operations in a Salmon-rich Watershed. *Environ Manage* 64(1):107-126.
- L'Hérault E, Allard M, Barrette C, Doré G, Sarrazin D (2012) Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour les aéroports du MTQ au Nunavik, Rapport d'étape 1: État d'avancement du projet et résultats préliminaires. *Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 71pp.*
- Langill DA, Zamora PJ (2002) An audit of small culvert installations in Nova Scotia: habitat loss and habitat fragmentation.

- Larinier M (2002) Fish passage through culverts, rock weirs and estuarine obstructions. *Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture* (364):119-134.
- Lauritzen D, Hertel F, Gordon M (2005) A kinematic examination of wild sockeye salmon jumping up natural waterfalls. *Journal of Fish Biology* 67(4):1010-1020.
- Lauritzen D, Hertel F, Jordan LK, Gordon M (2010) Salmon jumping: behavior, kinematics and optimal conditions, with possible implications for fish passageway design. *Bioinspiration & Biomimetics* 5(3):035006.
- Levine J, Keene Valley N (2013) An economic analysis of improved road-stream crossings. *The Nature Conservancy, Keene Valley, New York*.
- Liao JC, Beal DN, Lauder GV, Triantafyllou MS (2003) Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science* 302(5650):1566-1569.
- Louhi P, Ovaska M, Mäki-Petäys A, Erkinaro J, Muotka T (2011) Does fine sediment constrain salmonid alevin development and survival? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 68(10):1819-1826.
- Lucas M, Baras E (2008) *Migration of freshwater fishes*. John Wiley & Sons,
- Lupandin A (2005) Effect of flow turbulence on swimming speed of fish. *Biology Bulletin* 32(5):461-466.
- MacPherson LM, Sullivan MG, Foote AL, Stevens CE (2012) Effects of culverts on stream fish assemblages in the Alberta foothills. *North American Journal of Fisheries Management* 32(3):480-490.
- 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.
- 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.
- Manual HD (2002) New York State Department of Transportation. (April).
- McCleary RJ, Hassan MA (2008) Predictive modeling and spatial mapping of fish distributions in small streams of the Canadian Rocky Mountain foothills. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 65(2):319-333.
- McCormick FH, Hughes RM, Kaufmann PR, Peck DV, Stoddard JL, Herlihy AT (2001) Development of an index of biotic integrity for the Mid-Atlantic Highlands region. *Transactions of the American Fisheries Society* 130(5):857-877.
- McKay S, Cooper A, Diebel M, Elkins D, Oldford G, Roghair C, Wieferich D (2017) Informing watershed connectivity barrier prioritization decisions: a synthesis. *River Research and Applications* 33(6):847-862.
- Meixler MS, Bain MB, Walter MT (2009) Predicting barrier passage and habitat suitability for migratory fish species. *Ecological Modelling* 220(20):2782-2791.
- Mueller RP, Southard SS, May CW, Pearson WH, Cullinan VI (2008) Juvenile coho salmon leaping ability and behavior in an experimental culvert test bed. *Transactions of the American Fisheries Society* 137(4):941-950.
- Najafi M, Gokhale S, Calderón DR, Ma B (2021) *Trenchless technology: Pipeline and utility design, construction, and renewal*. McGraw-Hill Education,

- Nathan LR, Smith AA, Welsh AB, Vokoun JC (2018) Are culvert assessment scores an indicator of Brook Trout *Salvelinus fontinalis* population fragmentation? *Ecological Indicators* 84:208-217.
- Newbold L, Kemp P (2015) Influence of corrugated boundary hydrodynamics on the swimming performance and behaviour of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*). *ecological engineering* 82:112-120.
- Nislow KH, Hudy M, Letcher BH, Smith EP (2011) Variation in local abundance and species richness of stream fishes in relation to dispersal barriers: implications for management and conservation. *Freshwater Biology* 56(10):2135-2144.
- Ojanguren A, Brana F (2003) Effects of size and morphology on swimming performance in juvenile brown trout (*Salmo trutta* L.). *Ecology of Freshwater Fish* 12(4):241-246.
- Paradis-Lacombe P, Jutras S (2016) État et durabilité des traverses de cours d'eau sur les chemins forestiers. *Fondation de la faune du Québec*.
- Pavlova A, Beheregaray LB, Coleman R, Gilligan D, Harrisson KA, Ingram BA, Kearns J, Lamb AM, Lintermans M, Lyon J (2017) Severe consequences of habitat fragmentation on genetic diversity of an endangered Australian freshwater fish: A call for assisted gene flow. *Evolutionary Applications* 10(6):531-550.
- Pearson WH, Richmond M, Johnson G, Sargeant S, Mueller R, Cullinan V, Deng Z, Dibrani B, Guensch G, May C (2005) *Protocols for evaluation of upstream passage of juvenile salmonids in an experimental culvert test bed*. Washington (State). Department of Transportation, p
- Pêches et Océans Canada (2016) Lignes directrices pour les traverses de cours d'eau au Québec.), p.73 + annexes.
- 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.
- Périer L, Doré G, Burn C (2015) Influence of water temperature and flow on thermal regime around culverts built on permafrost. *Proceedings of 68th Canadian Geotechnical Conference and 7th Conference on Permafrost, Quebec*.
- Peterson NP, Simmons RK, Cardoso T, Light JT (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.
- Petty JT, Lamothe PJ, Mazik PM (2005) Spatial and seasonal dynamics of brook trout populations inhabiting a central Appalachian watershed. *Transactions of the American Fisheries Society* 134(3):572-587.
- 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.
- Prenosil E, Koupal K, Grauf J, Schoenebeck C, Hoback WW (2016) Swimming and jumping ability of 10 Great Plains fish species. *Journal of Freshwater Ecology* 31(1):123-130.
- Price DM, Quinn T, Barnard RJ (2010) Fish Passage Effectiveness of Recently Constructed Road Crossing Culverts in the Puget Sound Region of Washington State. *North American Journal of Fisheries Management* 30(5):1110-1125.

- Richmond MC, Deng Z, Guensch GR, Tritico H, Pearson WH (2007) Mean flow and turbulence characteristics of a full-scale spiral corrugated culvert with implications for fish passage. *ecological engineering* 30(4):333-340.
- Rinella DJ, Bogan DL (2003) *Ecological Impacts of Three Lower Kenai Peninsula, Alaska, ATV Stream Fords*. Environment and Natural Resources Institute, University of Alaska Anchorage,
- Rodgers EM, Cramp RL, Gordos M, Weier A, Fairfall S, Riches M, Franklin CE (2014) Facilitating upstream passage of small-bodied fishes: linking the thermal dependence of swimming ability to culvert design. *Marine and Freshwater Research* 65(8):710-719.
- Rogers KM, Rummel SM, Lavelle KM, Duchamp JE, Niles JM, Janetski DJ (2021) A Comparison of Brook Trout Passage at Road Culverts to Broad-scale Assessment Criteria in a Pennsylvania Headwater Stream. *North American Journal of Fisheries Management*.
- Schall JD (2012) *Hydraulic design of highway culverts*. United States. Federal Highway Administration, p
- Shiau J, Watson JR, Cramp RL, Gordos MA, Franklin CE (2020) Interactions between water depth, velocity and body size on fish swimming performance: Implications for culvert hydrodynamics. *ecological engineering* 156:105987.
- Silva AT, Lucas MC, Castro-Santos T, Katopodis C, Baumgartner LJ, Thiem JD, Aarestrup K, Pompeu PS, O'Brien GC, Braun DC (2018) The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries* 19(2):340-362.
- Smith DL, Brannon EL, Odeh M (2005) Response of juvenile rainbow trout to turbulence produced by prismatic shapes. *Transactions of the American Fisheries Society* 134(3):741-753.
- Solà C, Ordeix M, Pou-Rovira Q, Sellarès N, Queralt A, Bardina M, Casamitjana A, Munné A (2011) Longitudinal connectivity in hydromorphological quality assessments of rivers. The ICF index: A river connectivity index and its application to Catalan rivers. *Limnetica* 30(2):0273-0292.
- Stuart T (1962) The leaping behavior of salmon and trout at falls and obstructions.
- Syachrani S, Jeong HSD, Rai V, Chae MJ, Iseley T (2010) A risk management approach to safety assessment of trenchless technologies for culvert rehabilitation. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25(6):681-688.
- Taguchi M, Liao JC (2011) Rainbow trout consume less oxygen in turbulence: the energetics of swimming behaviors at different speeds. *Journal of Experimental Biology* 214(9):1428-1436.
- Torterotot J-B, 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.
- Tritico HM, Cotel AJ (2010) The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*). *Journal of Experimental Biology* 213(13):2284-2293.
- Tudorache C, Viaenen P, Blust R, De Boeck G (2007) Longer flumes increase critical swimming speeds by increasing burst-glide swimming duration in carp *Cyprinus carpio*, L. *Journal of Fish Biology* 71(6):1630-1638.

- Van Leeuwen CH, Dalen K, Museth J, Junge C, Vøllestad LA (2018) Habitat fragmentation has interactive effects on the population genetic diversity and individual behaviour of a freshwater salmonid fish. *River Research and Applications* 34(1):60-68.
- Veronese A (1937) Erosion of a bed downstream from an outlet. *Colorado A & M College, Fort Collins, United States*.
- Wardle C (1980) Effects of temperature on the maximum swimming speed of fishes. *Environmental physiology of fishes*, Springer. p 519-531.
- Warren Jr ML, Pardew MG (1998) Road crossings as barriers to small-stream fish movement. *Transactions of the American Fisheries Society* 127(4):637-644.
- Watson JR, Goodrich HR, Cramp RL, Gordos MA, Franklin CE (2018) Utilising the boundary layer to help restore the connectivity of fish habitats and populations. *ecological engineering* 122:286-294.
- World Meteorological Organization (2008) Manual on Low-flow. Estimation and Prediction. (Operational Hydrology Report), p 136.

9 SITOGRAPHIE

Entreprise Québec [En ligne]. Industrie minière Québécoise : <https://www.gouv.qc.ca/> (Consulté le 18 mai 2023).

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs [En ligne]. Guide d'application du Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'état, Gouvernement du Québec : <https://mffp.gouv.qc.ca/RADF/guide/> (Consulté le 18 mai 2023).

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts [En ligne a]. Étapes du projet minier : <https://mrnf.gouv.qc.ca/> (Consulté le 18 mai 2023).

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts [En ligne b]. Histoire de l'industrie minière : <https://mrnf.gouv.qc.ca/> (Consulté le 18 mai 2023).

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts [En ligne c]. Titres miniers : <https://mrnf.gouv.qc.ca/> (Consulté le 16 mars 2022).

MiraNor [en ligne] : <http://miranor.inrs.ca/> (Consulté le 18 mai 2023).

Statistique Québec [En ligne]. Mines en chiffres : <https://www.statistique.quebec.ca/> (Consulté le 18 mai 2023).

Transports Québec [En ligne]. Projets et infrastructures : <https://www.transports.gouv.qc.ca/> (Consulté le 18 mai 2023).

10 ANNEXES

Annexe I : Approximation de la profondeur de fosse minimale nécessaire au franchissement d'une chute en aval d'un ponceau– adapté de Baudoin *et al.* (2014)

Chute DH (m)	Hauteur de fosse minimale (Hfmin)
]0,10 - 0,20]	0,30 m
]0,20- 0,30]	0,45 m
]0,30- 0,40]	0,55 m
]0,40 – 0,50]	0,65 m
]0,50 – 0,60]	0,70 m
]0,60 – 0,70]	0,75 m
]0,70 – 0,80]	0,85 m
]0,80 – 0,90]	0,90 m
]0,90 – 1,00]	0,95 m
]1,00 – 1,20]	1,00 m
]1,20 – 1,40]	1,10 m
]1,40 – 1,60]	1,20 m
]1,60 – 1,80]	1,25 m
]1,80 – 2,00]	1,35 m
> 2,00	1,40 m

Annexe II : Tirants d'eau minimums nécessaires pour la nage – adapté de Baudoin *et al.* (2014)

Groupe cible	Classe de taille	Tirant d'eau minimum (hmin)
Petites espèces d'accompagnement	[4 – 14 cm]	0,05 m
Grandes espèces d'accompagnement	[18 – 50 cm]	0,10 m
Salmonidés	[5 – 15 cm]	0,05 m
	[15 – 30 cm]	
	[30 - 50 cm]	0,10 m
	[50 – 80 cm]	0,20 m

Annexe III : Coefficients retenus pour le calcul des vitesses de sprint et valeurs seuils de chute Coefficients retenus pour le calcul des vitesses de sprint des différentes espèces cibles

Groupe cible	Groupement issu de Katopodis (2016)	Coefficient K	Coefficient b
Petites espèces d'accompagnement	Groupe Saumon et doré	3,8347	-0,2444
Grandes espèces d'accompagnement	Genre Catostomus	4,3459	-0,2373
Salmonidés	Groupe Salmonidae	3,5839	-0,2458

Valeurs seuils de chute pour les espèces sauteuses : configuration de jet plongeant

Groupe cible	Classes de taille	Vitesses de sprint Umax (m/s)			Valeurs seuils de chute (m)			
		Min	Moy	Max	Classes ICE			
					1	0,66	0,33	0
Salmonidés	[5 – 15 cm]	0,95	1,45	1,85	< 0,05	] 0,05 – 0,15]	] 0,15 – 0,20]	> 0,20
	[15 – 30 cm]	1,85	2,40	2,85	< 0,20	] 0,20 – 0,35 ]	] 0,35 – 0,45]	> 0,45
	[30 - 50 cm]	2,85	3,40	3,90	< 0,45	] 0,45 – 0,65 ]	] 0,65 – 0,85]	> 0,85
	[50 – 80 cm]	3,90	4,60	5,25	< 0,85	] 0,85 – 1,15]	] 1,15 – 1,45]	>1,45

Valeurs seuils de chute pour les espèces non sauteuses : configuration de jet de surface ou quasi de surface

Groupe cible	Classes de taille	Vitesses de sprint Umax (m/s)			Valeurs seuils de chute (m)			
		Min	Moy	Max	Classes ICE			
					1	0,66	0,33	0
Petites espèces d'accompagnement	[4 – 14 cm]	0,85	1,45	1,90	< 0,05	] 0,05 – 0,10 ]	] 0,10 – 0,20]	> 0,20
Grandes espèces d'accompagnement	[18 – 50 cm]	2,60	3,85	4,75	< 0,35	] 0,35 – 0,75 ]	] 0,75 – 1,20]	> 1,20

Annexe IV : Coefficients retenus pour le calcul des performances de nage et classes de franchissabilité en fonction de la vitesse d'écoulement

Coefficients retenus pour le calcul des performances de nage des différentes espèces cibles

Groupe cible	Groupement issu de Katopodis (2016)	Coefficient M	Coefficient a
Petites espèces d'accompagnement	Groupe Saumon et doré	36,2197	-3,4002
Grandes espèces d'accompagnement	Genre Catostomus	48,5386	-3,2141
Salmonidés	Groupe Salmonidae	18,6057	-3,0675

Valeurs seuils de vitesses d'écoulement pour les ouvrages hydrauliques compris entre 5 et 15 m

		Valeurs seuils de chute (m)							
Espèces	Classes de taille (cm)	5 m <L _{ouvrage} < 10 m				10 m <L _{ouvrage} < 15 m			
		Classes ICE				Classes ICE			
		1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0
Petites espèces d'accompagnement	[4 – 14]	< 0,35	] 0,35 – 0,70]	] 0,70 – 0,95]	>0,95	< 0,30	] 0,30 – 0,60]	] 0,60 – 0,85]	> 0,85
Grandes espèces d'accompagnement	[18 – 50]	<1,25	] 1,25 – 2,15]	] 2,15 – 2,90]	>2,90	<1,10	] 1,10 – 1,90]	] 1,90 – 2,55]	>2,55
Salmonidés	[5 – 15]	<0,30	] 0,30 – 0,55]	] 0,55 – 0,80]	>0,80	< 0,30	] 0,30 – 0,50]	] 0,50 – 0,70]	>0,70
	[15 – 30]	<0,80	] 0,80 – 1,10]	] 1,10 – 1,40]	>1,40	< 0,70	] 0,80 – 1,00]	] 1,00 – 1,25]	>1,25
	[30 - 50]	<1,40	] 1,40 – 1,80]	] 1,80 – 2,15]	>2,15	<1,25	] 1,25 – 1,60]	] 1,60 – 1,90]	> 1,90
	[50 – 80]	<2,15	] 2,15 – 2,70]	] 2,70 – 3,20]	>3,20	<1,90	] 1,90 – 2,35]	] 2,35 – 2,80]	>2,80

Valeurs seuils de vitesses d'écoulement pour les ouvrages hydrauliques compris entre 15 et 25 m

Espèces	Classes de taille (cm)	Valeurs seuils de chute (m)							
		15 m <L _{ouvrage} < 20 m				20 m <L _{ouvrage} < 25 m			
		Classes ICE				Classes ICE			
		1	0,66	0,33	0	1	0,66	0,33	0
Petites espèces d'accompagnement	[4 – 14]	< 0,30	] 0,30 – 0,55]	] 0,55 – 0,80]	> 0,80	< 0,25	] 0,25 – 0,50]	] 0,50 – 0,75]	> 0,75
Grandes espèces d'accompagnement	[18 – 50]	<1,00	] 1,00 – 1,70]	] 1,70 – 2,35]	>2,35	<0,95	] 0,95– 1,30]	] 1,30 – 1,65]	>1,65
Salmonidés	[5 – 15]	<0,25	] 0,25 – 0,45]	] 0,45 – 0,65]	>0,65	< 0,25	] 0,25 – 0,40]	] 0,40 – 0,60]	>0,60
	[15 – 30]	<0,65	] 0,65 – 0,90]	] 0,90 – 1,15]	> 1,15	<0,60	] 0,60 – 0,85]	] 0,85 – 1,05]	> 1,05
	[30 - 50]	<1,15	] 1,15 – 1,45]	] 1,45 – 1,75]	> 1,75	<1,05	] 1,05 – 1,35]	] 1,35 – 1,60]	> 1,60
	[50 – 80]	<1,75	] 1,75 – 2,15]	] 2,15 – 2,55]	>2,55	<1,60	] 1,60 – 2,00]	] 2,00 – 2,35]	>2,35

Annexe V : Reportage photographique

Id : Bean 2

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 640409,028 / 6070958,629

Date : 19/08/2022



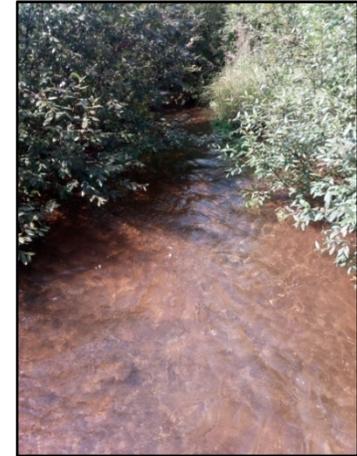
Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

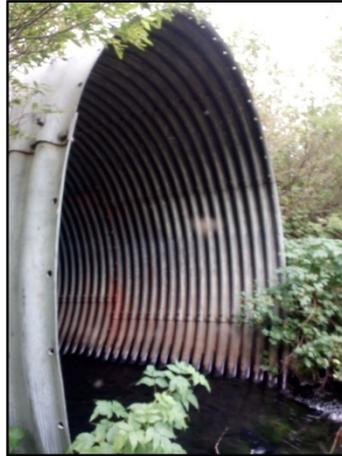
Id : Bean 4

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 641482,558 / 6070891,460

Date : 23/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Big Star 1

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 628985,241 / 6080303,229

Date : 21/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Big Star 3

Localisation (NAD83 /UTM 19N) 630260,677 / 6078829,425

Date : 23/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Big Star 4

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 630956,360 / 6078861,582

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Big Star 7

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 632309,262 / 6080370,671

Date : 20/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Big Star 8

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 632845,609 / 6081569,307

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Cosa 1

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 632195,349 / 6082068,078

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Cosa 2

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 632773,314 / 6082733,799

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Elizabeth

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 636112,922 / 6070514,003

Date : 23/08/2022

Ø



Ø

Cours d'eau en aval

Vue aval du ponceau

Vue amont du ponceau

Cours d'eau en amont

Id : Elizabeth0

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 636291,629 / 6070426,928

Date : 23/08/2022

Ø



Cours d'eau en aval

Vue aval du ponceau

Vue amont du ponceau

Cours d'eau en amont

Id : Elizabeth1

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 635748,821 / 6070670,183

Date : 20/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau

Ø

Cours d'eau en amont

Id : Elizabeth2

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 637093,264 / 6069961,026

Date : 20/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Lac en amont

Id : Elizabeth3

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 637643,971 / 6068782,180

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Flemming 0

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 630489,166 /6080978,521

Date : 21/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Fleming 2

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 629558,194 / 6081266,670

Date : 21/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau

Ø

Cours d'eau en amont

Id : Gemini 2

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 643953,350 / 6063486,015

Date : 19/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Green 1

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 638789,972 / 6068841,118

Date : 22/08/2021



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Juin 1

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 637953,229 / 6077431,984

Date : 23/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau

Ø

Cours d'eau en amont

Id : Paulette 1

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 644540,345 / 6065613,776

Date : 19/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Lac en amont

Id : Skirt 1

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 637581,100 / 6070387,722

Date : 20/08/2022



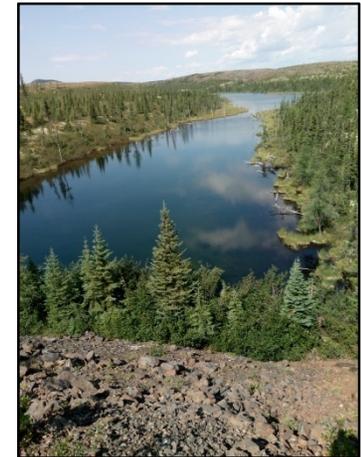
Lac en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Lac en amont

Id : Skirt 2

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 638360,791 / 6068751,321

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Slimmy 6

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 636912,528 / 6075327,768

Date : 19/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Lac puit de mine en amont

Id : Slimmy 9

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 638180,102 / 6074144,643

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Slimmy 10

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 639737,667 / 6072604,744

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Star 1

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 640200,616 / 6080177,933

Date : 21/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Wishart 0

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 639355,708 / 6065911,983

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Wishart 1

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 642302,646 / 6068069,576

Date : 19/08/2022



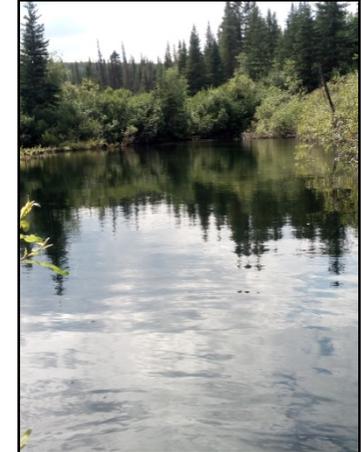
Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont

Id : Wishart 3

Localisation (NAD83 /UTM 19N) : 640666,939 / 6064966,415

Date : 22/08/2022



Cours d'eau en aval



Vue aval du ponceau



Vue amont du ponceau



Cours d'eau en amont
