

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

**ANALYSE DU COMPORTEMENT SPATIAL DE L'OMBLE DE FONTAINE  
(*SALVELINUS FONTINALIS*) DANS UN PONCEAU ONDULÉ PAR SUIVI  
VIDÉO À ÉCLAIRAGE INFRAROUGE**

Par  
Pierre-Marc Constantin

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

**Jury d'évaluation**

Président du jury et  
examineur interne

Patrice Couture  
INRS - ETE

Examineur externe

Eva Enders  
Freshwater Institute  
Fisheries and Oceans Canada

Directeur de recherche

Normand Bergeron  
INRS - ETE

Codirectrice de recherche

Nadia Aubin-Horth  
Université Laval





## REMERCIEMENTS

Je voudrais, en premier lieu, remercier mon directeur de recherche Normand Bergeron de m'avoir laissé la chance de travailler sur ce sujet passionnant et pour m'avoir également permis de travailler sur différents projets formateurs. Je voudrais aussi remercier ma codirectrice Nadia Aubin-Horth pour ses précieux conseils lors de planification du projet de recherche.

Un projet aussi complexe au niveau technologique et technique n'aurait pas été possible sans l'aide précieuse de différents collaborateurs. Je voudrais donc remercier toutes les personnes ayant travaillé de près ou de loin sur le projet, en particulier Steve Dugdale, pour ses précieux conseils sur le traitement vidéo, la télédétection et le développement d'applications novatrices. Je voudrais aussi remercier Kevin Kaiser et Dave Gadbois-Côté pour leur aide et leur soutien sur le terrain. Je voudrais également remercier André Boivin, pour son aide technique inestimable et son excellent travail à la gestion de la station de recherche du CIRSA.

Je voudrais également remercier les personnes suivantes pour leurs conseils, le partage de connaissances, leur aide et leur soutien : Elsa Goerig, Francis Bérubé, Marc-André Pouliot, André St-Hilaire, Charlie Couchoud, André Sena, Zacharie Sirabahenda, Rosemarie Gagnon-Poire, Carole-Anne Gillis, Joanie Carrier, Geatano Cecere, Mathieu Roy, Jean-Baptiste Torterotot, Danielle Frechette, Maude Sévigny, Frédérique Bélanger-Lépine, Claudine Boyer, Sergio Cortez Ghio, François-Olivier Gagnon-Hébert, Lucie Gracias ainsi que tous les étudiants de ma cohorte à la maîtrise en Sciences de l'eau de l'INRS (2014-2015).

Je voudrais finalement remercier mes parents Sylvain Constantin et Fabienne Vallières pour leur soutien inconditionnel à la réussite de mes études ainsi que Laurianne Bonin, mon amour, pour son support, son aide précieuse et sa patience.



## RÉSUMÉ

Certaines structures telles que les ponceaux peuvent restreindre les mouvements des poissons dans les rivières ou représenter un obstacle infranchissable pour eux. Les modèles actuellement utilisés afin de prédire si un ponceau est franchissable ou non sont basés sur la prémisse que les poissons nagent de façon continue contre la vitesse moyenne d'écoulement. Toutefois, les prédictions effectuées par ces modèles ne reflètent pas fidèlement les données observées, sous-estimant souvent le succès de passage dans les ponceaux. L'objectif de l'étude était de documenter le comportement spatial de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) lors du franchissement d'un ponceau et d'identifier les facteurs susceptibles d'aider les individus à franchir le ponceau.

Le comportement spatial des ombles de fontaine a été documenté dans un ponceau routier à partir d'enregistrements vidéo et d'un éclairage infrarouge proche, sous trois conditions hydrauliques (débits : 0.08, 0.20 et 0.36 m<sup>3</sup>/s; vitesse moyenne d'écoulement : 0.73, 0.97 et 1.37 m/s). Une application semi-automatisée a été utilisée afin de numériser les trajectoires des poissons à une haute résolution spatiale et temporelle. Une caractérisation fine des conditions d'écoulement et la numérisation des trajectoires a permis de calculer différentes métriques du comportement spatial telles que les vitesses instantanées au sol et de nage, les vitesses d'écoulement des trajectoires, le nombre ainsi que la durée des arrêts. Des mesures standardisées effectuées à proximité du ponceau ont également permis de documenter la personnalité de l'omble de fontaine.

L'analyse des trajectoires des poissons montre que plutôt que de franchir le ponceau en nageant de façon continue, les poissons ont adopté une nage ponctuée d'arrêts à des endroits stratégiques et de durée variable. Les poissons ont également nagé à des vitesses inférieures à la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau dans la conduite. Les résultats suggèrent également que la personnalité n'affecte pas le comportement de nage observé dans le ponceau. Cette étude ne supporte pas l'hypothèse selon laquelle les poissons franchissent un ponceau en nageant contre une vitesse moyenne sans s'arrêter et jette un éclairage nouveau sur le comportement spatial des poissons dans les ponceaux. La méthodologie innovante élaborée dans cette étude pourrait également améliorer la compréhension du comportement spatial des poissons dans d'autres contextes écohydrauliques.

**Mots clés :** Comportement spatial; ponceau; omble de fontaine; hydraulique; personnalité

## ABSTRACT

Some structures like culverts can restrict or impede fish movement in rivers. Models used to predict fish passage performance in culverts assumed that fish swim continuously against the mean flow velocity. However, predictions from those models do not reflect observations of fish passage performance under real conditions. The objective of this study was to document spatial behavior of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) when they ascent a culvert and identify behaviors likely to help fish to cross it.

Spatial behavior of brook trout was documented using video recording and near-infrared illumination under three hydraulic conditions (discharge: 0.08, 0.20 et 0.36 m<sup>3</sup>/s; mean velocity: 0.73, 0.97 et 1.37 m/s). A semi-automated image analysis was used to digitize the fish paths at high spatial and temporal resolution. A fine characterization of hydraulic conditions and ascent path of fish allowed calculation of various spatial behavior metrics including instantaneous ground and swimming speed, velocity selected by brook trout as well as number and duration of stops in forward progression.

Ascent path analysis show that fish did not adopt a continuous forward progression but rather exhibited stops of various duration. Brook trout also selected velocities lower than the mean cross-sectional flow velocity. The results suggest that spatial behavior during culvert ascent is not affected by fish personality. This study does not support the hypothesis that fish swim continuously against the culvert's mean cross-sectional velocity and shed a new light on fish spatial behavior in culvert. The innovative methodology developed in this study could also improve knowledge about fish spatial behavior in other ecohydraulic contexts.

**Keywords** : Spatial behavior; culvert; brook trout; hydraulic; personality





# Table des matières

REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>19</b>
1.1 CONTEXTE.....	19
1.2 PROBLÉMATIQUE.....	21
1.3 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES.....	26
1.3.1 <i>Objectif général</i> .....	26
1.3.2 <i>Hypothèses et prédiction</i> .....	26
<b>2. REVUE DE LA LITTÉRATURE.....</b>	<b>27</b>
2.1 L'IMPORTANCE DES MOUVEMENTS ET DE LA CONNECTIVITÉ DES HABITATS FLUVIAUX POUR LES SALMONIDÉS.....	27
2.2 LA FRAGMENTATION DES HABITATS FLUVIAUX ET SES CONSÉQUENCES ÉCOLOGIQUES.....	29
2.3 LA FRAGMENTATION PAR LES PONCEAUX : LES CAUSES ET LES CONSÉQUENCES.....	31
2.4 L'ÉVALUATION DU SUCCÈS DE PASSAGE DANS LES PONCEAUX : UNE INADÉQUATION ENTRE LES ÉTUDES EN LABORATOIRE ET <i>IN SITU</i> .....	32
2.5 LA PERSONNALITÉ DES SALMONIDÉS : UNE COMPOSANTE IMPORTANTE DE L'ÉQUATION.....	37
<b>3. MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>39</b>
3.1 SUIVI DU COMPORTEMENT SPATIAL DE L'OMBLE DE FONTAINE DANS UN PONCEAU ROUTIER.....	39
3.1.1 <i>Site d'étude</i> .....	39
3.1.2 <i>Système de suivi</i> .....	40
3.1.3 <i>Capture et marquage</i> .....	43
3.1.4 <i>Séquence expérimentale</i> .....	45
3.1.5 <i>Conditions hydrauliques</i> .....	45
3.1.6 <i>Traitement des vidéos et documentation des trajectoires de nage</i> .....	49
3.1.7 <i>Analyses statistiques</i> .....	51
3.2 EFFET DE LA PERSONNALITÉ.....	52
3.2.1 <i>Description des dispositifs expérimentaux et de la séquence expérimentale</i> .....	52
3.2.2 <i>Traitement des vidéos</i> .....	54

3.2.3	<i>Mesures du comportement</i> .....	54
3.2.4	<i>Validité de la répétabilité des essais comportementaux</i> .....	57
3.2.5	<i>Analyses statistiques</i> .....	58
<b>4.</b>	<b>RÉSULTATS</b> .....	<b>59</b>
4.1	COMPORTEMENT SPATIAL DES OMBLES DE FONTAINE DANS LE PONCEAU.....	59
4.1.1	<i>Tentatives et succès de passage</i> .....	59
4.1.2	<i>Description générale des trajectoires</i> .....	59
4.1.3	<i>Continuité de la nage lors des ascensions</i> .....	63
4.1.4	<i>Vitesses de nage, vitesses d'écoulement des trajectoires et ratio préférentiel de vitesse</i> .....	71
4.2	EFFET DE LA PERSONNALITÉ .....	77
4.2.1	<i>Répétabilité des mesures de personnalités sur deux groupes indépendants d'ombles de fontaine</i> .....	77
4.2.2	<i>Résultats bruts des tests de personnalité</i> .....	82
4.2.3	<i>L'audace et le comportement de nage dans le ponceau</i> .....	85
4.2.4	<i>L'activité et le comportement de nage dans le ponceau</i> .....	86
<b>5.</b>	<b>DISCUSSION</b> .....	<b>89</b>
5.1	COMPORTEMENT SPATIAL DE L'OMBLE DE FONTAINE DANS UN PONCEAU .....	89
5.1.1	<i>Tentatives et succès de passage</i> .....	89
5.1.2	<i>Description générale des trajectoires</i> .....	89
5.1.3	<i>Continuité de la nage lors des ascensions</i> .....	90
5.1.4	<i>Vitesses de nage, vitesses d'écoulement des trajectoires et ratio de vitesse préférentielle</i> .....	91
5.1.5	<i>Limites de l'étude</i> .....	93
5.2	EFFET DE LA PERSONNALITÉ .....	94
5.2.1	<i>Répétabilité des mesures de personnalité</i> .....	94
5.2.2	<i>Effet des traits de personnalité sur le comportement spatial adopté dans le ponceau</i> .....	95
<b>6.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>97</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>99</b>
	<b>ANNEXES</b> .....	<b>108</b>
	ANNEXE I – TRAJECTOIRES INDIVIDUELLES DES POISSONS .....	108
	ANNEXE II – TRAJECTOIRES INDIVIDUELLES DÉCOMPOSÉES DES POISSONS .....	117

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. CARACTÉRISTIQUES MORPHOMÉTRIQUES DES POISSONS UTILISÉS DANS CHACUN DES ESSAIS .....	43
TABLEAU 2. CONDITIONS HYDRAULIQUES ET TEMPÉRATURE MOYENNE À L'INTÉRIEUR DU PONCEAU POUR CHAQUE ESSAI. L'ÉCART-TYPE EST MONTRÉ ENTRE PARENTHÈSES. ....	48
TABLEAU 3. DONNÉES ÉCOLOGIQUES POUR LES GROUPES DE SALMONIDÉS AYANT SERVI À TESTER LA VALIDITÉ DES MESURES COMPORTEMENTALES .....	58
TABLEAU 4. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES TRAJECTOIRES (PROGRESSIONS ET ARRÊTS) DE TOUS LES INDIVIDUS CONFONDUS (N = 23) ..	63
TABLEAU 5. COMPARAISONS STATISTIQUES (ANOVA OU ÉQUIVALENT NON PARAMÉTRIQUE) DES VARIABLES D'INTÉRÊT CONCERNANT LA CONTINUITÉ DES TRAJECTOIRES DE NAGE, ENTRE LES TROIS CONDITIONS HYDRAULIQUES AFFRONTÉES (P1 = 0.08 m <sup>3</sup> /s, P2 = 0.20 m <sup>3</sup> /s ET P4 = 0.36 m <sup>3</sup> /s) (N = 23). LES DIFFÉRENCES SIGNIFICATIVES SONT EN CARACTÈRE GRAS.....	67
TABLEAU 6. COMPARAISONS STATISTIQUES (TEST-T DE STUDENT) DES CONDITIONS HYDRAULIQUES AFFRONTÉES PAR LES POISSONS (VITESSE D'ÉCOULEMENT ET PROFONDEUR D'ÉCOULEMENT) ET DE LA DISTANCE MOYENNE À LA PAROI, EN MOUVEMENT ET À L'ARRÊT (N = 23).....	71
TABLEAU 7. COMPARAISONS STATISTIQUES (ANOVA OU ÉQUIVALENT NON PARAMÉTRIQUE) DES VARIABLES D'INTÉRÊT CONCERNANT LES VITESSES DE NAGE ET LES CONDITIONS D'ÉCOULEMENT DE L'EAU, ENTRE LES TROIS CONDITIONS HYDRAULIQUES AFFRONTÉES (P1, P2 ET P4) (N = 23). LES DIFFÉRENCES SIGNIFICATIVES SONT EN CARACTÈRE GRAS.....	72
TABLEAU 8. CORRÉLATIONS DE RANG DE SPEARMAN CALCULÉES SUR LE TEMPS REQUIS POUR QUITTER LE REFUGE (AUDACE) SUR TROIS JOURNÉES CONSÉCUTIVES. LES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES SONT EN CARACTÈRE GRAS. LE NOMBRE DE POISSONS TESTÉS EST ENTRE PARENTHÈSES. ....	78
TABLEAU 9. CORRÉLATIONS DE RANG DE SPEARMAN CALCULÉES SUR LA PROPORTION DE LA SURFACE EXPLORÉE (EXPLORATION) SUR TROIS JOURNÉES CONSÉCUTIVES. LES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES SONT EN CARACTÈRE GRAS. LE NOMBRE DE POISSONS TESTÉS EST ENTRE PARENTHÈSES. ....	80
TABLEAU 10. CORRÉLATIONS DE RANG DE SPEARMAN CALCULÉES SUR LA PROPORTION DE TEMPS PASSÉ À NAGER (ACTIVITÉ) SUR TROIS JOURNÉES CONSÉCUTIVES. LES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES SONT EN CARACTÈRE GRAS. LE NOMBRE DE POISSONS TESTÉS EST ENTRE PARENTHÈSES. ....	82



# LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. LES PONCEAUX EN TANT QU'OBSTACLE À LA LIBRE CIRCULATION DES POISSONS: A) COURS D'EAU À SON ÉTAT NATUREL; B) PONCEAU EN TÔLE ONDULÉE AVEC IMPACT MODÉRÉ; C) PONCEAU AVEC CHUTE INFRANCHISSABLE; D) PONCEAU LISSE EN BÉTON AVEC VITESSE D'ÉCOULEMENT RAPIDE ET PENTE ÉLEVÉE. ....22

FIGURE 2. MODÈLE DYNAMIQUE DES HABITATS FLUVIAUX DE SCHLOSSER. LES POISSONS UTILISENT DIFFÉRENTS HABITATS ESSENTIELS QUI DIFFÈRENT SELON LEUR STADE DE VIE, LA PÉRIODE DE L'ANNÉE ET LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES (ADAPTÉ DE SCHLOSSER, 1995). ....27

FIGURE 3. LA FRAGMENTATION DES ÉCOSYSTÈMES FLUVIAUX DENDRITIQUES: A) UN ÉCOSYSTÈME FLUVIAL NON FRAGMENTÉ OÙ LES POISSONS ONT ACCÈS À DIFFÉRENTS HABITATS VITAUX ; B) LE MÊME ÉCOSYSTÈME APRÈS LA CONSTRUCTION D'UNE ROUTE MUNIE DE PONCEAUX PEU OU NON FRANCHISSABLES OÙ L'ACCÈS À CERTAINS HABITATS EST RESTREINT. APRÈS LA CONSTRUCTION DE LA ROUTE, LA POPULATION DE POISSONS SE RETROUVE FRAGMENTÉE EN QUATRE PETITES POPULATIONS ISOLÉES (COULEURS BLEU, JAUNE, ROUGE ET VERT). À LONG TERME, CET ISOLEMENT MÈNE À UNE DIFFÉRENCIATION GÉNÉTIQUE.....30

FIGURE 4. ARBRE DÉCISIONNEL POUR LA CLASSIFICATION ADAPTÉ DE LOVE ET TAYLOR (2003). CHAQUE PONCEAU EST CLASSÉ EN FONCTION DE SA PROBABILITÉ À LAISSER PASSER LES POISSONS (ICI LES SALMONIDÉS). LA PROBABILITÉ VARIANT DE FAIBLE À ÉLEVÉE.....34

FIGURE 5. RELATION THÉORIQUE DE LA DISTANCE DE REMONTÉE MAXIMALE ATTEINTE PAR UN POISSON EN FONCTION DE SA VITESSE DE NAGE ABSOLUE, POUR TROIS CONDITIONS HYDRAULIQUES (CERCLE ET LIGNE CONTINUE : VITESSE D'ÉCOULEMENT FAIBLE, TRIANGLE ET LIGNE POINTILLÉE : VITESSE D'ÉCOULEMENT INTERMÉDIAIRE, CARRÉ ET LIGNE DISCONTINUE : VITESSE D'ÉCOULEMENT ÉLEVÉE). INSPIRÉ DE CASTRO-SANTOS (2013). LES RELATIONS NE SONT PAS RÉELLES.....35

FIGURE 6. COUPE TRANSVERSALE SCHÉMATISÉE MONTRANT LA DISTRIBUTION NON UNIFORME DES VITESSES D'ÉCOULEMENT DANS UN PONCEAU RUGUEUX. LA VITESSE D'ÉCOULEMENT EST PLUS FAIBLE LE LONG DE LA PAROI (ZONE DE VÉLOCITÉ RÉDUITE) ET PLUS ÉLEVÉE AU CENTRE.....37

FIGURE 7. SITE D'ÉTUDE CONSTITUÉ DE TROIS CONDUITES EN TÔLE ONDULÉE GALVANISÉE. MÉDAILLON : INTÉRIEUR DE LA CONDUITE UTILISÉE POUR L'ÉTUDE. ....40

FIGURE 8. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU PONCEAU ÉQUIPÉ AVEC LES CAMÉRAS VIDÉO INFRAROUGES, LES ANTENNES PIT ET TOUS LES SYSTÈMES AUXILIAIRES REQUIS POUR LEUR OPÉRATION. LA FLÈCHE INDIQUE LE SENS DE L'ÉCOULEMENT DE L'EAU DANS LA CONDUITE. LES LIGNES SOLIDES REPRÉSENTENT LES CÂBLES ÉLECTRIQUES ET DE COMMUNICATIONS.....41

FIGURE 9. IMAGES DU SYSTÈME DE SUIVI VIDÉO ET TÉLÉMÉTRIQUE UTILISÉ DANS LA PRÉSENTE ÉTUDE : A) CAMÉRA VIDÉO À ÉCLAIRAGE INFRAROUGE; B) PANNEAU SOLAIRE; C) ANTENNE DE SUIVI TÉLÉMÉTRIQUE PASSIF INTÉGRÉ; D) SYSTÈME D'ENREGISTREMENT DES DONNÉES TÉLÉMÉTRIQUES. ....42

FIGURE 10. DIFFÉRENCE ENTRE LES TRANSPONDEURS DE 12 ET 23 MM. MÉDAILLON : TAILLE RÉELLE.....44

FIGURE 11. CARTE DES VITESSES MOYENNES D'ÉCOULEMENT DE L'EAU À L'INTÉRIEUR DU PONCEAU POUR LES TROIS ESSAIS : A) P1 : 0.08 m<sup>3</sup>/s, B) P2 : 0.20 m<sup>3</sup>/s ET C) P4 : 0.36 m<sup>3</sup>/s. LES PANNEAUX REPRÉSENTENT UNE VUE EN PLAN DE LA CONDUITE. LES LIGNES POINTILLÉES MAGENTA REPRÉSENTENT LES LIMITES DE LA LARGEUR MOUILLÉE À UN INSTANT DONNÉ. LA FLÈCHE BLEUE INDIQUE LE

SENS DE L'ÉCOULEMENT DE L'EAU. LES CERCLES COLORÉS REPRÉSENTENT LES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE. EN BLANC SONT LES ZONES OÙ LES VITESSES N'ONT PAS ÉTÉ EXTRAPOLÉES. ....	46
FIGURE 12. CARTE DES PROFONDEURS DE L'EAU À L'INTÉRIEUR DU PONCEAU POUR LES TROIS ESSAIS : A) P1 : 0.08 M <sup>3</sup> /s, B) P2 : 0.20 M <sup>3</sup> /s ET C) P4 : 0.36 M <sup>3</sup> /s. LES PANNEAUX REPRÉSENTENT UNE VUE EN PLAN DE LA CONDUITE. LES LIGNES POINTILLÉES MAGENTA REPRÉSENTENT LES LIMITES DE LA LARGEUR MOUILLÉE À UN INSTANT DONNÉ. LA FLÈCHE BLEUE INDIQUE LE SENS DE L'ÉCOULEMENT DE L'EAU. LES CERCLES COLORÉS REPRÉSENTENT LES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE. EN BLANC SONT LES ZONES OÙ LES PROFONDEURS N'ONT PAS ÉTÉ EXTRAPOLÉES. ....	47
FIGURE 13. PROFIL LONGITUDINAL DU DÉNIVELÉ DU PONCEAU (CERCLE BLEU) ET DES PROFONDEURS MOYENNES D'ÉCOULEMENT DE L'EAU POUR CHAQUE CONDITION HYDRAULIQUE TESTÉE (CARRÉS ROUGES : P1; TRIANGLES VERTS : P2; LOSANGES MAUVES : P4). ....	49
FIGURE 14. BASSINS UTILISÉS LORS DES ESSAIS COMPORTEMENTAUX, IN SITU. LES POISSONS SONT INTRODUIIS DANS LE BASSIN À PARTIR DES TUYAUX DE PVC NOIRS. L'EAU S'ÉCOULE DANS LES ARÈNES DE FAÇON NATURELLE. ....	53
FIGURE 15. TRACÉ TYPE D'UN POISSON EXPLORATEUR. L'ÉCHELLE DE COULEUR CONTINUE REPRÉSENTE LE TEMPS ÉCOULÉ DEPUIS LA SORTIE DU TUYAU DE PVC, DE ZÉRO (BLEU FONCÉ) À LA FIN DE LA PÉRIODE DE MESURES (ROUGE FONCÉ). ....	54
FIGURE 16. TABLEAU RÉCAPITULATIF DE LA SÉQUENCE DE MANIPULATION DES ESSAIS COMPORTEMENTAUX. ....	55
FIGURE 17. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE L'ARÈNE EXPÉRIMENTALE UTILISÉE POUR LA QUANTIFICATION DES TRAITS DE PERSONNALITÉ (AUDACE, EXPLORATION ET ACTIVITÉ). ....	56
FIGURE 18. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE L'ANALYSE STATISTIQUE MONTRANT LES DIFFÉRENCES SIGNIFICATIVES ENTRE LES TROIS CONDITIONS HYDRAULIQUES POUR A) LA SINUSITÉ DE LA TRAJECTOIRE, B) LA DURÉE D'UNE ASCENSION ET C) LA DISTANCE MOYENNE À LA PAROI. LES CHIFFRES EN ITALIQUE AU-DESSUS DES PANNEAUX A) ET B) REPRÉSENTENT LE NOMBRE D'INDIVIDUS PAR CONDITION HYDRAULIQUE. LES LETTRES EN ITALIQUE AU-DESSUS DES BOÎTES MONTRENT L'ABSENCE (LETTRES SEMBLABLES) OU LA PRÉSENCE D'UNE DIFFÉRENCE SIGNIFICATIVE (LETTRES DIFFÉRENTES) ENTRE LES CONDITIONS HYDRAULIQUES. ....	61
FIGURE 19. RELATIONS ENTRE LES VARIABLES DESCRIPTIVES DES TRAJECTOIRES, LA LONGUEUR À LA FOURCHE DES POISSONS ET LA TEMPÉRATURE DE L'EAU. CHAQUE POINT REPRÉSENTE UN INDIVIDU (N = 23). LA DROITE ET LE COEFFICIENT DE DÉTERMINATION (R <sup>2</sup> ) REPRÉSENTENT LA RELATION LINÉAIRE SIGNIFICATIVE DE LA RÉGRESSION. LA FORCE DE LA CORRÉLATION NON LINÉAIRE EST REPRÉSENTÉE PAR LE COEFFICIENT DE SPEARMAN (R <sub>s</sub> ). ....	62
FIGURE 20. A) TRAJECTOIRE EN PLAN DE L'ASCENSION D'UN POISSON (LF : 136 MM) LORS DE L'ESSAI P1 (Q = 0.08 M <sup>3</sup> /s). LES CERCLES ROUGES REPRÉSENTENT LA POSITION DU POISSON À TOUTES LES SECONDES. LES LIGNES POINTILLÉES MAGENTA REPRÉSENTENT LES LIMITES DE LA LARGEUR MOUILLÉE. B) TRAJECTOIRE DÉCOMPOSÉE EN SES COMPOSANTES LONGITUDINALES (PROGRESSION VERS L'AMONT) ET LATÉRALES (POSITION LATÉRALE) EN FONCTION DU TEMPS (ABSCISSE). LES RECTANGLES BLEUS REPRÉSENTENT LES MOUVEMENTS ET LES RECTANGLES ROUGES REPRÉSENTENT LES ARRÊTS. LES FLÈCHES BLEUES REPRÉSENTENT LE SENS D'ÉCOULEMENT DE L'EAU. ....	64
FIGURE 21. A) TRAJECTOIRE EN PLAN DE L'ASCENSION D'UN POISSON (LF : 152 MM) LORS DE L'ESSAI P2 (Q = 0.20 M <sup>3</sup> /s). LES CERCLES ROUGES REPRÉSENTENT LA POSITION DU POISSON À TOUTES LES SECONDES. LES LIGNES POINTILLÉES MAGENTA REPRÉSENTENT LES LIMITES DE LA LARGEUR MOUILLÉE. B) TRAJECTOIRE DÉCOMPOSÉE EN SES COMPOSANTES LONGITUDINALES (PROGRESSION VERS L'AMONT) ET LATÉRALES (POSITION LATÉRALE) EN FONCTION DU TEMPS (ABSCISSE). LES RECTANGLES BLEUS REPRÉSENTENT LES	

MOUVEMENTS ET LES RECTANGLES ROUGES REPRÉSENTENT LES ARRÊTS. LES FLÈCHES BLEUES REPRÉSENTENT LE SENS D'ÉCOULEMENT DE L'EAU. ....	65
FIGURE 22. A) TRAJECTOIRE EN PLAN DE L'ASCENSION D'UN POISSON (LF : 148 MM) LORS DE L'ESSAI P4 (Q = 0.36 m <sup>3</sup> /s). LES CERCLES ROUGES REPRÉSENTENT LA POSITION DU POISSON À TOUTES LES SECONDES. LES LIGNES POINTILLÉES MAGENTA REPRÉSENTENT LES LIMITES DE LA LARGEUR MOUILLÉE. B) TRAJECTOIRE DÉCOMPOSÉE EN SES COMPOSANTES LONGITUDINALES (PROGRESSION VERS L'AMONT) ET LATÉRALES (POSITION LATÉRALE) EN FONCTION DU TEMPS (ABSCISSE). LES RECTANGLES BLEUS REPRÉSENTENT LES MOUVEMENTS ET LES RECTANGLES ROUGES REPRÉSENTENT LES ARRÊTS. LES FLÈCHES BLEUES REPRÉSENTENT LE SENS D'ÉCOULEMENT DE L'EAU. ....	66
FIGURE 23. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE L'ANALYSE MONTRANT LES DIFFÉRENCES ENTRE LES TROIS ESSAIS POUR LES VARIABLES DE LA CONTINUITÉ DE LA NAGE. LES CHIFFRES EN ITALIQUE AU-DESSUS DU GRAPHIQUE REPRÉSENTENT LE NOMBRE D'INDIVIDUS PAR CONDITION. LES LETTRES EN ITALIQUE AU-DESSUS DES BOÎTES MONTRENT L'ABSENCE (LETTRES SEMBLABLES) OU LA PRÉSENCE D'UNE DIFFÉRENCE SIGNIFICATIVE (LETTRES DIFFÉRENTES) ENTRE LES ESSAIS. ....	68
FIGURE 24. CORRÉLATION ENTRE LA TAILLE DES POISSONS, LA TEMPÉRATURE DE L'EAU ET CERTAINES VARIABLES DE LA CONTINUITÉ DE LA NAGE. CHAQUE POINT REPRÉSENTE UN INDIVIDU (N = 23). LA FORCE DE LA CORRÉLATION EST REPRÉSENTÉE PAR LE COEFFICIENT DE SPEARMAN (RS). ....	69
FIGURE 25. RELATION ENTRE LA TAILLE DES POISSONS, LA TEMPÉRATURE DE L'EAU ET CERTAINES VARIABLES DE LA CONTINUITÉ DE LA NAGE. CHAQUE POINT REPRÉSENTE UN INDIVIDU (N = 23). LA COURBE REPRÉSENTE UNE RELATION SIGNIFICATIVE POLYNOMIALE (ORDRE 2). LA FORCE DE LA CORRÉLATION EST REPRÉSENTÉE PAR LE COEFFICIENT DE DÉTERMINATION (R <sup>2</sup> ). ....	70
FIGURE 26. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE L'ANALYSE MONTRANT LES DIFFÉRENCES ENTRE LES TROIS ESSAIS POUR LES VARIABLES DE VITESSES DE NAGE ET HYDRAULIQUES. LES CHIFFRES EN ITALIQUE AU-DESSUS DU GRAPHIQUE REPRÉSENTENT LE NOMBRE D'INDIVIDUS PAR CONDITION. LES LETTRES EN ITALIQUE AU-DESSUS DES BOÎTES MONTRENT L'ABSENCE (LETTRES SEMBLABLES) OU LA PRÉSENCE D'UNE DIFFÉRENCE SIGNIFICATIVE (LETTRES DIFFÉRENTES) ENTRE LES ESSAIS. ....	73
FIGURE 27. RELATION ENTRE LA TAILLE DES POISSONS, LA TEMPÉRATURE DE L'EAU ET CERTAINES VARIABLES DE VITESSES DE NAGE ET HYDRAULIQUES. CHAQUE POINT REPRÉSENTE UN INDIVIDU (N = 23). LA DROITE REPRÉSENTE UNE RELATION SIGNIFICATIVE LINÉAIRE. LA FORCE DE LA CORRÉLATION EST REPRÉSENTÉE PAR LE COEFFICIENT DE DÉTERMINATION (R <sup>2</sup> ). ....	74
FIGURE 28. RELATION ENTRE LA TAILLE DES POISSONS, LA TEMPÉRATURE DE L'EAU ET CERTAINES VARIABLES DE VITESSES DE NAGE ET HYDRAULIQUES. CHAQUE POINT REPRÉSENTE UN INDIVIDU (N = 23). ....	75
FIGURE 29. RELATIONS ENTRE LA DISTANCE MOYENNE À LA PAROI ET A) LA VITESSE MOYENNE D'ÉCOULEMENT DE LA TRAJECTOIRE ET B) LE RATIO DE VITESSE PRÉFÉRENTIELLE. CHAQUE POINT REPRÉSENTE UN INDIVIDU (N = 23). LES DROITES REPRÉSENTENT UNE RELATION SIGNIFICATIVE LINÉAIRE. LA FORCE DE LA CORRÉLATION EST REPRÉSENTÉE PAR LE COEFFICIENT DE DÉTERMINATION (R <sup>2</sup> ). ....	76
FIGURE 30. DISTRIBUTION DE FRÉQUENCE DU SCORE D'AUDACE (TEMPS REQUIS POUR QUITTER LE REFUGE) POUR LES DEUX GROUPES DE POISSONS UTILISÉS LORS DE LA MESURE DE RÉPÉTABILITÉ (SAFO-R01 ET SAFO-R02), POUR CHAQUE JOURNÉE DE MESURES. ....	78
FIGURE 31. DISTRIBUTION DE FRÉQUENCE DU SCORE D'EXPLORATION (PROPORTION DE LA SURFACE EXPLORÉE) POUR LES DEUX GROUPES DE POISSONS UTILISÉS LORS DE LA MESURE DE RÉPÉTABILITÉ (SAFO-R01 ET SAFO-R02), POUR CHAQUE JOURNÉE DE MESURES. ....	79

FIGURE 32. DISTRIBUTION DE FRÉQUENCE DU SCORE D'ACTIVITÉ (PROPORTION DE TEMPS PASSÉ À NAGER) POUR LES DEUX GROUPES DE POISSONS UTILISÉS LORS DE LA MESURE DE RÉPÉTABILITÉ (SAFO-R01 ET SAFO-R02), POUR CHAQUE JOURNÉE DE MESURES.....	81
FIGURE 33. DISTRIBUTION DE FRÉQUENCE DES SCORES DE PERSONNALITÉ (AUDACE, EXPLORATION ET ACTIVITÉ) POUR LES POISSONS SUIVIS DANS LE CADRE DE LA DOCUMENTATION DU COMPORTEMENT SPATIAL DANS LE PONCEAU (N = 23).....	83
FIGURE 34. DISTRIBUTION DE FRÉQUENCE DES SCORES DE PERSONNALITÉ (AUDACE, EXPLORATION, ACTIVITÉ) POUR CHAQUE GROUPE DE POISSONS (CONDITIONS HYDRAULIQUES P1, P2 ET P4) SUIVIS DANS LE CADRE DE LA DOCUMENTATION DU COMPORTEMENT SPATIAL DANS LE PONCEAU (N = 23). .....	84
FIGURE 35. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE L'ANALYSE POST HOC MONTRANT LES DIFFÉRENCES A) D'AUDACE ET B) D'ACTIVITÉ ENTRE LES TROIS CLASSES DE TAILLE. LES CHIFFRES EN ITALIQUE AU-DESSUS DES PANNEAUX REPRÉSENTENT LE NOMBRE D'INDIVIDUS PAR ESSAI. LES LETTRES EN ITALIQUE AU-DESSUS DES BOÎTES MONTRENT L'ABSENCE (LETTRES SEMBLABLES) OU LA PRÉSENCE D'UNE DIFFÉRENCE SIGNIFICATIVE (LETTRES DIFFÉRENTES) ENTRE LES ESSAIS.....	85
FIGURE 36. RELATION ENTRE LE TEMPS REQUIS POUR QUITTER LE REFUGE (AUDACE) ET LA VITESSE MOYENNE DE NAGE DES POISSONS DANS LE PONCEAU. CHAQUE POINT REPRÉSENTE UN INDIVIDU SUIVI (N = 23). LA FORCE DE LA CORRÉLATION EST REPRÉSENTÉE PAR LE COEFFICIENT DE SPEARMAN ( $R_s$ ).....	86
FIGURE 37. RELATION ENTRE LA PROPORTION DE TEMPS PASSÉ À NAGER (ACTIVITÉ) ET LA VITESSE MOYENNE DE NAGE DES POISSONS DANS LE PONCEAU. CHAQUE POINT REPRÉSENTE UN INDIVIDU SUIVI (N = 23). LA FORCE DE LA CORRÉLATION EST REPRÉSENTÉE PAR LE COEFFICIENT DE SPEARMAN ( $R_s$ ).....	87







# 1. INTRODUCTION

## 1.1 Contexte

Le Québec abonde de lacs et de cours d'eau de tailles variées et bénéficie d'une faune aquatique exceptionnelle et diversifiée. Avec des retombées économiques estimées à plus de 570 millions de dollars et la création de plus de 9000 emplois directs, l'industrie de la pêche sportive est vitale pour le Québec et ses régions (EcoTec, 2014). À lui seul, le groupe des salmonidés génère plus de 230 millions de dollars de produit intérieur brut (Pinfold, 2011, EcoTec, 2014). Afin de préserver son apport socioéconomique important, un effort soutenu et rigoureux doit être réalisé afin de protéger et mettre en valeur cette ressource halieutique.

Malheureusement, plusieurs menaces affectent la viabilité des populations de salmonidés à court et à long terme, tels que les changements climatiques, la surpêche, l'introduction d'espèces invasives et l'aménagement inadéquat du territoire. Par exemple, l'intensification de l'exploitation forestière, l'étalement urbain et le développement de la villégiature sont des activités de développement territorial nécessitant la construction de routes et de chemins forestiers. Le développement du réseau routier québécois nécessite la construction de traverses de cours d'eau tels que les ponts et les ponceaux. Alors que les ponts sont utilisés pour franchir de larges cours d'eau tels que les rivières, les ponceaux, plus économiques, sont généralement préférés afin de franchir les plus petits cours d'eau. Les ponceaux sont, par définition, des ouvrages constitués de conduites circulaires ou rectangulaires intégrés dans la structure d'un chemin permettant le libre écoulement de l'eau de part et d'autre de celui-ci (OQLF, 2013). Ces derniers, quoique peu imposants en termes de dimensions, sont présents en très grand nombre dans le réseau routier, des autoroutes aux chemins forestiers carrossables. Au Québec, des milliers de ponceaux sont installés, réparés ou remplacés annuellement dans les réseaux routiers privés et publics. Les ponceaux installés sur le territoire québécois doivent assurer l'écoulement de l'eau tout en étant durables et sécuritaires pour les usagers. Toutefois, bien que l'installation de ces ouvrages soit réglementée (ex. *Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier* et *Loi sur les pêches*), les ponceaux peuvent constituer une barrière physique au déplacement de la faune ichthyenne, à un moment ou l'autre de leur cycle de vie. Un ponceau ayant été conçu et installé selon les normes voit aussi souvent son état général se dégrader au fil des années, et les changements de sa structure peuvent affecter tant l'écoulement de l'eau, que la morphosédimentologie des cours

d'eau ou la circulation des poissons. La capacité des poissons à se déplacer librement d'un habitat à l'autre joue un rôle primordial sur la dispersion de la diversité génétique et la persistance des populations (Schlosser, 1991, Fausch *et al.*, 2002, Kanno *et al.*, 2014) et représentant ainsi un intérêt majeur pour la conservation des écosystèmes fluviaux (Fullerton *et al.*, 2010, Kemp *et al.*, 2010, Lapointe *et al.*, 2013).

L'impact des ponceaux sur l'écoulement de l'eau, la qualité de l'habitat fluvial ainsi que sur la libre circulation des poissons a été fortement documenté au cours des dernières années (Kemp *et al.*, 2010). Plusieurs facteurs peuvent affecter la probabilité pour un poisson de réussir l'ascension d'un ponceau, notamment une vitesse élevée de l'écoulement de l'eau, une longue structure ou une chute infranchissable (Powers *et al.*, 1997, Gibson *et al.*, 2005, Burford *et al.*, 2009, Briggs *et al.*, 2013, Goerig *et al.*, 2016). Cependant, les études ne démontrent pas encore clairement de quelle façon les facteurs biotiques et abiotiques interagissent pour affecter négativement les déplacements des poissons. Le comportement de nage adopté par les poissons dans les ponceaux lors d'une tentative de passage est également peu connu, à ce jour, et repose principalement sur des observations qualitatives (Powers *et al.*, 1997, Johnson *et al.*, 2012).

Ce mémoire documente de manière explicite le comportement spatial de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) lors de l'ascension d'un ponceau. Alors que la littérature scientifique et technique traite de l'impact général de ces structures sur les déplacements des poissons, la présente étude traite de l'interaction complexe entre l'omble de fontaine et l'environnement hydraulique dynamique de ces structures routières. L'étude met aussi en perspective l'importance des facteurs intrinsèques, plus spécifiquement la personnalité des salmonidés, sur le comportement spatial adopté lors de l'ascension d'obstacles physiques. Les connaissances acquises offrent ainsi une nouvelle façon de mieux comprendre l'impact de ces ouvrages sur les déplacements des salmonidés. Ultérieurement, les données récoltées permettront d'améliorer les modèles écohydrauliques existants tout en définissant de nouvelles bases pour la conception de ponceaux favorisant le déplacement de la faune ichthyenne.

## 1.2 Problématique

La présence d'un ponceau dans un cours d'eau n'est pas sans effet sur l'écoulement de l'eau et la dynamique fluviale. Contrairement au lit des cours d'eau naturels (Figure 1a) qui offrent une certaine complexité hydraulique par la présence d'un substrat et d'une morphologie hétérogène (ex. présence de roches ou de blocs; présence de fosses et de rapides; présence de végétation), les ponceaux sont des structures aux parois relativement simples et uniformes (Figure 1b). Les ponceaux utilisés diffèrent en forme et en matériau: structure rectangulaire, arquée ou circulaire; tuyau en tôle galvanisée, béton ou thermoplastique; parois lisses ou rugueuses (ondulations). Selon la conformité de l'installation, l'âge ou la dynamique du cours d'eau, le ponceau peut avoir des effets négatifs sur l'habitat du poisson et ses déplacements. La dynamique du cours d'eau, influencée par la présence du ponceau, peut favoriser le dépôt de sédiments fins sur les frayères situées en aval, pouvant causer une asphyxie des œufs et, du même coup, affecter ultimement leur survie (Dubé *et al.*, 2006). La présence d'un ponceau peut également modifier les conditions hydrauliques locales et créer une barrière physique aux déplacements de la faune ichthyenne (Gibson *et al.*, 2005, Park *et al.*, 2008, Poplar-Jeffers *et al.*, 2009). Les facteurs généralement reconnus pour créer de tels obstacles physiques sont nombreux et incluent, non exclusivement, la présence d'une chute à l'extrémité aval (Burford *et al.*, 2009) (Figure 1c), une vitesse d'écoulement de l'eau excessive (Powers *et al.*, 1997, Davis *et al.*, 2011, Johnson *et al.*, 2012) (Figure 1d), une profondeur d'eau insuffisante et une turbulence élevée.



**Figure 1. Les ponceaux en tant qu'obstacle à la libre circulation des poissons: a) cours d'eau à son état naturel; b) ponceau en tôle ondulée avec impact modéré; c) ponceau avec chute infranchissable; d) ponceau lisse en béton avec vitesse d'écoulement rapide et pente élevée.**

Il existe différentes méthodes directes et indirectes permettant de déterminer si un ponceau constitue un obstacle ou non à la libre circulation des poissons. Les méthodes directes telles que le marquage-recapture (Belford *et al.*, 1989, Benton *et al.*, 2008, Bouska *et al.*, 2010) et le suivi télémétrique (Mahlum *et al.*, 2013, Goerig *et al.*, 2016) donnent une information précise concernant l'impact d'un ponceau sur les mouvements des poissons. Cependant, ces méthodes sont généralement coûteuses en temps, en équipement et en main d'œuvre. Pour ces raisons, des filtres visant à évaluer la probabilité de succès de passage des poissons en fonction de certaines variables statiques (ex. pente et longueur du ponceau) sont couramment utilisés afin de caractériser un grand nombre de ponceaux, principalement dans les études à l'échelle du bassin versant (Love *et al.*, 2003, Coffman, 2005, Bourne *et al.*, 2011). Ces derniers constituent une façon rapide d'effectuer un inventaire de l'effet de l'ensemble des ponceaux à l'intérieur d'un bassin versant. Il est également possible d'évaluer le succès de passage des poissons dans les ponceaux à partir de modèles dérivés de données de performance de nage acquises en laboratoire (Castro-Santos, 2005, Neary, 2012). Un de ces modèles permet d'estimer la vitesse moyenne d'écoulement seuil (*exhaustion-threshold model*) à partir de laquelle il est impossible pour un poisson de franchir un ponceau d'une longueur donnée (Neary, 2012). Dérivé du même

principe, Castro-Santos (2005) a développé un modèle qui permet d'estimer la distance qu'un poisson peut franchir s'il nage à une vitesse optimale contre une vitesse d'écoulement donnée (*ascent-distance model*). Il existe également plusieurs logiciels qui permettent de simuler les conditions hydrauliques à l'intérieur d'un ponceau et de les comparer à la capacité de nage des poissons. Fishxing (Furniss *et al.*, 2008), un logiciel basé sur le modèle du seuil d'épuisement, a rapidement été adopté par les chercheurs et les gestionnaires afin d'évaluer les ponceaux sur leur propension à bloquer les mouvements des poissons (Love *et al.*, 2003, Burford *et al.*, 2009, Price *et al.*, 2010, Davis *et al.*, 2011, Briggs *et al.*, 2013). Par contre, plusieurs études démontrent que les prédictions effectuées par cet outil ne concordent pas avec les observations en situation réelle (Mahlum *et al.*, 2013), le logiciel surestimant souvent le nombre de ponceaux infranchissables (Burford *et al.*, 2009, Poplar-Jeffers *et al.*, 2009, Bourne *et al.*, 2011, Briggs *et al.*, 2013, Mahlum *et al.*, 2013). Cet écart s'explique par le fait que les données de performance de nage des poissons sont obtenues à partir d'essais effectués en laboratoire, dans des tunnels de nage expérimentaux. Bien que ces essais expérimentaux permettent d'acquérir des données pertinentes sur la capacité aérobique des poissons, l'utilisation de ces tunnels limite les mouvements des poissons, restreint l'utilisation adéquate de leurs muscles et altère leur comportement de nage (Peake *et al.*, 2006, Tudorache *et al.*, 2007, Castro-Santos *et al.*, 2013). Ces tests de nage forcée ne représentent pas exactement les conditions hydrauliques naturelles affrontées par les poissons lorsqu'ils tentent de franchir un ponceau. De plus, les relations de temps à l'épuisement utilisent généralement la vitesse moyenne de l'écoulement dans la conduite afin de prédire le succès de passage puisque celle-ci est facilement mesurable. Dans les faits, les poissons n'utilisent pas nécessairement la vitesse moyenne, mais vont affronter des vitesses d'écoulement qui minimise leur dépense énergétique (Lindberg *et al.*, 2016). Plus récemment, une étude portant sur le succès de passage d'ombles fontaine dans les ponceaux routiers a montré que l'interaction entre le type de ponceau et la taille des poissons avait le plus grand effet sur le succès de passage (Goerig *et al.*, 2016). Le succès de passage mesuré était plus grand dans les ponceaux rugueux que les ponceaux lisses, et ce, particulièrement pour les petits poissons. Ces résultats suggèrent que l'écoulement dynamique et non uniforme de l'eau retrouvée dans les ponceaux rugueux peut favoriser l'ascension des poissons dans la conduite (Ead *et al.*, 2000, Richmond *et al.*, 2007, Clark *et al.*, 2014). Les poissons peuvent donc emprunter des trajectoires qui leur permettent d'affronter des vitesses d'écoulement réduites ou tout simplement se reposer dans le creux des ondulations (Goerig *et al.*, 2016). Ces zones à vitesse réduite d'écoulement se trouvent principalement le long des parois, dans les zones où la pente du ponceau est faible (Richmond *et al.*, 2007, Morrison *et al.*, 2009, Clark *et al.*, 2014) ou peut

survenir dans le creux des ondulations, dépendamment de l'amplitude et la distance entre ces éléments rugueux (Davis *et al.*, 1989).

Afin de compenser ce phénomène, certains chercheurs utilisent généralement une valeur fixe de correction basée sur le ratio *vitesse moyenne de l'écoulement / vitesse d'écoulement affrontée*. Cette valeur est appliquée à la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau dans les études de performance de nage ou dans la prédiction du succès de passage (Behlke *et al.*, 1991, Castro-Santos, 2005). Par contre, ce ratio est susceptible de changer avec 1) l'augmentation du débit et 2) la taille du poisson. Dès que la vitesse d'écoulement dans le ponceau devient contraignante, les poissons sont susceptibles de nager plus près des parois de la conduite afin de bénéficier d'une plus faible vitesse d'écoulement. Les petits poissons sont aussi susceptibles de nager plus près des parois que les poissons de plus grande taille, faisant ainsi varier le ratio mentionné plus haut.

La différence du succès de passage dans les ponceaux entre plusieurs individus, populations ou espèces peut également être attribuable à des facteurs intrinsèques tels que la motivation (Castro-Santos *et al.*, 2013). La motivation d'un poisson à franchir un ponceau peut être expliquée par plusieurs facteurs tels que la photopériode, l'approche de la période de reproduction ou la taille (Goerig *et al.*, 2017b). Les résultats de cette étude ont montré que les poissons effectuant plus de tentatives (poissons motivés) avaient une plus grande chance de franchir un ponceau. Cependant, il est difficile de mesurer le degré de motivation d'un poisson. Or, l'étude de la personnalité, soit une différence individuelle comportementale constante dans le temps et à travers différents contextes, a été très documentée chez les animaux à partir de protocoles expérimentaux standardisés (Reale *et al.*, 2007, Conrad *et al.*, 2011). Par exemple, Chapman *et al.* (2011) ont démontré que les poissons audacieux peuvent parcourir de plus grandes distances. Il est donc possible que l'étude de la personnalité puisse expliquer les comportements de nage adoptés par les poissons ainsi que la probabilité de ceux-ci à franchir avec succès un ponceau.

Les méthodes conventionnelles d'évaluation du succès de passage des poissons dans les ponceaux (marquage-recapture, suivi télémétrique) ne permettent pas d'observer avec précision les stratégies comportementales de nage des poissons lors de l'ascension. Afin d'évaluer plus précisément les variables hydrauliques et les facteurs biologiques affectant la libre circulation des poissons dans les ponceaux, un suivi continu à une échelle spatio-temporelle fine est nécessaire. Des études effectuées directement en milieu naturel sont également nécessaires



afin de mesurer toute la complexité de l'environnement hydraulique et environnemental auquel fait face le poisson.

## **1.3 Objectifs et hypothèses**

### **1.3.1 Objectif général**

L'objectif général de ce projet de maîtrise consiste à documenter le comportement spatial de l'omble de fontaine lors du franchissement d'un ponceau routier et d'identifier les facteurs susceptibles d'aider les individus à franchir le ponceau. Cet objectif sera atteint en développant une méthodologie permettant de documenter jour et nuit la trajectoire de nage utilisée par l'omble de fontaine en fonction de la distribution des vitesses d'écoulement dans le ponceau.

### **1.3.2 Hypothèses et prédiction**

**H1** : La progression vers l'amont des ombles dans le ponceau est parfois ponctuée d'arrêts leur permettant de se reposer.

**H2** : Il existe une relation entre le rapport de la vitesse moyenne de l'écoulement et la vitesse affrontée par les ombles de fontaine et le débit dans le ponceau. Ce rapport devrait augmenter avec le débit dans le ponceau.

**H3** : Il existe une relation entre le rapport de la vitesse moyenne de l'écoulement et la vitesse affrontée par les ombles de fontaine et la taille du poisson. Ce rapport devrait être inversement proportionnel à la taille des poissons.

**H4** : Il existe une relation entre les traits de personnalité des ombles de fontaine et le nombre de tentatives pour franchir le ponceau. Les individus démontrant une personnalité de type explorateur et/ou audacieux devraient avoir tendance à effectuer plus de tentatives et obtenir un meilleur succès de passage.

## 2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

### 2.1 L'importance des mouvements et de la connectivité des habitats fluviaux pour les salmonidés

La conservation et la gestion des populations de salmonidés passent avant tout par une connaissance approfondie de leur écologie, l'étude de leur comportement spatial étant primordial. Par la diversité de leur taille et de leurs préférences alimentaires, les salmonidés démontrent des cycles de vie complexes et des types de mouvements variés (déplacements pour satisfaire un besoin à court terme ou migrations) ainsi qu'une utilisation d'habitats qui diffèrent selon le besoin à combler. Pour accomplir leur cycle de vie, ils doivent être en mesure de se déplacer librement afin d'accéder à des habitats d'alimentation, de reproduction, d'hivernage ou pour éviter les prédateurs, les perturbations environnementales et les températures élevées de l'eau (Figure 2) (Schlosser, 1991, McCormick *et al.*, 1998, Kahler *et al.*, 2001, Petty *et al.*, 2012).

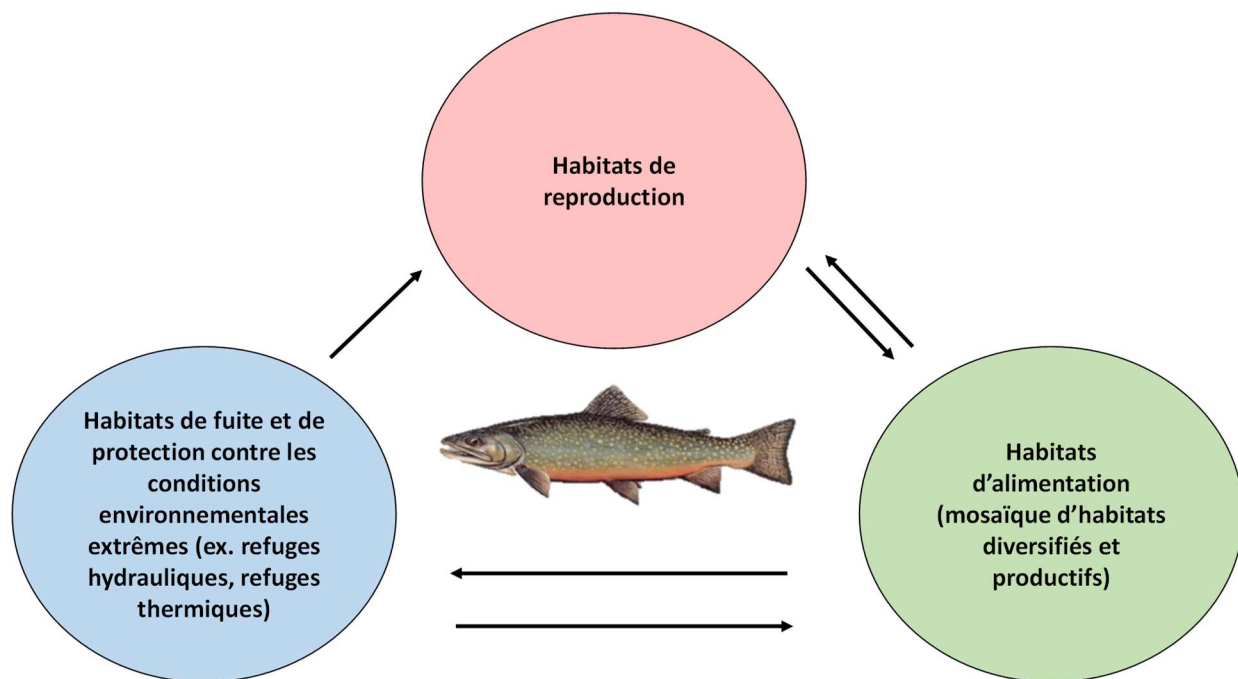


Figure 2. Modèle dynamique des habitats fluviaux de Schlosser. Les poissons utilisent différents habitats essentiels qui diffèrent selon leur stade de vie, la période de l'année et les conditions environnementales (adapté de Schlosser, 1995).

Les salmonidés utilisent une diversité d'habitats qui varient dans le temps et dans l'espace (Fausch *et al.*, 2002). Les habitats utilisés diffèrent selon la saison et selon le stade de vie du poisson. Lors de la saison estivale, les salmonidés fréquentent une diversité de milieux aquatiques productifs (ex. eaux peu profondes, successions de fosses et de rapides, endroits avec une bonne présence de troncs submergés) afin de dénicher une source alimentaire suffisante pour combler leurs besoins énergétiques. Les distances parcourues par l'omble de fontaine sont très variables, mais des déplacements sur plusieurs centaines de mètres sont relativement communs (Gowan *et al.*, 1996, Bentley *et al.*, 2015). En été, lorsque les températures de l'eau atteignent des valeurs trop élevées, les salmonidés peuvent se déplacer sur plusieurs centaines de mètres pour atteindre des refuges thermiques, soit des zones où la température locale de l'eau est plus faible (Dugdale *et al.*, 2015). Lors de la période de reproduction, l'omble de fontaine va préférer les cours d'eau bien oxygénés à substrat grossiers, parcourant parfois plusieurs centaines de mètres pour trouver l'endroit idéal. La longueur des déplacements varie également selon le stade de vie. Les jeunes salmonidés, dont la croissance est plus rapide et les besoins énergétiques plus élevés que les salmonidés adultes, se déplacent plus fréquemment sur de petites distances à la recherche d'aliments. Les déplacements peuvent se faire au sein d'un même tronçon, mais les mouvements entre un tronçon principal et ses tributaires sont communs. En effet, les tributaires de grandes rivières demeurent des habitats clés pour la reproduction des salmonidés (Petty *et al.*, 2005, Kanno *et al.*, 2014) et offrent également des sources d'eau froide utilisées comme refuges thermiques par temps chaud en saison estivale (Petty *et al.*, 2012, Dugdale *et al.*, 2015). Les cours d'eau intermittents forment également des habitats propices à l'alimentation et à la protection contre les prédateurs naturels.

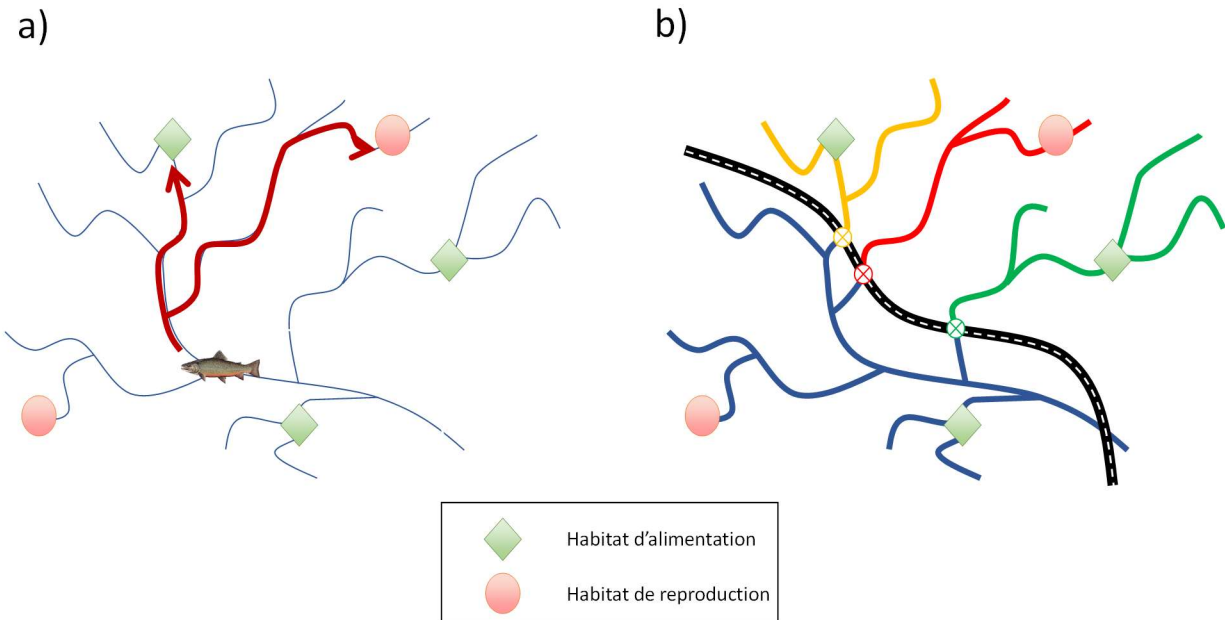
Le degré avec lequel les déplacements des poissons entre ces diverses parcelles d'habitats sont facilités ou entravés se nomme « connectivité du paysage » (Baguette *et al.*, 2012). Cette connectivité inclut deux composantes, soit la connectivité structurelle, *c.-à-d.* les relations physiques entre les parcelles d'habitats (ex. la distance physique ou la présence de multiples barrières) et la connectivité fonctionnelle, *c.-à-d.* la réponse comportementale du poisson face à la structure du paysage et les autres composantes de son environnement. La connectivité fluviale et l'agencement des différentes parcelles d'habitats sont des notions très importantes en biologie de la conservation, et ce, à toutes les échelles spatiales et temporelles (Le Pichon *et al.*, 2009, Le Pichon *et al.*, 2016).

## 2.2 La fragmentation des habitats fluviaux et ses conséquences écologiques

La fragmentation est définie comme le morcellement d'un habitat continu en plusieurs fragments d'habitats isolés par une matrice distincte (Wilcove *et al.*, 1986, Fahrig, 2003). Elle touche aussi bien les habitats terrestres que les habitats fluviaux. Plusieurs éléments naturels sont susceptibles de fragmenter le paysage terrestre et fluvial. L'exploitation forestière, la déforestation pour l'agriculture, les routes ainsi que l'étalement urbain sont parmi les principaux facteurs anthropiques contribuant à la fragmentation des milieux terrestres et aquatiques.

Plusieurs structures naturelles ou anthropiques peuvent constituer des obstacles pour les déplacements des poissons dans les cours d'eau. Les obstacles d'origine naturelle sont composés majoritairement de chutes (Carlsson *et al.*, 2001, Castric *et al.*, 2001, Meixler *et al.*, 2009, Torterotot *et al.*, 2014), mais certaines études démontrent également l'effet potentiel des barrages de castors (Kemp *et al.*, 2012) et des embâcles de bois (Wadham-Gagnon *et al.*, 2010). Les chutes sont des obstacles naturels de taille puisqu'ils empêchent tout déplacement des poissons dont la capacité de saut est inférieure à la hauteur de chute. Les barrages de castor et les embâcles de bois peuvent également constituer des barrières de façon temporaire, ou du moins peuvent gêner les déplacements des poissons dont la taille est supérieure aux espaces d'entrecroisement des branches. Les obstacles d'origine anthropique sont, quant à eux, majoritairement composés de barrages, de seuils et de ponceaux (Gibson *et al.*, 2005, Park *et al.*, 2008). Si ces structures ne sont pas munies d'une passe migratoire adjacente ou ne sont pas conçues et installées selon les règles de l'art, leur présence peut grandement affecter le déplacement des poissons.

La fragmentation constitue donc une menace importante pour les habitats fluviaux (Fagan, 2002). Contrairement aux systèmes terrestres où les parcelles d'habitats peuvent être connectées par plusieurs surfaces et corridors de déplacements, les écosystèmes fluviaux sont des systèmes dendritiques, où les corridors de dispersion sont limités à des systèmes linéaires. Cette configuration structurale des systèmes fluviaux limite grandement les alternatives de déplacement des communautés de poissons (Fagan, 2002, Campbell Grant *et al.*, 2007, Cote *et al.*, 2009). Du coup, la présence d'une ou plusieurs barrières successives (ex. routes munies de ponceaux difficilement franchissables) se traduit par une réduction globale de la connectivité de l'écosystème fluvial (Figure 3). Cet enjeu étant de plus en plus reconnu, plusieurs modèles basés sur la connectivité des systèmes dendritiques fluviaux ont été récemment élaborés (Cote *et al.*, 2009, Fullerton *et al.*, 2010, Diebel *et al.*, 2014).



**Figure 3. La fragmentation des écosystèmes fluviaux dendritiques: a) un écosystème fluvial non fragmenté où les poissons ont accès à différents habitats vitaux ; b) le même écosystème après la construction d'une route munie de ponceaux peu ou non franchissables où l'accès à certains habitats est restreint. Après la construction de la route, la population de poissons se retrouve fragmentée en quatre petites populations isolées (couleurs bleu, jaune, rouge et vert). À long terme, cet isolement mène à une différenciation génétique.**

La réduction de la connectivité et de la taille des différentes parcelles d'habitats se traduit par une variété de conséquences écologiques qui affecte une grande diversité d'espèces animales, et ce, sur tout le continuum d'échelle spatio-temporelle (Andrén, 1994, Collinge, 1996, Debinski *et al.*, 2000, Keller *et al.*, 2004, Dixo *et al.*, 2009). D'ailleurs, la littérature scientifique abonde en études traitant des conséquences génétiques de la fragmentation. Une perte de connectivité, partielle ou totale, restreint les déplacements des poissons, menant ainsi à une diminution du flux de gènes d'une population à l'autre. Cette entrave aux flux génétique peut ultimement provoquer un changement dans la structure et la diversité génétique même des populations isolées de poissons (Torterotot *et al.*, 2014) (Figure 3b). D'un point de vue génétique, la fréquence des allèles (variation d'un même gène) diffère grandement entre les populations isolées par des barrières de dispersion (Wofford *et al.*, 2005). Les petites populations isolées sont plus à risque d'être affectées par la dérive génétique, un déséquilibre du rapport des sexes ou les perturbations naturelles ou anthropiques. Les populations isolées ne réussissant pas à s'adapter aux perturbations locales (ex. dégradation des habitats, espèces compétitrices) sont vulnérables aux changements génétiques et sont moins viables à moyen et long terme,

certaines pouvant même disparaître après seulement deux générations (Morita *et al.*, 2002, Letcher *et al.*, 2007).

### **2.3 La fragmentation par les ponceaux : les causes et les conséquences**

Moins impressionnant en taille que les barrages, les ponceaux sont présents en très grand nombre et partout sous le réseau routier. Plusieurs variables hydrauliques et physiques sont susceptibles d'entraver la libre circulation des poissons dans les ponceaux : une vitesse d'écoulement excessive de l'eau, la présence d'une chute à la sortie aval, la faible profondeur d'eau, les caractéristiques physiques du ponceau (ex. longueur, pente, rugosité) et la présence ou l'absence de substrat naturel. Les ponceaux peuvent constituer des barrières partielles ou totales (ex. chutes infranchissables), temporaires (ex. crues ou étiages) ou permanentes. Les ponceaux initialement non conformes proviennent d'une mauvaise conception ou une mauvaise installation. Bien que les ponceaux puissent être conçus selon les normes environnementales en vigueur, ces ouvrages sont souvent localisés dans un environnement extrêmement dynamique. La géomorphologie fluviale du tronçon d'accueil d'un ponceau est donc sujette à se transformer au fil des ans. Par exemple, la force d'impact de l'eau à la sortie aval d'un ponceau favorisera progressivement l'apparition d'une chute. C'est pourquoi l'âge d'un ponceau est également un facteur à prendre en compte lors d'un inventaire ou d'une priorisation de réfection (Park *et al.*, 2008). Les caractéristiques du ponceau et les conditions hydrauliques du cours d'eau (ex. débit et turbulence) vont également interagir pour modifier les conditions d'écoulement au niveau local, c.-à-d. à l'intérieur même du ponceau et à sa périphérie. En diminuant l'aire d'écoulement (diamètre du ponceau inférieur à la largeur de l'aire d'écoulement naturel du cours d'eau) et la rugosité du fond, la présence d'un ponceau a pour principal effet d'augmenter la vitesse d'écoulement de l'eau. La présence d'une chute à la sortie aval du ponceau peut également rendre difficile l'entrée dans le ponceau, ou voir même empêcher les poissons d'y entrer si leur capacité de saut est plus faible que la hauteur de la chute (Kondratieff *et al.*, 2006). Cependant, la capacité de saut est également variable selon la profondeur de la fosse aval, une fosse plus profonde permettant aux poissons d'atteindre une hauteur de saut plus élevée. Une faible profondeur d'eau limitera grandement les mouvements de nage des poissons. Un poisson peut également voir ses chances réduites de franchir le ponceau si la conduite est trop longue, forçant celui-ci à s'épuiser avant de la franchir complètement. Les poissons qui tentent de franchir un ponceau ont également peu d'endroits pour se reposer (refuges hydrauliques), contrairement au cours d'eau d'origine, parsemé de fosses et de blocs. Les ponceaux peuvent également constituer une barrière comportementale si les poissons se résignent à ne pas franchir un

ponceau en raison de la noirceur qui y règne (Goerig *et al.*, 2017b) ou si la vitesse d'écoulement élevée ou la turbulence de l'eau affecte sa stratégie comportementale (Castro-Santos *et al.*, 2013).

La présence de ponceaux non conforme au libre passage des poissons restreint les déplacements de ceux-ci et favorise l'isolement des populations (Gibson *et al.*, 2005, Park *et al.*, 2008, Poplar-Jeffers *et al.*, 2009). Au Québec, un récent inventaire a classé plus de 50 % des ponceaux ( $n = 86$ ) situés dans les bassins versants des rivières Matapédia et Patapédia comme représentant un obstacle aux déplacements de salmonidés adultes et juvéniles (Constantin *et al.*, 2015). D'autres études ont également démontré qu'une grande proportion des ponceaux installés dans les provinces canadiennes (de 30 à 50%) représente un obstacle à la libre circulation de la faune ichthyenne (Park *et al.*, 2008, Price *et al.*, 2010). À l'échelle des bassins versants, la présence de ponceaux inadéquats empêche ou restreint l'accès à une grande proportion d'habitats essentiels d'alimentation, de reproduction ou de fuite situés en amont de ces structures (Poplar-Jeffers *et al.*, 2009) et réduit également la qualité de l'habitat à l'échelle d'un tronçon fluvial (Gibson *et al.*, 2005). De nombreuses études montrent que les ponceaux altèrent la capacité de dispersion des poissons (Benton *et al.*, 2008, Burford *et al.*, 2009, Mahlum *et al.*, 2013). Les déplacements limités affectent ultimement la densité des poissons retrouvée de part et d'autre des ponceaux (Davis *et al.*, 2011, Pépino *et al.*, 2012) ainsi que la richesse spécifique (Nislow *et al.*, 2011). Les déplacements des poissons diffèrent également selon l'espèce (Warren *et al.*, 1998, MacPherson *et al.*, 2012), certaines étant dotées d'une morphologie et d'un métabolisme leur permettant une plus grande capacité de nage. Plusieurs études ont également démontré l'effet positif du remplacement de ponceaux désuets ou non adaptés sur les populations de poissons. Par exemple, dans une étude effectuée en Norvège, les ponceaux à paroi en béton lisse considérés comme infranchissables ont été adaptés, ce qui est permis de redonner l'accès à plusieurs centaines de mètres de cours d'eau aux poissons (Erkinaro *et al.*, 2017).

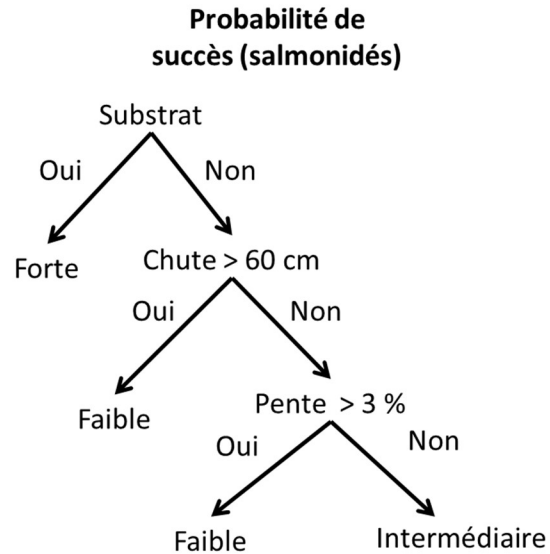
#### **2.4 L'évaluation du succès de passage dans les ponceaux : une inadéquation entre les études en laboratoire et *in situ***

Il existe actuellement plusieurs méthodes d'évaluation de l'impact des ponceaux sur le succès de passage des poissons, celles-ci différant selon les objectifs de recherche ou de gestion, selon le budget disponible, et selon les connaissances de l'évaluateur (Kemp *et al.*, 2010). La méthode de marquage-recapture, qui consiste à marquer des individus à l'aide de



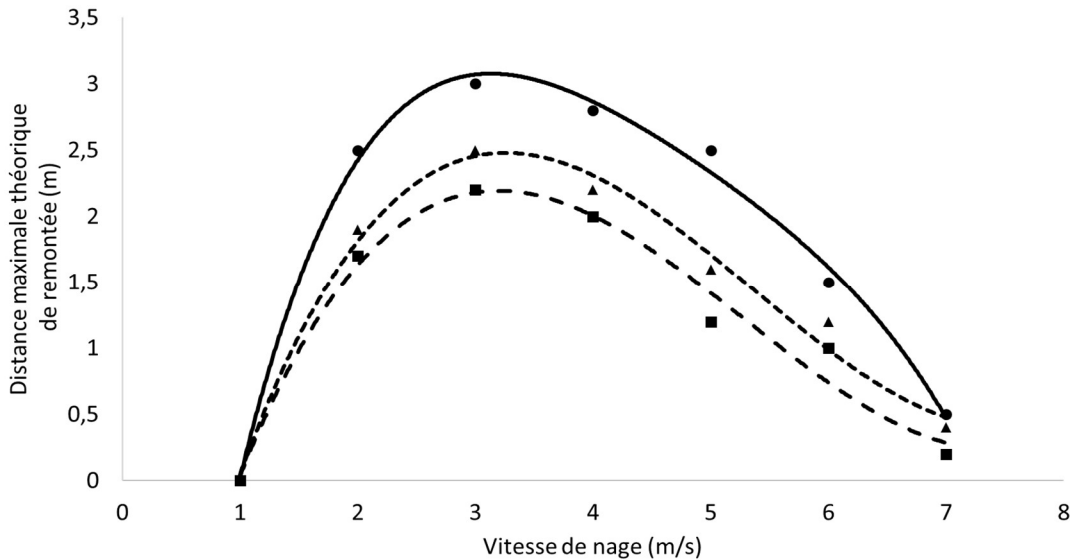
marques visuelles ou électroniques en aval du ponceau et à les recapturer en amont, est une méthode largement utilisée (Belford *et al.*, 1989, Warren *et al.*, 1998, Benton *et al.*, 2008, Burford *et al.*, 2009, Nislow *et al.*, 2011, Briggs *et al.*, 2013). Cette technique ne permet cependant pas de mesurer tous les mouvements effectués dans le ponceau. Le suivi télémétrique en continu à l'aide d'antennes radio permet de combler cette lacune (Mahlum *et al.*, 2013, Goerig *et al.*, 2016). Des transpondeurs passifs intégrés munis d'un identifiant unique sont insérés dans la cavité abdominale des poissons. Lorsque celui-ci passe à proximité d'une antenne, sa position est enregistrée à la date et à l'heure précise (Barbin Zydlewski *et al.*, 2001). Des méthodes indirectes peuvent également être utilisées. Il s'agit de mesurer la densité, la richesse spécifique ou l'abondance des poissons en aval et en amont des conduites, ou tout simplement déterminer leur absence-présence, principalement à partir de pêches électriques (Nislow *et al.*, 2011, MacPherson *et al.*, 2012, Pépino *et al.*, 2012). À plus grande échelle, des techniques basées sur la génétique permettent de tenir compte des mouvements d'individus et de la différenciation génétique pour déduire la connectivité entre plusieurs populations (Wofford *et al.*, 2005, Torterotot *et al.*, 2014).

Il existe également des modèles élaborés à partir de données de capacité de nage acquises en laboratoire. Le plus simple de ces modèles est un arbre de classification prenant en compte des variables statiques. Cette dernière consiste à soumettre les caractéristiques physiques d'un ponceau – sa pente, sa longueur ou la présence d'une chute – à un algorithme constitué de différents critères de classification (Figure 4) (Love *et al.*, 2003, Coffman, 2005, Poplar-Jeffers *et al.*, 2009). Les seuils de classement diffèrent selon la performance de nage des poissons d'intérêt, celle-ci variant de faible (ex. barbottes) à élevée (ex. salmonidés). Cette méthode est souvent utilisée pour classer une grande quantité de ponceaux en peu de temps, par exemple à l'échelle d'un bassin versant.



**Figure 4. Arbre décisionnel pour la classification adapté de Love et Taylor (2003). Chaque ponceau est classé en fonction de sa probabilité à laisser passer les poissons (ici les salmonidés). La probabilité variant de faible à élevée.**

Il existe également des modèles de prédiction du succès de passage intégrant à la fois les données hydrauliques de l'écoulement de l'eau et la taille des poissons. Un de ces modèles, basé sur le seuil d'épuisement (*exhaustion-threshold model*), permet d'estimer la vitesse moyenne d'écoulement à partir de laquelle il est impossible pour un poisson de franchir un ponceau d'une longueur donnée (Peake *et al.*, 1997, Neary, 2012). Les courbes de seuil d'épuisement sont construites en mettant en relation la vitesse de nage et le temps à l'épuisement, pour différents modes de nage (sprint, prolongé, soutenu). Un poisson sera incapable de franchir un ponceau si la vitesse d'écoulement est égale ou supérieure au seuil. L'autre modèle, dérivé du même principe, permet d'estimer la distance qu'un poisson peut franchir contre une vitesse d'écoulement donnée en assumant qu'il nage à une vitesse optimale (*ascent-distance model*) (Castro-Santos *et al.*, 2013). La distance maximale de remontée d'un poisson d'une taille donnée contre une certaine vitesse d'écoulement peut alors être comparée à la longueur du ponceau (Figure 5). Si le ponceau est plus long que la distance maximale de remontée, le poisson ne réussira pas à le franchir.

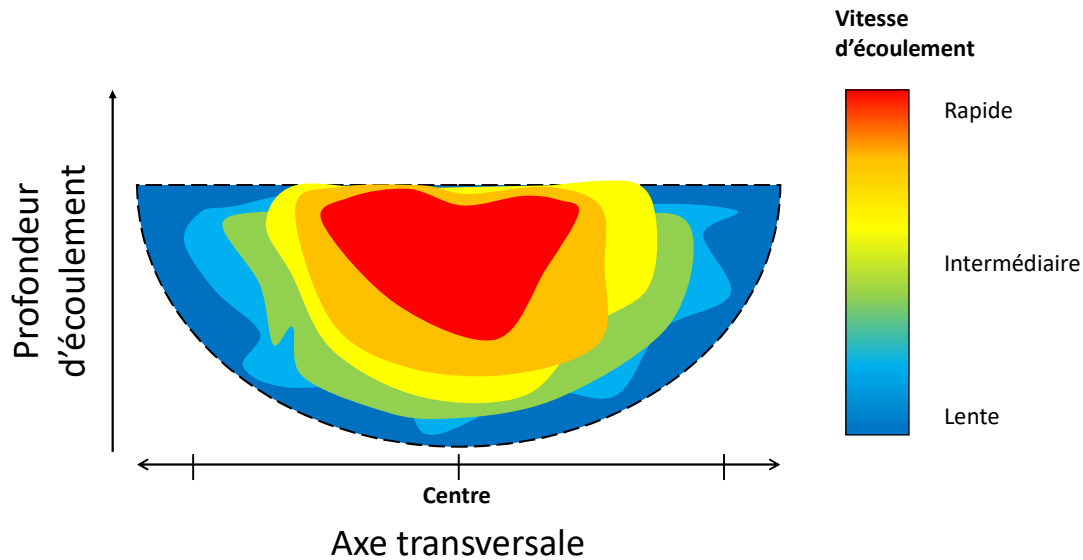


**Figure 5. Relation théorique de la distance de remontée maximale atteinte par un poisson en fonction de sa vitesse de nage absolue, pour trois conditions hydrauliques (cercle et ligne continue : vitesse d'écoulement faible, triangle et ligne pointillée : vitesse d'écoulement intermédiaire, carré et ligne discontinue : vitesse d'écoulement élevée). Inspiré de Castro-Santos (2013).**

Ces modèles sont souvent intégrés dans des logiciels afin d'en faciliter l'utilisation. *FishXing*, un logiciel très populaire auprès des ingénieurs, des hydrologues et des biologistes est largement utilisé pour l'évaluation et la conception des ponceaux en ce qui concerne le libre passage des poissons (Furniss *et al.*, 2008, Mahlum *et al.*, 2013). Basé sur le modèle « seuil d'épuisement », ce logiciel permet de prédire si un poisson d'une taille donnée peut franchir un ponceau sous différentes conditions hydrauliques (Furniss *et al.*, 2008). Les vitesses d'écoulement de l'eau dans la conduite sont estimées et comparées à la capacité de nage de l'espèce d'intérêt. Si les vitesses d'écoulement sont trop élevées pour la distance que doit parcourir le poisson (la longueur de la conduite) et si la hauteur de chute excède sa capacité de saut, le ponceau est classé comme impassable. Afin de vérifier la validité de ces modèles, plusieurs études ont comparé les sorties calculées dans le logiciel *FishXing* aux données de succès de passage dans des ponceaux sous des conditions naturelles (observations terrain). Les résultats de ces études montrent une très faible correspondance entre les observations terrain et les données prédites par ce logiciel, ce dernier ayant la tendance à surestimer le nombre de ponceaux infranchissables (Burford *et al.*, 2009, Poplar-Jeffers *et al.*, 2009, Mahlum *et al.*, 2013).

Plusieurs facteurs expliquent cette discordance entre le succès de passage estimé et réel. Premièrement, les données de capacité de nage obtenues en laboratoire ne représentent pas fidèlement le comportement adopté par les poissons lorsqu'ils franchissent un ponceau sous des

conditions naturelles (Peake, 2004, Castro-Santos, 2006, Tudorache *et al.*, 2007, Castro-Santos *et al.*, 2013). En laboratoire, les poissons sont contraints à nager dans des endroits clos (tunnels de nage), ce qui restreint leurs mouvements. De plus, les poissons sont forcés de nager jusqu'à épuisement, alors qu'il en est tout autrement en conditions naturelles. En nageant librement, les poissons sont également en mesure d'utiliser plus efficacement différents types de muscles. Une autre explication est la présence de complexité hydraulique dans les ponceaux, ce qui n'est pas le cas des essais dans des tunnels de nage conventionnels. Les ponceaux démontrent des distributions de vitesses complexes, telles que des écoulements turbulents et des vitesses d'écoulement non uniformes (Richmond *et al.*, 2007, Hunt *et al.*, 2012, Clark *et al.*, 2014). Les ponceaux munis d'ondulations offrent une plus grande résistance à l'écoulement de l'eau (coefficient de rugosité de Manning plus élevé), créant une gamme croissante de vitesses d'écoulement à partir des parois vers le centre, où la vitesse d'écoulement est maximale (Figure 6). Les zones où les vitesses d'écoulement sont plus faibles peuvent être utilisées par les poissons à leur avantage afin de minimiser la dépense énergétique lors d'une ascension. Ce phénomène a d'ailleurs été observé dans plusieurs études. Par exemple, des études effectuées dans des ponceaux expérimentaux ont montré que la majorité des poissons traversaient la conduite en longeant les parois, où la vitesse d'écoulement était plus faible (Johnson *et al.*, 2012, Peterson *et al.*, 2013). Une récente étude a également démontré que la probabilité de succès de passage dans les ponceaux rugueux est plus élevée que dans les ponceaux à paroi lisse, et ce, pour les poissons de petite taille (Goerig *et al.*, 2016), suggérant que les poissons utilisent possiblement la complexité hydraulique à leur avantage.



**Figure 6. Coupe transversale schématisée montrant la distribution non uniforme des vitesses d'écoulement dans un ponceau rugueux. La vitesse d'écoulement est plus faible le long de la paroi (zone de vélocité réduite) et plus élevée au centre.**

## **2.5 La personnalité des salmonidés : une composante importante de l'équation**

Bien que la capacité de nage des poissons joue un rôle primordial dans leur succès de franchissement d'obstacles physiques, certaines études démontrent également le rôle important du comportement dans leur aptitude à franchir ces obstacles (Castro-Santos *et al.*, 2013, Goerig *et al.*, 2017a). Un poisson peut donc avoir la capacité physiologique pour franchir une barrière physique, mais encore faut-il qu'il soit motivé à le faire. Une étude réalisée sur l'omble de fontaine et la truite brune, deux espèces de salmonidés aux capacités physiques et physiologiques similaires, a démontré que le nombre de tentatives pour franchir l'obstacle était supérieur chez la truite brune (Castro-Santos *et al.*, 2013). Une étude récente réalisée dans des ponceaux situés dans des cours d'eau naturels a montré une grande variabilité dans le nombre de tentatives effectuées par les poissons pour franchir les conduites (Goerig *et al.*, 2017b). Plusieurs variables ont influencé le nombre de tentatives, celui-ci étant plus élevé pendant la période de reproduction et à des débits élevés. Dans la même étude, le nombre de tentatives était moins élevé le jour que le reste de la journée, suggérant le possible effet du changement de luminosité sur la motivation du poisson. La variabilité comportementale interindividuelle et interpopulationnelle du mouvement est un phénomène souvent observé chez les salmonidés (Bradford *et al.*, 1997, Morrissey *et al.*, 2011, Roy *et al.*, 2013). Ces études suggèrent donc que les poissons n'adoptent pas tous le

même type de comportements dans leurs activités quotidiennes ou lorsqu'ils font face à un environnement exigeant.

La motivation est un concept abstrait et peu étudié à ce jour. Toutefois, l'étude de la personnalité chez les animaux a été très documentée à partir de protocoles expérimentaux standardisés. La personnalité est ici définie comme une différence individuelle comportementale constante dans le temps et à travers différents contextes (Gosling, 2001, Dall *et al.*, 2004, Reale *et al.*, 2007). Pour être considérée comme un trait de personnalité valable, l'expression du même comportement doit être observée à plusieurs reprises et ne doit pas changer entre différents contextes. Il existe essentiellement cinq traits de personnalité : audace, exploration, activité, agressivité et sociabilité (Conrad *et al.*, 2011). Chacun de ces traits est constitué d'un binôme dont les éléments s'opposent sur un axe continu. Par exemple, un individu peut être audacieux ou craintif et son niveau d'audace peut se situer à mi-chemin entre les deux. Il a été démontré que les traits de personnalité peuvent être héréditaires et donc se transmettre entre deux générations subséquentes (Brown *et al.*, 2007, Höjesjö *et al.*, 2011), et que certains traits sont corrélés entre eux (Conrad *et al.*, 2011). Les traits de personnalité peuvent donc avoir plusieurs conséquences écologiques qui varient selon le contexte et le niveau d'organisation (individuel ou populationnelle). Par exemple, un poisson audacieux, et donc moins craintif, qui se retrouve dans un habitat présentant une présence accrue de prédateurs pourra faire face à une plus faible probabilité de survie. La tendance à prendre des risques (audace ou tendance à explorer) peut définir la stratégie d'alimentation d'un poisson, les poissons audacieux adoptant une recherche active de proies (Farwell *et al.*, 2009). Cet amalgame de conséquences écologiques sur le fitness d'un individu est également connu comme le continuum du mode de vie (*pace-of-life continuum*) (Réale *et al.*, 2010). Cette théorie suggère, par exemple, que les individus audacieux et actifs montreront une croissance plus rapide, se reproduiront plus rapidement et auront une vie plus courte.

Plusieurs études ont montré qu'il existe un lien entre la personnalité et le comportement spatial, et ce, pour une variété d'espèces animales. Les poissons classés comme étant audacieux parcourent de plus grandes distances (Fraser *et al.*, 2001, Chapman *et al.*, 2011, Cote *et al.*, 2011). Les poissons peu sociables montrent également une plus grande tendance à se disperser (Cote *et al.*, 2011) tout comme les individus explorateurs (Rasmussen *et al.*, 2012), ces observations étant prédites par la théorie du continuum du mode de vie. La majorité de ces études ont été effectuées en laboratoire et peu d'études en milieux naturels ont permis de confirmer ce phénomène.

### **3. MÉTHODOLOGIE**

#### **3.1 Suivi du comportement spatial de l'omble de fontaine dans un ponceau routier**

##### **3.1.1 Site d'étude**

Cette étude a été réalisée dans le bassin versant de la rivière Sainte-Marguerite (Québec, Canada), à la jonction entre la route 172 et le ruisseau Morin (48°20'49.5"N, 70°03'38.8"O), entre le 16 juillet et le 27 septembre 2014. Le site est constitué d'un ponceau triple de trois conduites où celle du centre a été utilisée pour la présente étude (Figure 7). Cette conduite est de forme circulaire, en tôle ondulée galvanisée, d'une longueur de 34.75 m, d'un diamètre de 2.20 m et de pente moyenne de 1.49 %. La conduite est divisée en deux sections, la première, de l'extrémité aval à 4 m, possède des ondulations d'une amplitude de 5 cm et d'une longueur d'onde de 13 cm. La deuxième section, de 4 m jusqu'à l'extrémité amont du ponceau, possède des ondulations d'une amplitude de 3 cm et d'une longueur d'onde de 10 cm. Les autres conduites ont permis de faire varier les conditions hydrauliques présentes à l'intérieur de la conduite de l'étude (*voir section 3.1.5 Conditions hydrauliques*)

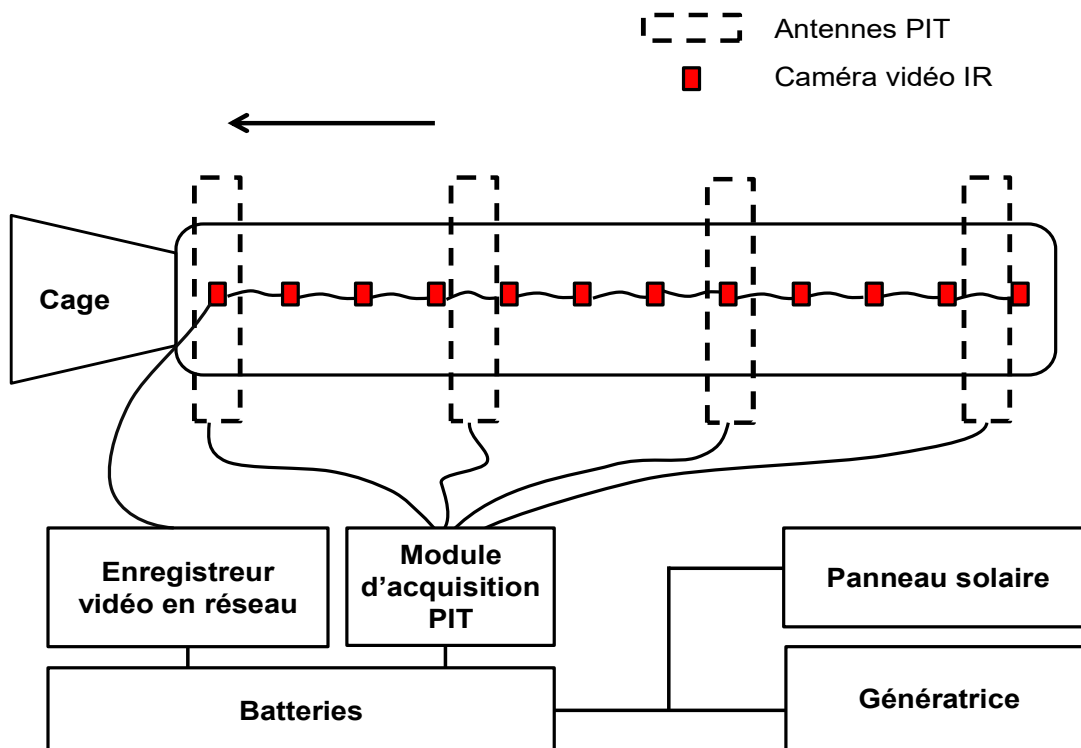


**Figure 7. Site d'étude constitué de trois conduites en tôle ondulée galvanisée. Médaille : intérieur de la conduite utilisée pour l'étude.**

### **3.1.2 Système de suivi**

Le système de suivi des trajectoires de nage des poissons dans le ponceau est composé d'un système d'enregistrement vidéo ainsi que d'un système de télémétrie à transpondeurs passifs intégrés (PIT) (Figure 8).



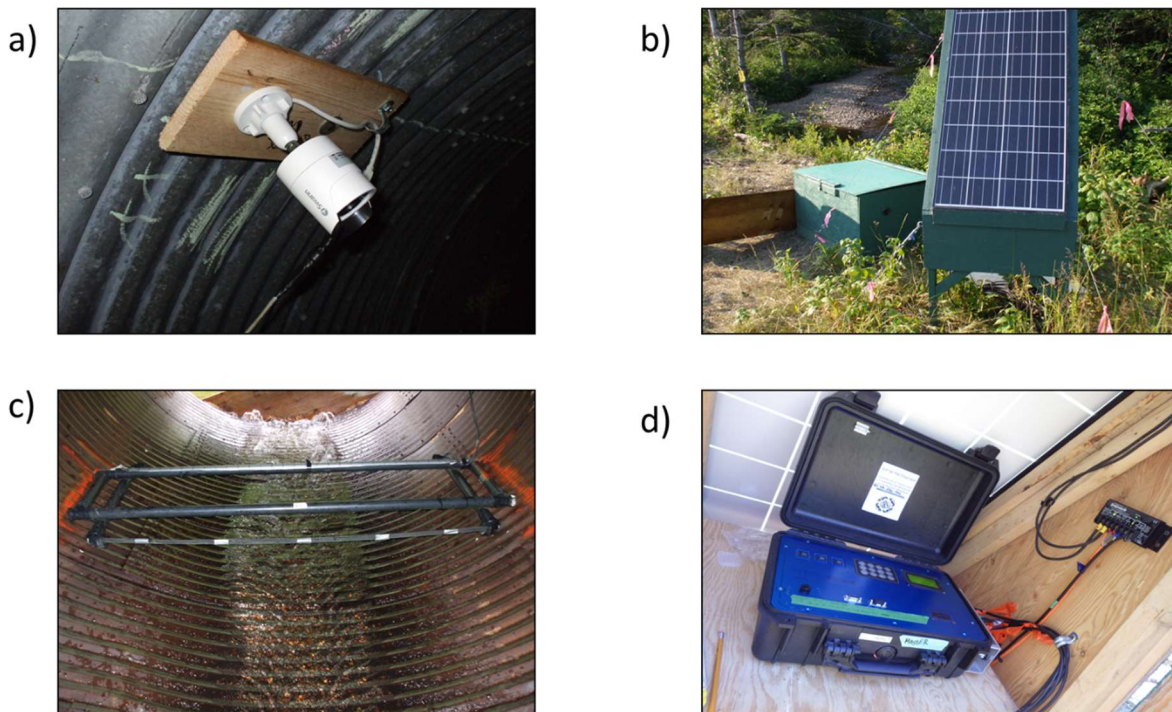


**Figure 8. Représentation schématique du ponton équipé avec les caméras vidéo infrarouges, les antennes PIT et tous les systèmes auxiliaires requis pour leur opération. La flèche indique le sens de l'écoulement de l'eau dans la conduite. Les lignes solides représentent les câbles électriques et de communications.**

Pour le système d'enregistrement vidéo, 12 caméras vidéo (DS-2CD2032, Hikvision) à éclairage infrarouge ( $\lambda \approx 850 \text{ nm}$ ) ont été fixées au plafond de la conduite à équidistances (Figure 9a). Le champ de vision de la caméra permet de couvrir une surface de 3 mètres de long et 1,4 mètre de large. Une légère inclinaison des caméras a permis de diminuer le reflet de la lumière infrarouge réfléchissant à la surface de l'eau. Ces caméras sont connectées à un récepteur-enregistreur (CONVR-A81080P, SWANN Communications) à l'aide de câbles de transmission de catégorie 5 (100 MHz, 10 – 1000 Mb/s). L'alimentation électrique du système de suivi vidéo est fournie par l'entremise d'un parc de trois duos de batteries à charge profonde de 6 V (210 Ah, AGM- 2000, U.S. Battery), branchées en parallèle, pour une tension totale de 12 V. Un onduleur portatif (MotoMaster Eliminator, 3000 W) permet de convertir l'alimentation de 12 V (courant continu) en alimentation 120 V (courant alternatif), pour l'utilisation du système vidéo. Les batteries sont chargées à l'aide d'une génératrice (EP2500CX, Honda). Le stockage des images est effectué sur des disques durs internes de 2 TO (WD20EZR et WD20PURX, Western Digital). Il est pertinent de noter que la lumière infrarouge (IR proche, 700 – 1400 nm) n'est pas perceptible

par plusieurs vertébrés, incluant les salmonidés, ces derniers percevant plutôt le spectre se situant entre 364 et 690 nm (Ali, 1961).

Quatre antennes de suivi télémétrique passif intégré (PIT) ont également été installées à équidistances le long du ponceau afin de suivre chaque individu lors de l'ascension (Figure 8). Les antennes sont composées d'un cadre de tuyaux ABS surmonté de quatre boucles de câble électrique composé d'un conducteur multibrin (*American wire gauge* : 10), formant une antenne de 0.75 X 1.55 m (Figure 9c). Les antennes sont fixées à une boîte de réglage du champ magnétique situé à l'intérieur du ponceau, puis connectées à un récepteur-enregistreur à quatre entrées (Module Quatro, HDX-134.2 kHz, Technologie Aquartis) (Figure 9d). Le système de télémétrie PIT est alimenté par un duo de batteries à charge profonde de 6 V (210 Ah, AGM-2000, U.S. Battery), afin de former une source d'alimentation de 12 V. Un panneau solaire de 110W, branché à un régulateur solaire (SunSaver, 10 A -12 V, Morningstar), permet de charger les batteries (Figure 9b). Étant synchronisées avec les enregistrements vidéo, les antennes permettent d'identifier le poisson visible sur les images lors des analyses vidéo.



**Figure 9. Images du système de suivi vidéo et télémétrique utilisé dans la présente étude : a) caméra vidéo à éclairage infrarouge; b) panneau solaire; c) antenne de suivi télémétrique passif intégré; d) système d'enregistrement des données télémétriques.**

### 3.1.3 Capture et marquage

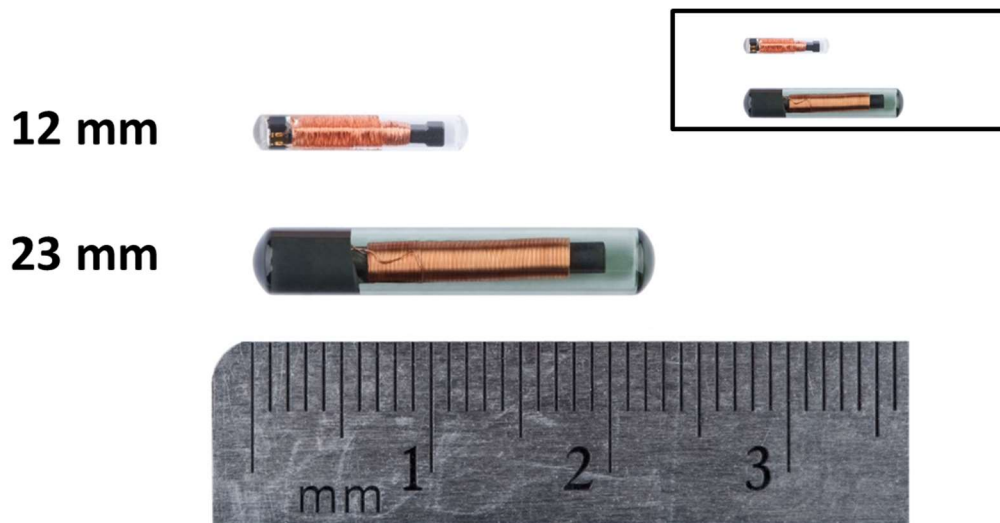
Entre le 16 juillet et le 25 septembre 2014, un total de 94 ombles de fontaine (LF = 78-240 mm; moyenne =  $118 \pm 31$  mm) ont été capturées par pêche électrique (15-C, Honda EX350, Smith-Root), en effectuant des passes uniques sur trois tributaires adjacents de la rivière Sainte-Marguerite incluant le site d'étude (Tableau 1). La taille des individus de l'essai P4 est significativement inférieure à la taille des individus de l'essai P1. Il est important de noter ici que les essais correspondent aux différentes conditions hydrauliques utilisées lors de la documentation du comportement de nage des poissons dans le ponceau (*voir section 3.1.5 Conditions hydrauliques*).

**Tableau 1. Caractéristiques morphométriques des poissons utilisés dans chacun des essais**

Essai	Nombre d'individus	Longueur moyenne à la fourche (mm)	Poids moyen (g)	Indice de fulton (m)
P1	30	$127 (\pm 37)^a$	$26,9 (\pm 30,5)$	$0.99 (\pm 0.09)$
P2	30	$121 (\pm 31)^{ab}$	$18,9 (\pm 17,8)$	$0.84 (\pm 0.10)$
P4	32	$108 (\pm 23)^b$	$15,2 (\pm 9,5)$	$1,09 (\pm 0.14)$

*Notes: La longueur à la fourche des ombles de P1 était significativement différente que celle des ombles de P4. Tel que calculé à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis et une analyse post hoc (Mann-Whitney). L'essai P3 n'a pas eu lieu à cause de problèmes techniques (voir section 3.1.5 Conditions hydrauliques).*

La pêcheuse a été réglée pour s'ajuster à la conductivité du milieu et minimiser l'impact du champ électrique sur les poissons (voltage : 600-900 V; fréquence : 60 Hz; facteur de charge : 35-50 %). Les individus ont ensuite été anesthésiés individuellement par immersion dans une solution (0.7 – 1.0 ml/L) d'huile essentielle de clous de girofle et d'alcool pur à 90 %, à raison d'une partie d'huile pour dix parties d'alcool. Par la suite, des transpondeurs passifs intégrés (*PIT tags*) de 12 mm (TRPGR30TGC, 134,2 kHz, Texas Instruments) ou 23 mm (RI-TRP-WRHP, 134,2 kHz, Texas Instruments) ont été introduits dans la cavité péritonéale des individus, à la hauteur des nageoires pectorales (Figure 10).



**Figure 10. Différence entre les transpondeurs de 12 et 23 mm. Médaille : taille réelle.**

Les transpondeurs de 12 mm (0,10 g) ont été utilisés pour les poissons ayant une taille comprise entre 80 et 120 mm alors que ceux de 23 mm (0,60 g) ont été utilisés pour les poissons de taille supérieure à 120 mm. Le rapport entre le poids du transpondeur et le poids du poisson se situe autour de 2 %, respectant ainsi les normes établies par le consensus scientifique (Brown *et al.*, 1999, Brown *et al.*, 2006, Perry *et al.*, 2013). L'utilisation des transpondeurs passifs de 12 et 23 mm est justifiable, puisque l'effet de leur implantation sur la survie et la capacité de nage des poissons de plus de 80 mm est faible (Ombredane *et al.*, 1998, Sigourney *et al.*, 2005, Bateman *et al.*, 2006, Newby *et al.*, 2007, Larsen *et al.*, 2013, Richard *et al.*, 2013). L'incision a été refermée à l'aide de colle chirurgicale à base de cyanoacrylate (VetBond, 3M Canada). Suite à la chirurgie, les poissons ont été déposés dans des viviers installés sur le lit du ruisseau, selon trois classes de taille arbitraires: petits : 80-119 mm; moyens : 120-159 mm; gros : 160 mm et plus, de sorte à diminuer les risques de comportements antagonistes. Les viviers ont été déposés dans un contre-courant, à l'ombre, et des pierres servant de refuges ont été déposées dans les viviers afin de minimiser le stress (Portz *et al.*, 2006). Les poissons ont été laissés au repos pour une période de 12 à 16 heures précédant la suite de la séquence expérimentale. Seul un individu est décédé des suites de la chirurgie. Tous les autres poissons étaient en excellente santé au début de l'expérimentation (aucune présence de maladie, nageoires non érodées, coloration normale, aucune malformation et cicatrice bien refermée).

### 3.1.4 Séquence expérimentale

La journée suivant le marquage, la personnalité des poissons a été documentée selon un protocole standardisé issu de la littérature (*voir section 3.2 Effet de la personnalité*). Les poissons ont par la suite été mis au repos dans les viviers pour une période de 28 à 30 heures. La prise de mesures hydrauliques dans la conduite s'est effectuée pendant cette période, immédiatement avant la documentation du comportement spatial des poissons dans la conduite. À la fin des mesures hydrauliques, les poissons ont été transférés dans une cage (environ 2 m x 2 m x 1 m) connectée à la sortie aval de la conduite et dont la seule issue possible était de franchir la conduite. À partir de ce moment, les poissons étaient libres de rester dans la cage ou d'effectuer une tentative d'ascension dans la conduite. Une période de 72 heures a été allouée pour l'enregistrement des trajectoires des poissons.

### 3.1.5 Conditions hydrauliques

Ce protocole a été répété à quatre reprises sous différentes conditions hydrauliques. Seulement trois des quatre essais ont pu être complétés, le troisième essai ayant dû être interrompu en raison d'une importante crue. Ces trois essais seront dorénavant nommés P1 (0,08 m<sup>3</sup>/s), P2 (0,20 m<sup>3</sup>/s) et P4 (0,36 m<sup>3</sup>/s). Pour chaque essai, les mesures de la vitesse d'écoulement ont été effectuées à l'aide d'un vélocimètre à hélice (Modèle 3000, Swoffer Instruments), sur 17 transects transversaux distants de 2 mètres le long de la conduite. Pour chaque transect, la profondeur d'eau, soit la distance entre la surface de l'eau et le sommet des ondulations, a été mesurée à six verticales équidistantes de 20 cm, pour un total de 102 verticales le long de la conduite. La vitesse moyenne de l'écoulement à chacune des verticales a été obtenue à partir d'une mesure de vitesse enregistrée à 60 % de la profondeur pendant 30 secondes (Gordon *et al.*, 2004). Les vitesses moyennes et les profondeurs d'écoulement ont ensuite été interpolées en utilisant une interpolation cubique (Matlab, R2014a, MathWorks) dans le but de produire une carte des vitesses (Figure 11) et des profondeurs d'écoulement (Figure 12) sur la totalité de la surface mouillée de la conduite. Cette interpolation a permis d'assigner une vitesse et une profondeur d'écoulement à chacune des coordonnées de la trajectoire suivie par un poisson. Le débit et la vitesse moyenne de l'écoulement de l'eau dans la conduite ont été estimés pour chaque essai à l'aide d'une méthode d'intégration numérique à pas constant (règle de Weddle). La température a été mesurée à intervalles de 15 minutes pendant l'ensemble de la période d'étude à l'aide d'une sonde (Hobo Level Logger, modèle U-DTW-1, Onset Computer) installée dans une fosse à proximité des installations.

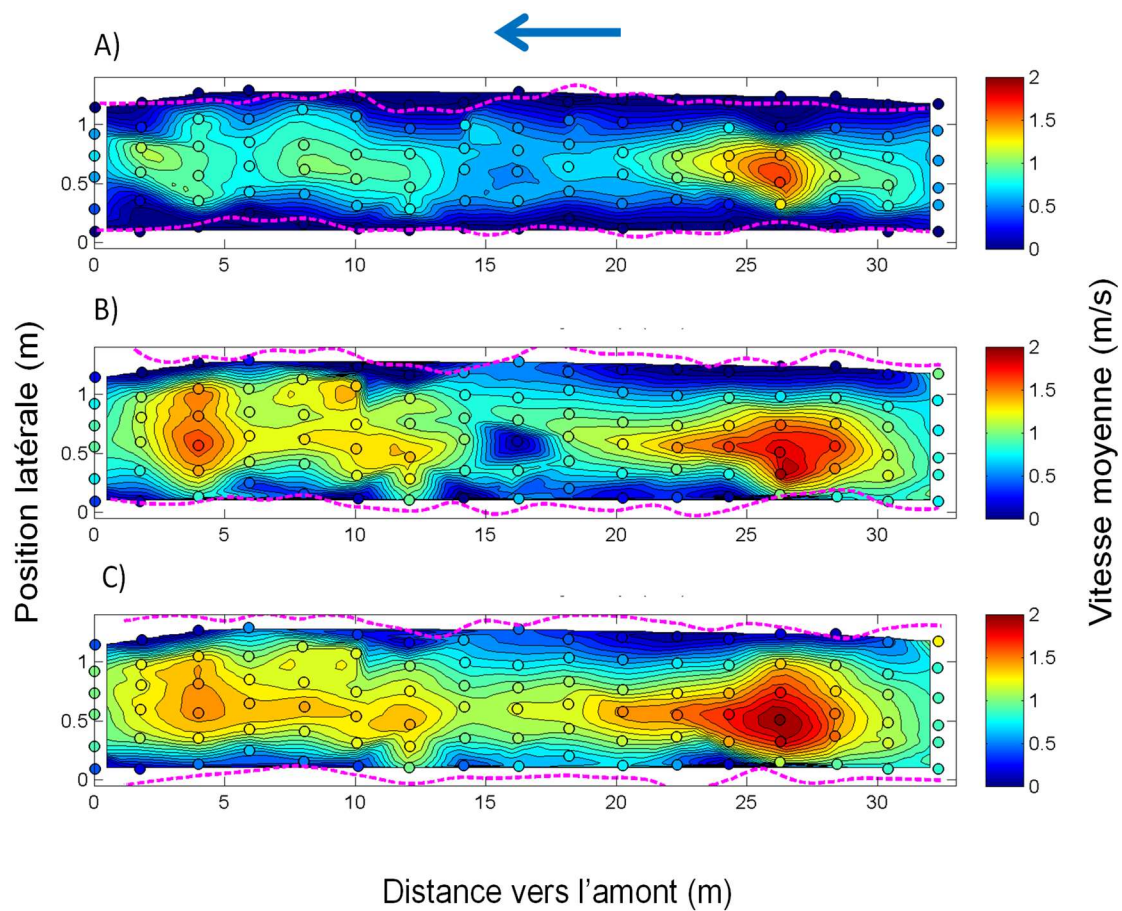


Figure 11. Carte des vitesses moyennes d'écoulement de l'eau à l'intérieur du ponceau pour les trois essais : A) P1 :  $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ , B) P2 :  $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$  et C) P4 :  $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les panneaux représentent une vue en plan de la conduite. Les lignes pointillées magenta représentent les limites de la largeur mouillée à un instant donné. La flèche bleue indique le sens de l'écoulement de l'eau. Les cercles colorés représentent les points d'échantillonnage. En blanc sont les zones où les vitesses n'ont pas été extrapolées.

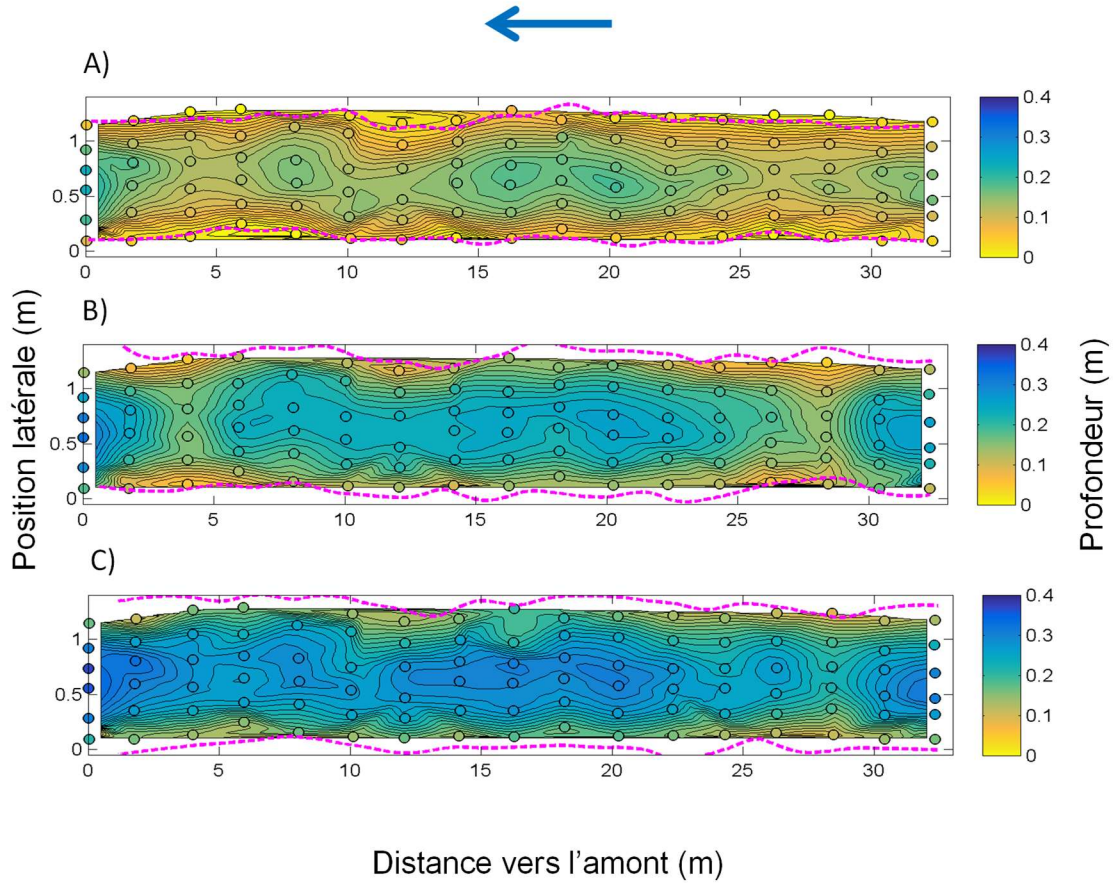


Figure 12. Carte des profondeurs de l'eau à l'intérieur du ponceau pour les trois essais : A) P1 : 0.08 m<sup>3</sup>/s, B) P2 : 0.20 m<sup>3</sup>/s et C) P4 : 0.36 m<sup>3</sup>/s. Les panneaux représentent une vue en plan de la conduite. Les lignes pointillées magenta représentent les limites de la largeur mouillée à un instant donné. La flèche bleue indique le sens de l'écoulement de l'eau. Les cercles colorés représentent les points d'échantillonnage. En blanc sont les zones où les profondeurs n'ont pas été extrapolées.

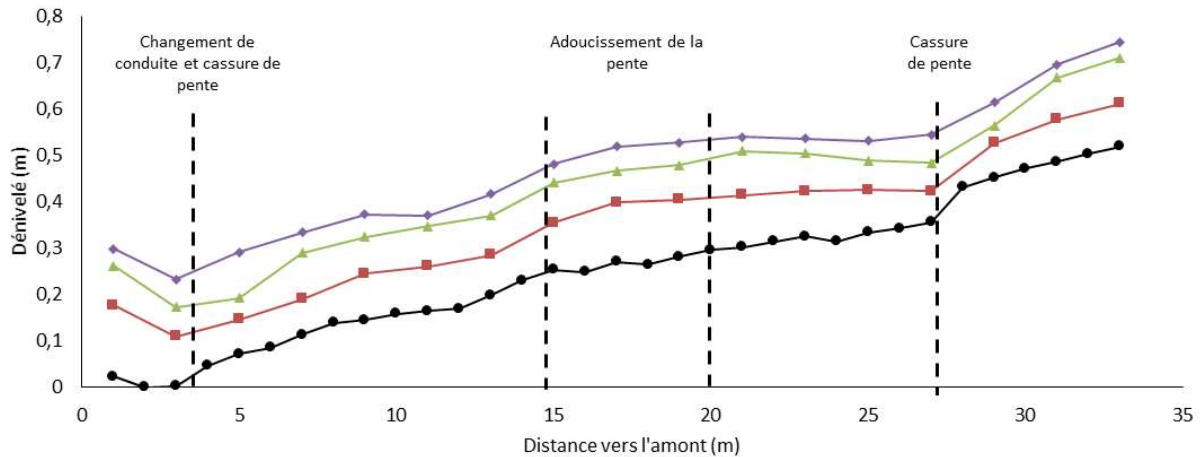
Les vitesses moyennes d'écoulement des essais vont de de 0.73 à 1.37 m/s pour des débits variant de 0.08 à 0.36 m<sup>3</sup>/s (Tableau 2). L'écart-type calculé sur les vitesses moyennes de chaque transect montre une certaine variation d'un transect à l'autre lors d'un essai et que cette variation diminue avec l'augmentation du débit (écart-type de 26, 22 et 9 % respectivement pour les essais P1, P2 et P4).

**Tableau 2. Conditions hydrauliques et température moyenne à l'intérieur du ponceau pour chaque essai. L'écart-type est montré entre parenthèses.**

Essai	Date	Débit moyen (m <sup>3</sup> /s)	Vitesse moyenne (m/s)	Profondeur moyenne (m)	Température journalière moyenne (°C)
P1	2014-08-08	0.08 (± 0.01)	0.73 (± 0.19)	0.10 (± 0.02)	18.2
P2	2014-09-17	0.20 (± 0.02)	0.97 (± 0.21)	0.18 (± 0.03)	7.8
P4	2014-09-26	0.36 (± 0.05)	1.37 (± 0.13)	0.22 (± 0.03)	12.4

Les cartes des vitesses moyennes interpolées pour chaque essai montrent que l'écoulement à l'intérieur de la conduite est non uniforme (Figure 11). Cette complexité hydraulique se traduit par des zones de vitesse élevée localisées au centre du ponceau et là où il y a des cassures de pente, soit à 4 et 26 mètres à partir de l'entrée de la conduite (Figure 11). La zone d'écoulement rapide observée à 4 mètres semble causée par le changement de conduite, celle-ci ayant des ondulations de plus petite amplitude, passant de 5 à 3 cm et une plus petite longueur d'onde, passant de 13 à 10 cm (Figure 13). Des zones de vitesses réduites sont également présentes le long des parois à la limite de la largeur mouillée.





**Figure 13. Profil longitudinal du dénivelé du ponceau (cercle bleu) et des profondeurs moyennes d'écoulement de l'eau pour chaque condition hydraulique testée (carrés rouges : P1; triangles verts : P2; losanges mauves : P4).**

### 3.1.6 Traitement des vidéos et documentation des trajectoires de nage

L'enregistrement vidéo s'est effectué à une fréquence de 15 images par seconde et à une résolution de 1920 x 1080 pixels. Les fichiers vidéo ont été extraits des enregistreurs, convertis sous format MP4 (Handbrake V 0.9, The Handbrake Team), puis édités afin d'éliminer les images non pertinentes (Avidemux 2.6.8). Les images ont par la suite été transférées dans un environnement numérique (Matlab, R2014a, MathWorks) et la position au nez du poisson lors de l'ascension du ponceau a été numérisée à partir des images, toutes les 0.33 seconde (à toutes les 5 images), à l'aide d'une application semi-automatisée. Les images ont été géoréférencées à l'aide de 300 marqueurs visuels préalablement installés sur le fond du ponceau et en appliquant une transformation géométrique de type moyenne locale pondérée (Matlab, R2014a, MathWorks). Les trajectoires de tous les poissons sont présentées à l'Annexe I.

Pour chaque position du poisson lors d'une ascension, plusieurs variables ont été calculées :

- **vitesse au sol** : rapport entre la distance entre deux positions consécutives et le temps (0,33 seconde);
- **vitesse d'écoulement au nez** : vitesse d'écoulement instantanée affrontée par le poisson, estimée à partir de la carte des vitesses d'écoulement interpolées;
- **vitesse de nage** : addition de la vitesse d'écoulement au nez et de la vitesse au sol;

- **profondeur d'eau au nez** : profondeur d'eau instantanée utilisée par le poisson, estimée à partir de la carte des profondeurs interpolées.
- **distance à la paroi** : distance à laquelle se situe le poisson par rapport à la paroi, soit la position latérale la plus proche d'une des deux parois de la conduite, mesurée à partir des largeurs mouillées numérisées.

Chacune des trajectoires de nage a également été découpée en ses composantes latérales et longitudinales. Un arrêt signifie que le poisson n'effectue aucun déplacement longitudinal (vers l'amont) ou latéral (de gauche à droite). Inversement, une progression correspond à un déplacement longitudinal ou latéral positif. Les trajectoires décomposées de tous les poissons sont présentées à l'Annexe II.

À partir de la caractérisation des trajectoires, plusieurs variables ont été calculées pour chaque individu, soit :

- le **nombre d'arrêts** pendant une progression;
- la **distance de progression** : distance entre deux arrêts consécutifs, en mètres;
- la **durée moyenne d'un arrêt (s)**;
- la **durée moyenne d'une progression (s)**;
- la **sinuosité** de la trajectoire : distance totale parcourue sur distance nette, en mètres;
- la **durée de l'ascension** de l'entrée du poisson à sa sortie du ponceau (min);
- la **proportion de temps en mouvement (%)**;
- la **vitesse moyenne au sol** d'un poisson sur l'ensemble d'une trajectoire (m/s);
- la **vitesse moyenne au nez** d'un poisson sur l'ensemble d'une trajectoire (m/s);
- la **vitesse moyenne de nage** d'un poisson sur l'ensemble d'une trajectoire (m/s);
- la **profondeur moyenne au nez** d'un poisson sur l'ensemble d'une trajectoire (m);
- la **distance moyenne par rapport à la paroi (m)**;
- le **ratio de vitesse préférentielle** : ratio entre la vitesse moyenne au nez et la vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite;
- le **ratio de profondeur préférentielle** : ratio entre la profondeur moyenne au nez et la profondeur moyenne d'écoulement dans la conduite.

### 3.1.7 Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été exécutées à l'aide du logiciel R 3.1.2 (<https://www.r-project.org/>). La normalité des données a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Pour la comparaison du comportement spatial des poissons et des conditions hydrauliques des trajectoires (vitesse et profondeur d'écoulement) en mouvement et à l'arrêt, un test de Student a été utilisé pour les données normalement distribuées. Un test de Mann-Whitney a été utilisé pour les données non normalement distribuées. La différence entre les trois conditions hydrauliques a été vérifiée pour les différentes variables calculées à l'aide d'une ANOVA lorsque les données étaient normalement distribuées et à l'aide du test non paramétrique de Kruskal-Wallis lorsque les données n'étaient pas normalement distribuées. Une analyse *post hoc* a été menée afin de vérifier la différence entre chacune des conditions hydrauliques à l'aide d'un test de Mann-Whitney. La corrélation entre la taille des poissons (longueur à la fourche), la température de l'eau et les différentes variables dépendantes a été vérifiée à l'aide de corrélations de Spearman. Des régressions linéaires ou polynomiales ont été calculées afin de vérifier la nature de la relation entre les variables précédemment corrélées. Les tests ont été jugés statistiquement significatifs si le seuil de signification était inférieur à  $\alpha = 0.05$ .

## 3.2 Effet de la personnalité

Une journée avant les essais d'ascension dans le ponceau, la personnalité des poissons, *c.-à-d.* une différence individuelle comportementale consistante dans le temps et à travers différents contextes (Gosling, 2001, Dall *et al.*, 2004, Reale *et al.*, 2007), a été documentée en utilisant des arènes expérimentales installées directement sur le lit du cours d'eau. Trois essais comportementaux ont été effectués, soit des essais portant sur l'audace, l'exploration et le niveau d'activité. Cette partie du mémoire est exploratoire et visait à déterminer s'il existe un lien entre la personnalité des individus et le comportement spatial observé dans le ponceau.

Puisqu'un trait de personnalité est par définition « un comportement individuel stable dans le temps et selon le contexte », les mesures effectuées sur les individus doivent nécessairement être répétables. Pour cette raison, des mesures de répétabilité ont été effectuées sur deux groupes indépendants d'omble de fontaine (non utilisé dans l'expérimentation principale) quelques semaines avant l'expérimentation principale (*voir section 3.2.4 Validité des essais comportementaux*).

### 3.2.1 Description des dispositifs expérimentaux et de la séquence expérimentale

Les tests de personnalité ont été effectués dans des bassins expérimentaux situés directement sur le lit du cours d'eau, à quelques mètres du ponceau (Figure 14). Ces bassins étaient composés de bacs de rangement en plastique (Rubbermaid, Roughneck) de 189 L (108 x 55 x 44 cm). Des trous percés aux extrémités de chaque bassin ont permis de produire un très faible courant continu à l'intérieur, utilisant ainsi les propriétés physicochimiques naturelles du cours d'eau. Les bassins expérimentaux étaient tenus en place par une structure en acier sur glissières permettant de faire varier leur hauteur lors de variations occasionnelles du niveau d'eau. Les bassins étaient recouverts d'un toit et d'une toile en polyéthylène imperméable aux fins de protection contre le soleil et les intempéries. Un tuyau de PVC noir de 3" a été fixé à une extrémité du bassin. Ce tuyau, débouchant directement dans l'aire ouverte du bassin, était muni d'une porte glissante et a été utilisé comme zone d'acclimatation pour le poisson avant le début d'un essai. Toutes les pièces associées au tuyau et à la porte coulissante ont été peintes de la même couleur que le bassin, soit en beige, une couleur naturelle créant un bon contraste entre le poisson et le fond du bassin. Cette différence de contraste a permis de suivre les déplacements des poissons à l'intérieur du bassin à l'aide d'une application automatisée de suivi vidéo (*voir section 3.2.2 Traitement des vidéos*).

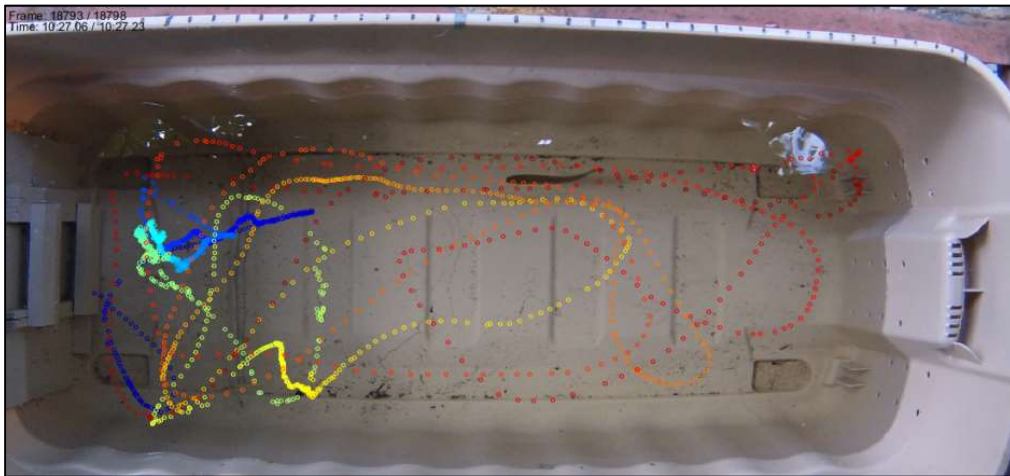


**Figure 14. Bassins utilisés lors des essais comportementaux, *in situ*. Les poissons sont introduits dans le bassin à partir des tuyaux de PVC noirs. L'eau s'écoule dans les arènes de façon naturelle.**

Tous les essais ont été enregistrés à l'aide de quatre caméras grand-angle et haute définition (Hero3 Silver Edition, GoPro, USA). Ces caméras ont été synchronisées à l'aide d'une application mobile (GoPro App, GoPro, USA), utilisant un protocole de communication sans-fil (Wi-Fi). Cette synchronisation a permis de documenter simultanément les traits de personnalité de quatre individus. Ces caméras ont été positionnées à une hauteur de 1,50 m à partir du fond des bacs, soit une hauteur optimale compte tenu des caractéristiques techniques des caméras (1,2 Mégapixel, 1080p, 30 images par seconde) et la taille des bassins. Ces caméras ont été branchées à des batteries externes (Anker Astro E4, Anker®, USA) de 13 000 mAh qui fournissaient une autonomie de plus de 8 heures. Les vidéos ont été enregistrées sur une carte microSD de classe 10 d'une capacité de 64 Gb.

### 3.2.2 Traitement des vidéos

Toutes les vidéos ont été allégées à l'aide du logiciel libre d'édition Avidemux (Version 2.6.8) afin de ne garder que les images pertinentes à l'analyse. Les images ont par la suite été importées dans une application de suivi semi-automatisée (Matlab), développée au laboratoire, utilisant le principe de la différence de contraste et de détection de mouvement. Cette application a permis d'enregistrer la position (en pixels) du centroïde de chaque poisson à une résolution temporelle de 0,33 seconde, et ainsi d'obtenir le tracé du poisson dans le bassin expérimental (Figure 15).



**Figure 15.** Tracé type d'un poisson explorateur. L'échelle de couleur continue représente le temps écoulé depuis la sortie du tuyau de PVC, de zéro (bleu foncé) à la fin de la période de mesures (rouge foncé).

### 3.2.3 Mesures du comportement

Entre 14 et 16 heures de repos ont été accordées aux poissons avant le début des tests de personnalité débutant la journée suivant la récolte et le marquage. Les essais comportementaux ont tous débuté vers 7 :00 pour se terminer avant 14 :00, la même journée. Chaque individu a été soumis à une séquence précise de manipulations (Figure 16). Le poisson était tout d'abord 1) identifié à l'aide son transpondeur passif, 2) introduit dans le tube PVC pour une période d'acclimatation de 5 minutes, puis soumis à 3) une mesure d'audace ainsi qu'à 4) une mesure d'exploration (voir les sections suivantes pour les détails).

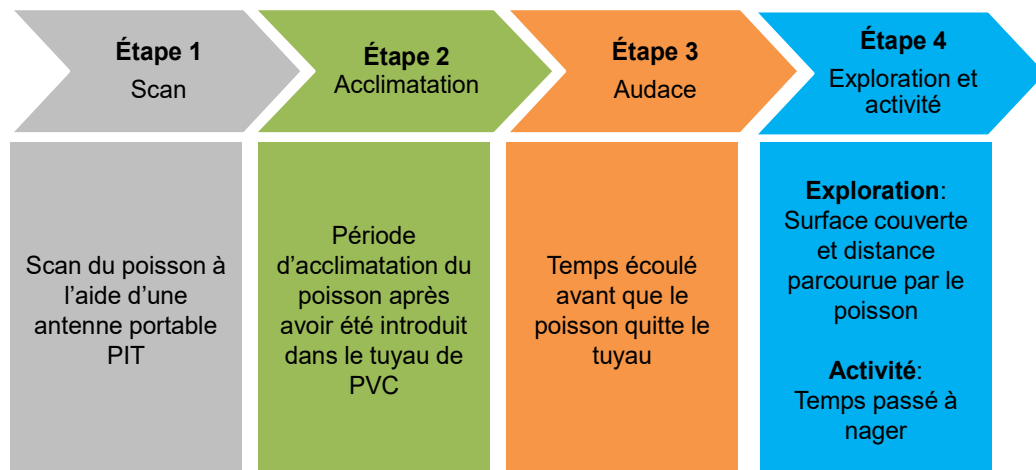
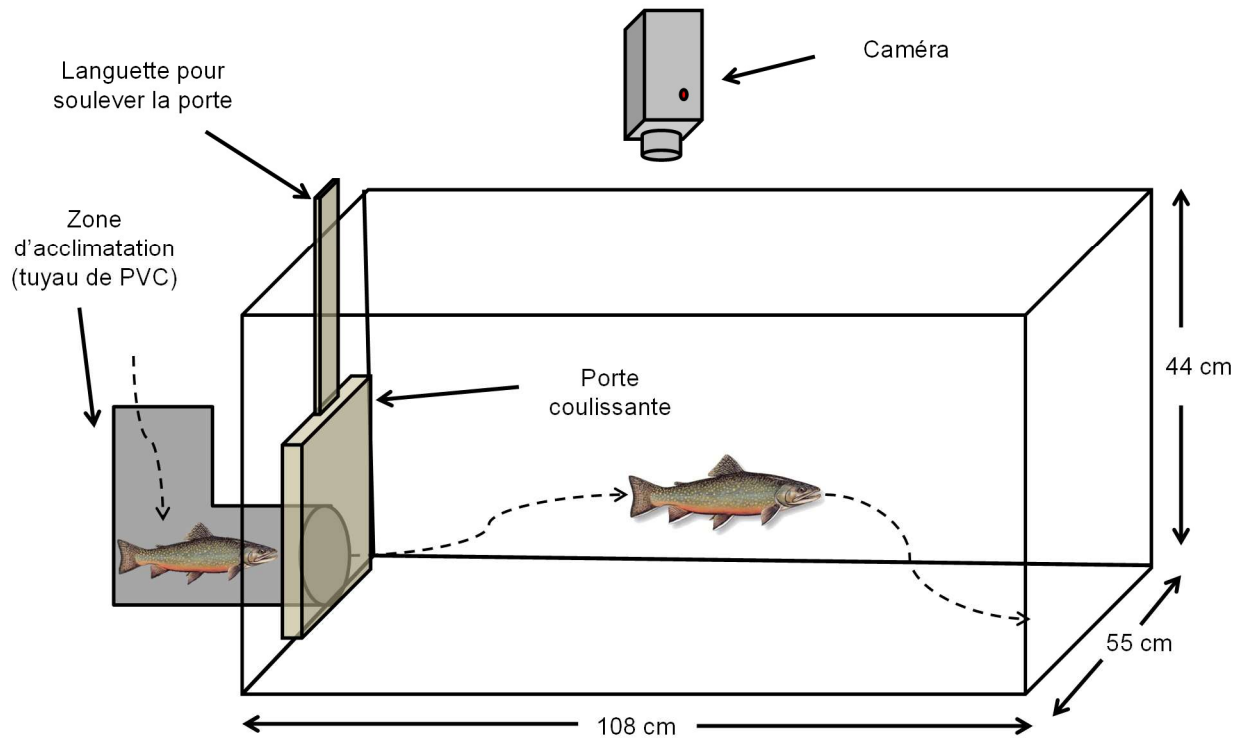


Figure 16. Tableau récapitulatif de la séquence de manipulation des essais comportementaux.

### **Audace**

L'audace est définie comme étant la réaction d'un individu face à une situation de risque (Reale *et al.*, 2007). Pour cette mesure, les individus ont été soumis à une variante du test standardisé d'émergence dans un nouvel environnement, tel qu'utilisé dans plusieurs études (Brown *et al.*, 2005, Wilson *et al.*, 2009b, Toms *et al.*, 2010, Chapman *et al.*, 2011). Chaque individu a d'abord été déposé dans la zone d'acclimatation du tube de PVC noir débouchant dans le bassin expérimental (Figure 17). Après 300 secondes d'acclimatation, la porte coulissante a été levée laissant au poisson le libre choix de quitter le refuge ou d'y rester. La manipulation du poisson lors de son introduction dans le tube constitue une situation de risque vécu par lui. Un sujet audacieux aura tendance à sortir plus rapidement du tuyau qu'un sujet timide. Le temps (secondes) que prend l'individu pour quitter entièrement le refuge, et ce pour au moins 10 secondes consécutives, représente la mesure d'audace utilisée dans la présente analyse. Le temps maximal accordé à l'individu afin de quitter le tube était de 600 secondes, ce qui représente la mesure de timidité maximale. Après ce temps, les individus étant restés dans le tuyau étaient délibérément poussés dans l'aire ouverte du bassin pour la suite de l'expérience.



**Figure 17. Représentation schématique de l'arène expérimentale utilisée pour la quantification des traits de personnalité (audace, exploration et activité).**

### **Exploration**

L'exploration est définie comme la réaction d'un individu face à un nouvel environnement (Reale *et al.*, 2007). Une fois sorti du tuyau, l'individu était libre d'explorer le nouvel environnement s'offrant à lui. L'aire couverte (%) par le poisson ainsi que la distance totale parcourue (cm) pendant 300 secondes représentent les mesures utilisées pour caractériser le niveau d'exploration des individus étudiés. Un individu couvrant une grande surface et/ou ayant parcouru une longue distance est considéré comme un individu explorateur.

### **Activité**

L'activité est définie comme le niveau général d'activité d'un individu (Reale *et al.*, 2007). Le temps total (secondes) passé à nager à une vitesse plus grande qu'une demi-longueur de poisson, représente la mesure du niveau général d'activité utilisée dans l'étude.



### 3.2.4 Validité de la répétabilité des essais comportementaux

Puisqu'un trait de personnalité constitue par définition « un comportement individuel stable dans le temps et selon le contexte », les mesures effectuées sur les individus doivent nécessairement être répétables pour être valides. La répétabilité est définie comme la fraction de la variation comportementale qui est due aux différences observées entre les individus d'un même groupe (Bell *et al.*, 2009). En d'autres mots, la répétabilité décrit la proportion de la variance reproductible entre plusieurs mesures répétées (ex. un trait de personnalité) sur un même individu (Lessells *et al.*, 1987, Nakagawa *et al.*, 2010).

Le calcul de la répétabilité pour des données répondant aux exigences d'une ANOVA, appelé coefficient de corrélation intraclasse, est basé sur les composantes de la variance déduite d'une analyse de variance à un facteur (Lessells *et al.*, 1987). Il s'agit de la méthode la plus couramment utilisée dans la littérature. Le calcul de la répétabilité ( $r$ ) est défini comme suit :

$$r = \frac{s_A^2}{(s^2 + s_A^2)}$$

où  $s_A^2$  est la variance intergroupe (entre les individus) ajustée pour le nombre d'observations (mesures) sur un même individu,  $s^2$  est la variance intragroupe (entre les mesures).

Une deuxième méthode permettant de vérifier la consistance de mesures consécutives est la comparaison par corrélation de rang de Spearman (Bell *et al.*, 2009, Wilson *et al.*, 2009a, Taylor *et al.*, 2014). Cette méthode peut être utilisée lorsque les conditions de l'utilisation d'une ANOVA ne sont pas respectées. L'interprétation de la corrélation est différente de celle de la répétabilité puisqu'il s'agit d'une comparaison entre les rangs des individus et non de la mesure brute du trait de personnalité.

Puisque les données ne respectaient pas les conditions d'utilisation de la mesure de répétabilité, la corrélation de rang de Spearman pour chaque trait de personnalité a été effectuée sur trois journées consécutives, et ce, sur les deux groupes indépendants d'ombles de fontaine (SAFO-R01 et SAFO-R02) (Tableau 3). Ces deux groupes d'ombles de fontaine sont différents de ceux utilisés pour la documentation du comportement de nage dans le ponceau. Les mesures de répétabilité ont été réalisées quelques semaines avant l'expérimentation dans le ponceau.

**Tableau 3. Données écologiques pour les groupes de salmonidés ayant servi à tester la validité des mesures comportementales**

Groupe de salmonidés	Dates de l'essai	Nombre d'individus	Ruisseau d'origine	Taille moyenne des individus (mm)	Température moyenne lors de l'essai (°C)
SAFO-R01	17 au 19 juillet 2014	14	Morin	134.9 (± 30.6)	17.4
SAFO-R02	26 au 28 juillet 2014	17	Morin	134.8 (± 22.7)	17.0

*Note : Une ANOVA n'a montré aucune différence significative entre les tailles des deux groupes de salmonidés ainsi que la température de l'eau lors des tests de répétabilité.*

### **3.2.5 Analyses statistiques**

Toutes les analyses statistiques ont été exécutées à l'aide du logiciel R 3.1.2 (<https://www.r-project.org/>). La normalité des données a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. La personnalité des individus ayant effectué une tentative et ceux n'en ayant effectué aucune a été comparée à l'aide d'un test de Student pour les données normalement distribuées. Un test de Mann-Whitney a été utilisé pour les données non normalement distribuées. La comparaison de la personnalité entre les classes de taille des poissons a été effectuée à l'aide d'une ANOVA lorsque les données étaient normalement distribuées et à l'aide du test non paramétrique de Kruskal-Wallis lorsque les données n'étaient pas normalement distribuées. Une analyse *post hoc* a été réalisée afin de vérifier la différence entre chacun des groupes à l'aide d'un test de Mann-Whitney. La corrélation entre les traits de personnalité et les différentes variables dépendantes de comportement spatial a été vérifiée à l'aide de corrélations de Spearman. Les tests ont été jugés statistiquement significatifs si le seuil de signification était inférieur à  $\alpha = 0.05$ .

## 4. RÉSULTATS

### 4.1 Comportement spatial des ombles de fontaine dans le ponceau

#### 4.1.1 Tentatives et succès de passage

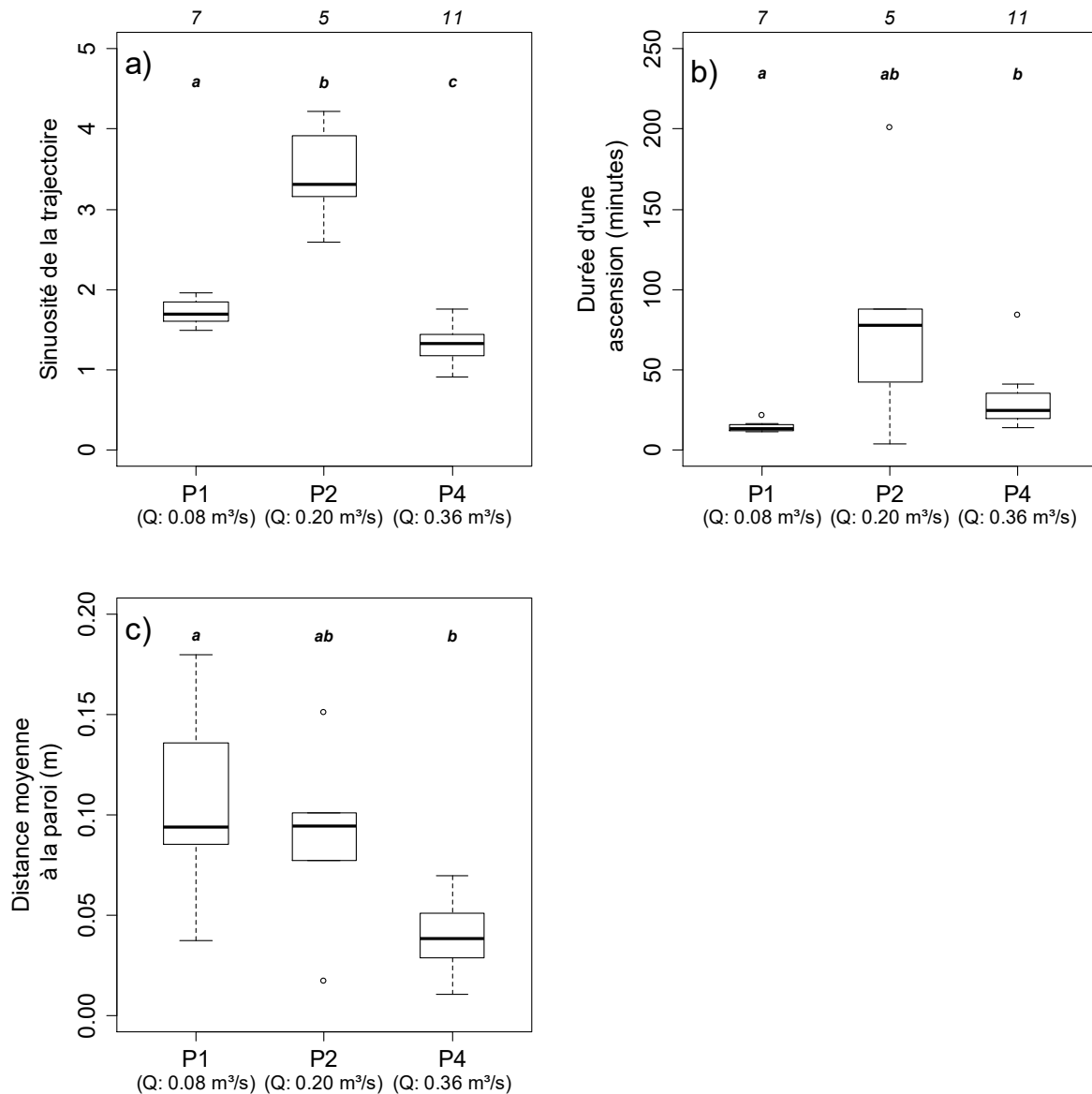
Au total, 27 des 91 poissons testés ont effectué au moins une tentative pour franchir le ponceau (respectivement 7, 5 et 15 poissons pour les essais P1, P2 et P4) et 25 ont réussi à le franchir complètement (respectivement 7, 4 et 14 pour les essais P1, P2 et P4). De ce nombre, 24 individus ont franchi la conduite dès la première tentative, une tentative correspondant à l'entrée du poisson dans le champ de vision de la première caméra, et un seul individu l'a franchi après deux tentatives. Parmi les trois poissons n'ayant pas franchi la conduite, un seul individu a effectué quatre tentatives alors que les deux autres n'ont effectué qu'une seule tentative. Le suivi vidéo a permis de suivre l'ascension complète de 23 poissons. Les trajectoires manquantes des trois autres individus ayant tenté de franchir le ponceau sont expliquées par une mauvaise qualité de l'image causée par la forte turbidité de l'eau, un éclairage non optimal ainsi qu'une qualité d'enregistrement théorique non atteinte. Une plus grande proportion de poissons a effectué une tentative de passage au débit le plus élevé (P4), soit 48 %, contre 23 et 17 % respectivement pour les essais P1 et P2. Le temps moyen écoulé avant la première tentative était de 28.04 ( $\pm$  12.84 heures) et les poissons ont effectué leur première tentative plus rapidement à l'essai P4 (Kruskal-Wallis :  $X^2 = 12.025$ ,  $p = 0.002$ ). Le temps avant la première tentative n'était corrélé ni à la température de l'eau (Spearman :  $r = -0.065$ ,  $p = 0.742$ ) ni à la taille des individus (Spearman :  $r = 0.334$ ,  $p = 0.082$ ). Les individus ayant effectué au moins une tentative avaient une taille plus élevée que les individus n'en ayant effectué aucune (Kruskal-Wallis :  $X^2 = 4.435$ ,  $p = 0.035$ ).

#### 4.1.2 Description générale des trajectoires

L'inspection visuelle des trajectoires des individus suivis par vidéo suggère que ceux-ci ont franchi la conduite en empruntant une trajectoire non linéaire, en longeant l'une des parois de la conduite et en évitant les zones où la vitesse d'écoulement est élevée (Figures 20A, 21A et 22A).

La distance totale parcourue, soit la somme de tous les déplacements, variait de 12.6 à 108.1 mètres (moyenne : 48.7 m, écart-type : 24.2 m, médiane : 42.8 m). Le ratio de la distance totale parcourue sur la distance nette montre que les poissons ont adopté des trajectoires non

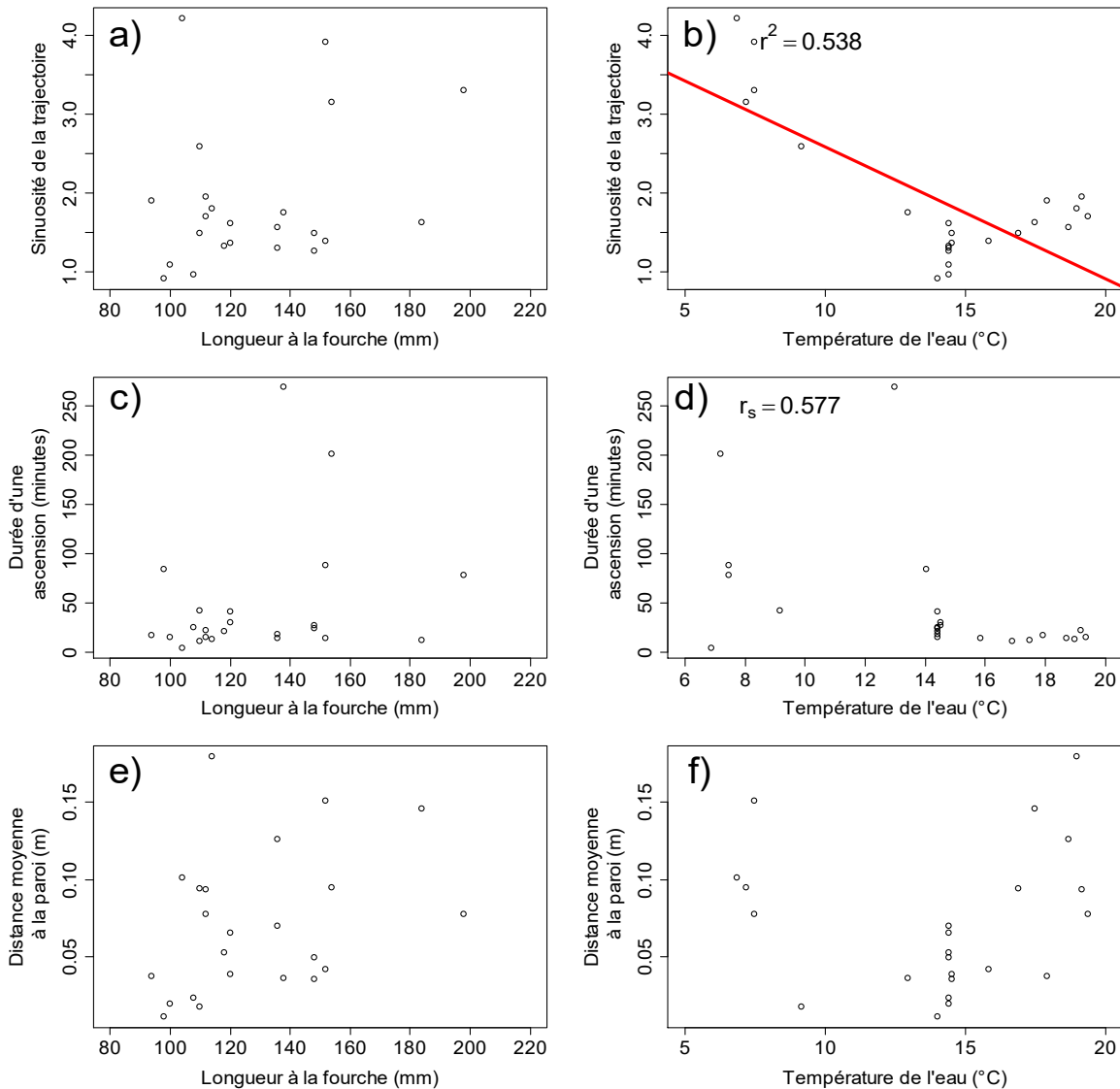
linéaires ayant une sinuosité moyenne de  $1.90 (\pm 0.91)$ . Les poissons ont donc nagé en moyenne sur une distance totale près de deux fois plus grande que la longueur du ponceau. Les résultats de l'analyse de variance montrent une différence significative de la sinuosité de la trajectoire, de la durée d'ascension et de la distance moyenne à la paroi selon la condition hydraulique. La sinuosité moyenne des trajectoires était significativement plus élevée à la condition hydraulique P2 qu'aux conditions hydrauliques P1 (Mann-Whitney :  $U = 0, p = 0.003$ ) et P4 (Mann-Whitney :  $U = 55, p < 0.001$ ) alors qu'elle était plus élevée à la condition hydraulique P1 que P4 (Mann-Whitney :  $U = 71, p = 0.002$ ) (Figure 18a). La durée des ascensions était très variable selon l'individu, variant de 4.05 à 269.20 minutes (moyenne : 47.03 min, écart-type : 64.57 min, médiane : 21.67 min). La durée d'une ascension était significativement supérieure pour la condition hydraulique P4 que P1 (Mann-Whitney :  $U = 7, p = 0.003$ ) (Figure 18b). Les poissons ont emprunté des trajectoires se situant plus près de la paroi dans des conditions hydrauliques élevées. La distance moyenne à la paroi était significativement différente entre les essais P1 et P4 (Mann-Whitney :  $U = 71, p = 0.002$ ) (Figure 18c).



**Figure 18. Représentation graphique de l'analyse statistique montrant les différences significatives entre les trois conditions hydrauliques pour a) la sinuosité de la trajectoire, b) la durée d'une ascension et c) la distance moyenne à la paroi. Les chiffres en italique au-dessus des panneaux a) et b) représentent le nombre d'individus par condition hydraulique. Les lettres en italique au-dessus des boîtes montrent l'absence (lettres semblables) ou la présence d'une différence significative (lettres différentes) entre les conditions hydrauliques.**

Aucune corrélation significative n'a été observée entre la taille des individus et les variables suivantes : sinuosité de la trajectoire, durée d'une ascension, distance à la paroi ( $p > 0.050$ ). La sinuosité des trajectoires est prédite par la température de l'eau ( $r^2 = 0.538$ ,  $p < 0.001$ ),

les trajectoires étant plus sinueuses à de faibles températures (Figure 19b). Une corrélation monotone négative a été observée entre la température de l'eau et la durée d'une ascension (Spearman :  $r = -0.577$ ,  $p = 0.004$ ) (Figure 19d). La distance à la paroi n'était pas corrélée à la température de l'eau ( $p > 0.050$ ).



**Figure 19. Relations entre les variables descriptives des trajectoires, la longueur à la fourche des poissons et la température de l'eau. Chaque point représente un individu ( $n = 23$ ). La droite et le coefficient de détermination ( $r^2$ ) représentent la relation linéaire significative de la régression. La force de la corrélation non linéaire est représentée par le coefficient de Spearman ( $r_s$ ).**

### 4.1.3 Continuité de la nage lors des ascensions

Afin de tester l'hypothèse que la progression vers l'amont des ombles est parfois ponctuée d'arrêts leur permettant de se reposer, la trajectoire des poissons dans le ponceau a été décomposée en ses composantes latérales et longitudinales en fonction du temps. Un arrêt signifie que le poisson n'effectue aucun déplacement longitudinal (vers l'amont) ou latéral (de gauche à droite). Inversement, une progression correspond à un déplacement longitudinal ou latéral positif.

De tous les individus ayant effectué au moins une tentative, aucun n'a nagé de façon continue lors de l'ascension du ponceau. Tous les poissons ont plutôt effectué des progressions ponctuées d'arrêts de durées variables (Figure 20B, Figure 21B et Figure 22B). Les individus n'ont pas rebroussé chemin ni abandonné leur progression après s'être arrêtés. Les caractéristiques des arrêts et des progressions étaient variables d'un individu à l'autre (Tableau 4). La durée totale des arrêts par poisson était significativement plus élevée que la durée totale des progressions (Mann-Whitney :  $U = 27$ ,  $p < 0.001$ ). Ce résultat est également démontré par une proportion de temps en mouvement inférieure à 50 % du temps d'ascension (moyenne : 19.4 %; écart-type : 13.8 %) (Tableau 4)

**Tableau 4. Statistiques descriptives des trajectoires (progressions et arrêts) de tous les individus confondus ( $n = 23$ ).**

Variable	Moyenne ( $\pm$ écart-type)	Médiane	Étendue
Nombre d'arrêts	8.7 ( $\pm$ 3.1)	9	1 - 14
Durée moyenne d'un arrêt (s)	1022 ( $\pm$ 145)	350	92 - 4737
Durée moyenne d'une progression (s)	92 ( $\pm$ 56)	71	37 - 255
Proportion de temps en mouvement (%)	19.4 ( $\pm$ 13.8)	16.4	1.0 – 48.9
Longueur moyenne d'une progression (m)	2.87 ( $\pm$ 0.92)	2.85	1.80 – 5.97

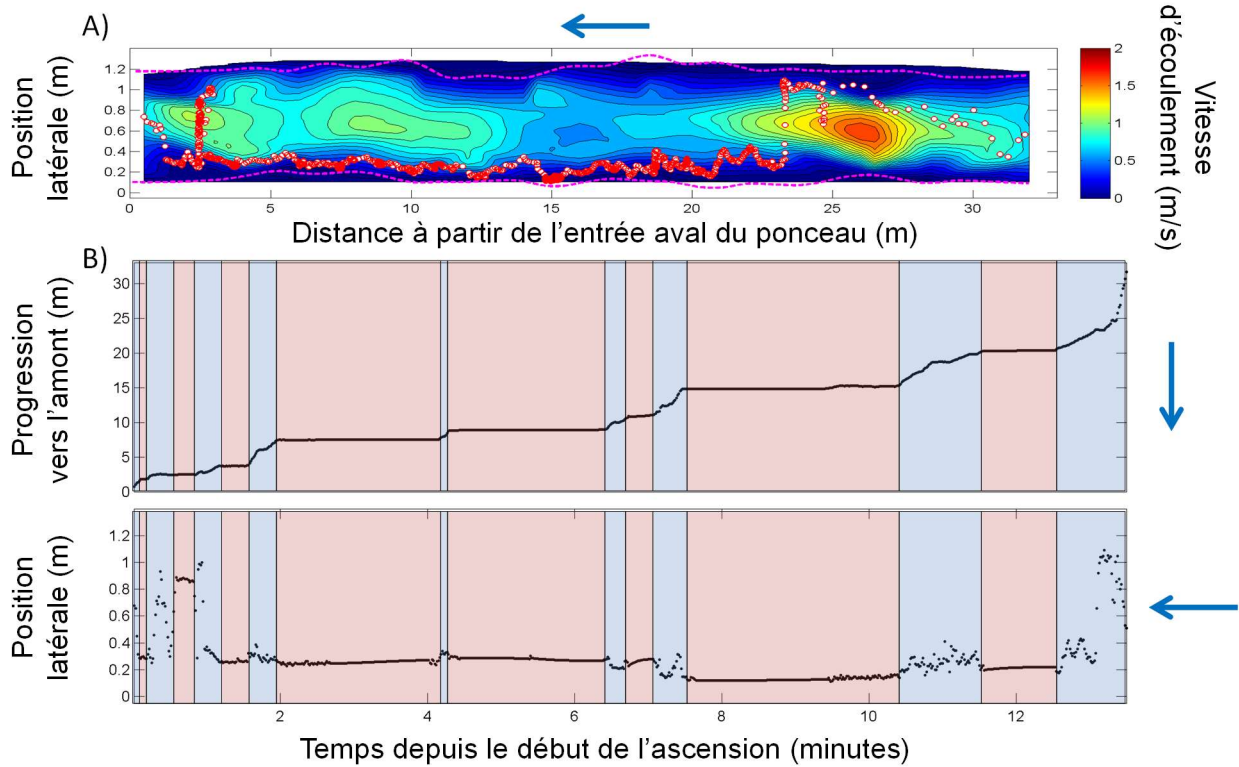


Figure 20. A) Trajectoire en plan de l'ascension d'un poisson (LF : 136 mm) lors de l'essai P1 ( $Q = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les cercles rouges représentent la position du poisson à toutes les secondes. Les lignes pointillées magenta représentent les limites de la largeur mouillée. B) Trajectoire décomposée en ses composantes longitudinales (progression vers l'amont) et latérales (position latérale) en fonction du temps (abscisse). Les rectangles bleus représentent les mouvements et les rectangles rouges représentent les arrêts. Les flèches bleues représentent le sens d'écoulement de l'eau.



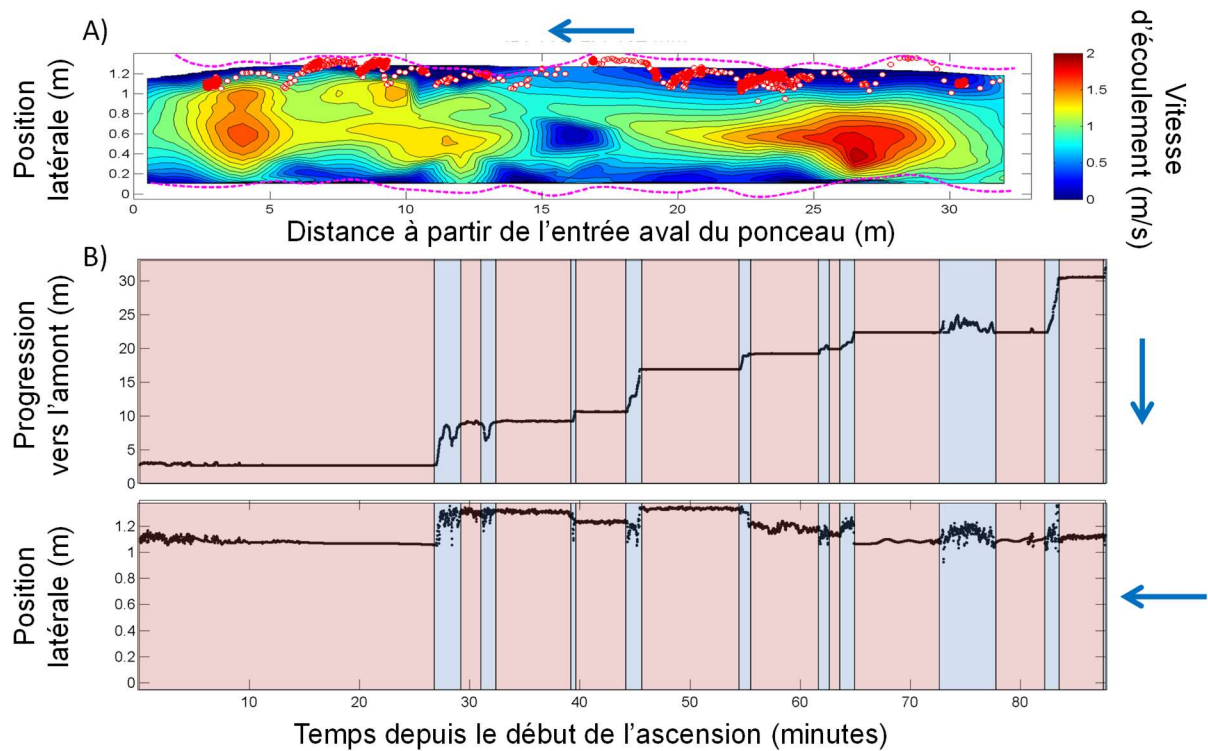


Figure 21. A) Trajectoire en plan de l'ascension d'un poisson (LF : 152 mm) lors de l'essai P2 ( $Q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les cercles rouges représentent la position du poisson à toutes les secondes. Les lignes pointillées magenta représentent les limites de la largeur mouillée. B) Trajectoire décomposée en ses composantes longitudinales (progression vers l'amont) et latérales (position latérale) en fonction du temps (abscisse). Les rectangles bleus représentent les mouvements et les rectangles rouges représentent les arrêts. Les flèches bleues représentent le sens d'écoulement de l'eau.

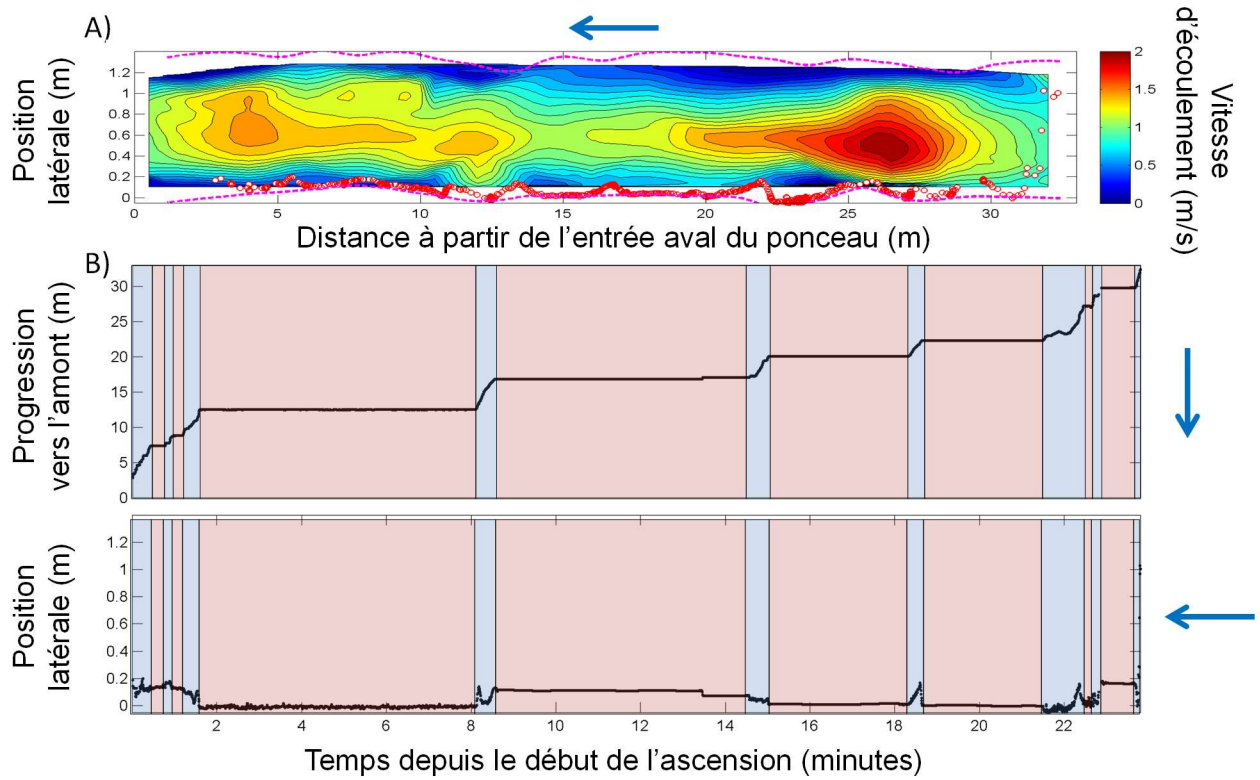


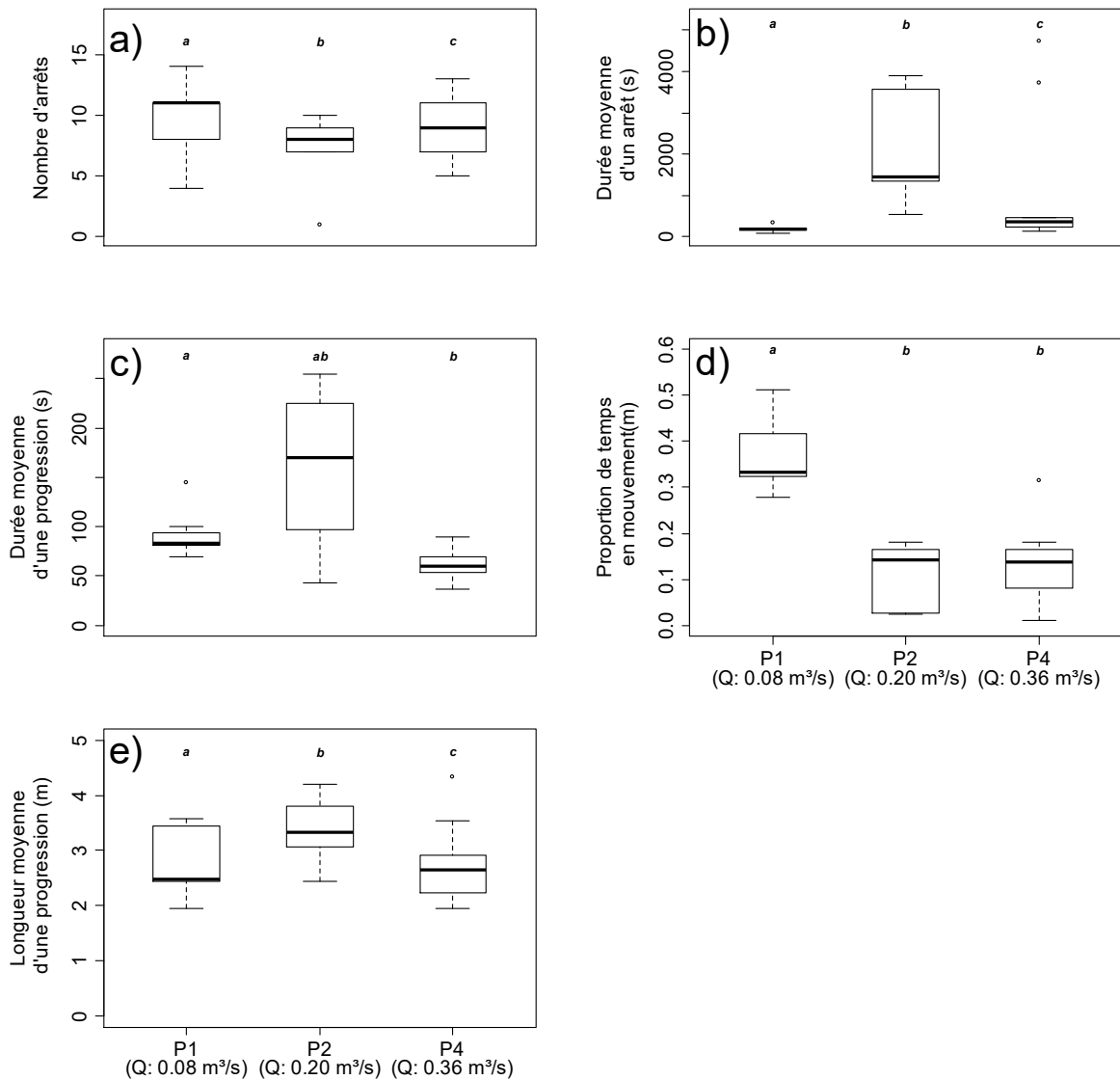
Figure 22. A) Trajectoire en plan de l'ascension d'un poisson (LF : 148 mm) lors de l'essai P4 ( $Q = 0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les cercles rouges représentent la position du poisson à toutes les secondes. Les lignes pointillées magenta représentent les limites de la largeur mouillée. B) Trajectoire décomposée en ses composantes longitudinales (progression vers l'amont) et latérales (position latérale) en fonction du temps (abscisse). Les rectangles bleus représentent les mouvements et les rectangles rouges représentent les arrêts. Les flèches bleues représentent le sens d'écoulement de l'eau.

La durée moyenne d'un arrêt, la durée moyenne d'une progression ainsi que la proportion de temps en mouvement diffèrent significativement selon la condition hydraulique (Tableau 5). Cependant, aucune différence significative n'est observée pour le nombre d'arrêts et la longueur d'une progression ( $p > 0.050$ ).

**Tableau 5. Comparaisons statistiques (ANOVA ou équivalent non paramétrique) des variables d'intérêt concernant la continuité des trajectoires de nage, entre les trois conditions hydrauliques affrontées (P1 = 0.08 m<sup>3</sup>/s, P2 = 0.20 m<sup>3</sup>/s et P4 = 0.36 m<sup>3</sup>/s) ( $n = 23$ ). Les différences significatives sont en caractère gras.**

Variables	Moyenne ( $\pm$ écart-type)			Comparaison statistique	
	P1	P2	P4	Statistique	$p$
Nombre d'arrêts	9.6 ( $\pm$ 3.2)	9.6 ( $\pm$ 3.5)	8.9 ( $\pm$ 2.8)	ANOVA : $F_{2, 20} = 1.073$	0.361
<b>Durée moyenne d'un arrêt (s)</b>	<b>192.6 (<math>\pm</math> 81.5)</b>	<b>2165.0 (<math>\pm</math> 1485.0)</b>	<b>1031.0 (<math>\pm</math> 1604.0)</b>	<b>Kruskal-Wallis : <math>X^2 = 11.474</math></b>	<b>0.003</b>
<b>Durée moyenne d'une progression (s)</b>	<b>92.9 (<math>\pm</math> 24.7)</b>	<b>158.1 (<math>\pm</math> 87.8)</b>	<b>61.3 (<math>\pm</math> 14.5)</b>	<b>Kruskal-Wallis : <math>X^2 = 9.327</math></b>	<b>0.009</b>
<b>Proportion de temps en mouvement (%)</b>	<b>36.1 (<math>\pm</math> 8.2)</b>	<b>10.7 (<math>\pm</math> 7.6)</b>	<b>12.7 (<math>\pm</math> 8.3)</b>	<b>ANOVA : <math>F_{2, 20} = 21.32</math></b>	<b>&lt; 0.001</b>
Longueur d'une progression (m)	3.19 ( $\pm$ 1.41)	3.37 ( $\pm$ 0.68)	2.73 (0.70)	Kruskal-Wallis : $X^2 = 2.813$	0.245

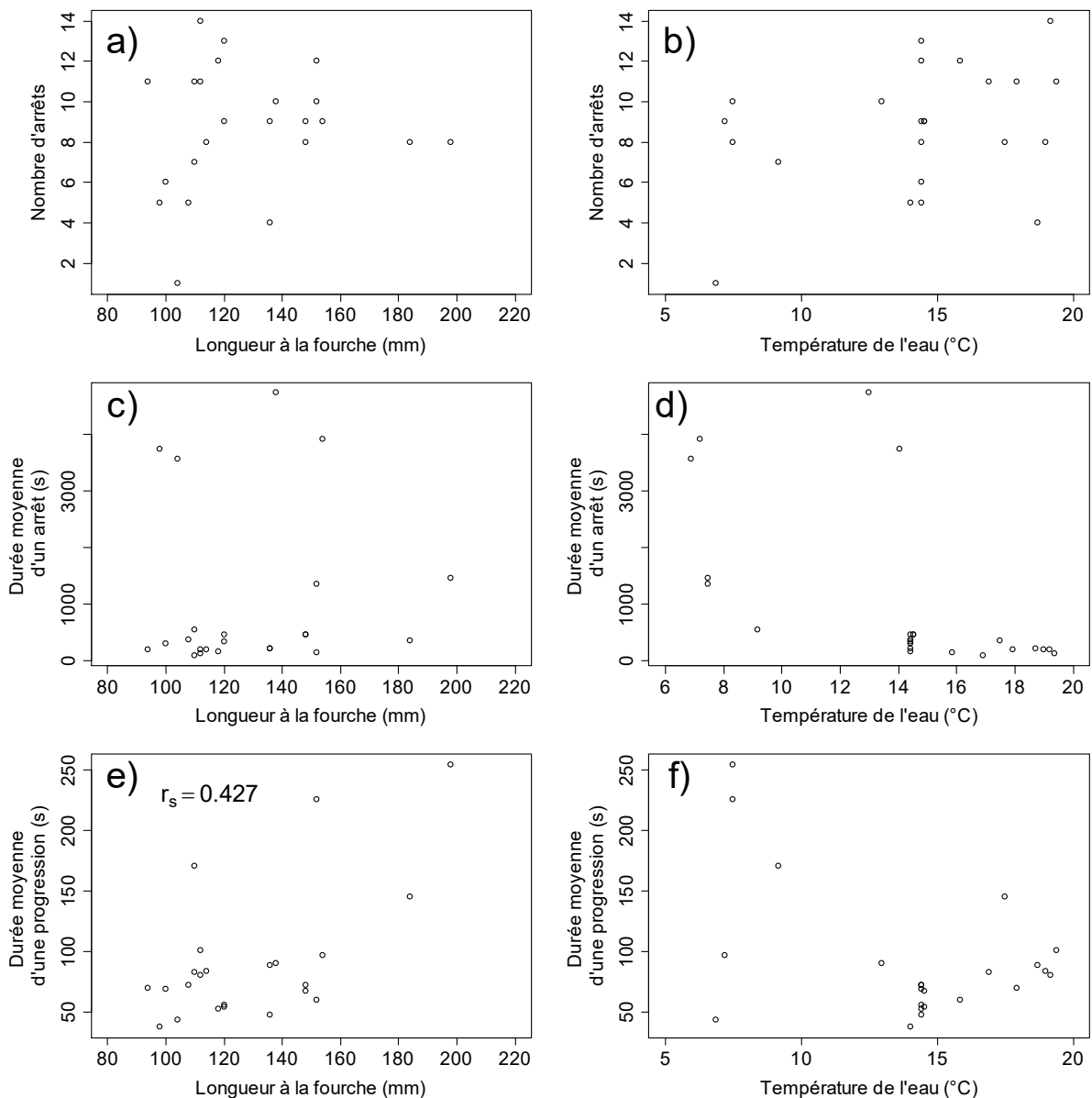
Une analyse *post hoc* montre que la durée moyenne d'un arrêt et la durée moyenne d'une progression est plus élevée à la condition P2 (Figure 23b et Figure 23c). La proportion de temps en mouvement diffère significativement entre les essais P1 et P2 (Tukey post-hoc:  $p < 0.001$ ) et P1 et P4 (Tukey post-hoc:  $p < 0.001$ ) (Figure 23d). Les poissons ont donc passé plus de temps à l'arrêt qu'en mouvement pour les conditions hydrauliques moyennes et élevées.



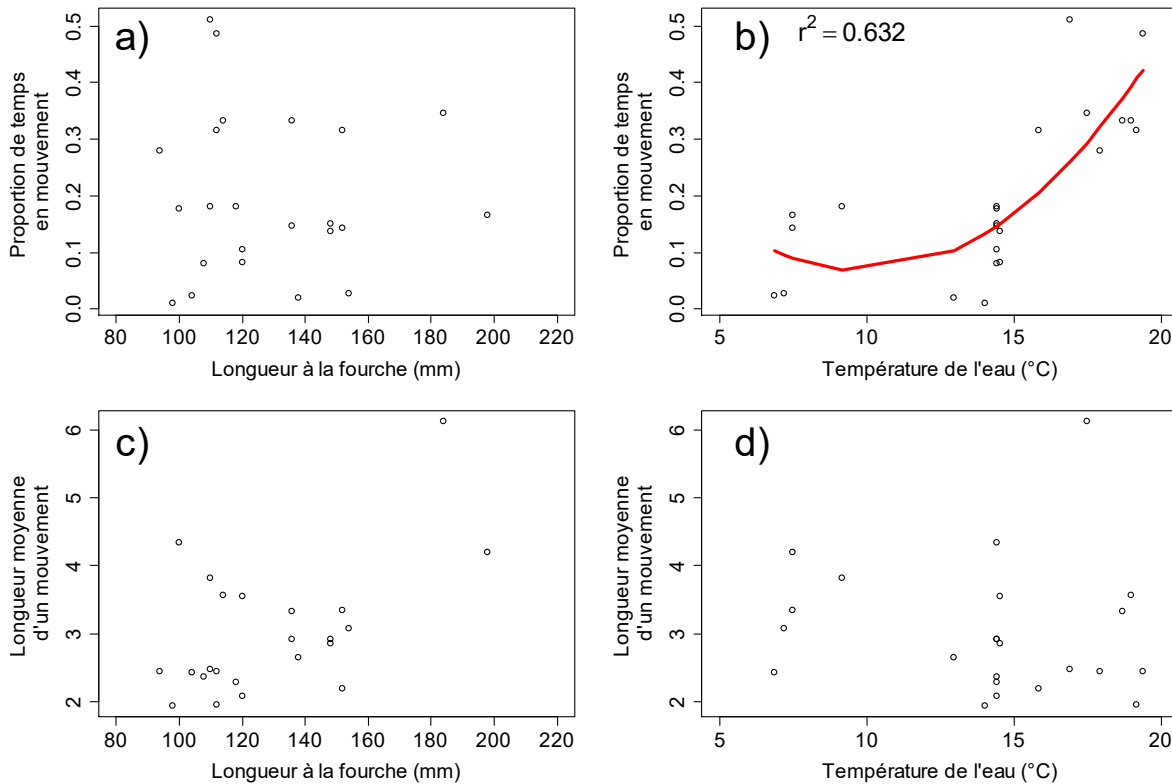
**Figure 23. Représentation graphique de l'analyse montrant les différences entre les trois essais pour les variables de la continuité de la nage. Les chiffres en italique au-dessus du graphique représentent le nombre d'individus par condition. Les lettres en italique au-dessus des boîtes montrent l'absence (lettres semblables) ou la présence d'une différence significative (lettres différentes) entre les essais.**

Une corrélation monotone positive est observée entre la taille des poissons (longueur à la fourche) et la durée moyenne d'une progression (Spearman :  $r = 0.427$ ,  $p = 0.042$ ) (Figure 24e). Aucune corrélation significative n'est observée entre la taille des individus et les variables suivantes : nombre d'arrêts, durée moyenne d'un arrêt, proportion de temps en mouvement et longueur d'une progression. La proportion de temps en mouvement est cependant prédite par la

température de l'eau de façon non linéaire (polynomiale d'ordre 2) ( $r^2 = 0.632$ ,  $p < 0.001$ ) (Figure 25b). La proportion de temps en mouvement est faible à de basses températures, mais augmente à partir d'un seuil d'environ 15°C.



**Figure 24. Corrélation entre la taille des poissons, la température de l'eau et certaines variables de la continuité de la nage. Chaque point représente un individu (n = 23). La force de la corrélation est représentée par le coefficient de Spearman ( $r_s$ ).**



**Figure 25. Relation entre la taille des poissons, la température de l'eau et certaines variables de la continuité de la nage. Chaque point représente un individu (n = 23). La courbe représente une relation significative polynomiale (ordre 2). La force de la corrélation est représentée par le coefficient de détermination ( $r^2$ ).**

La distance à la paroi et les vitesses d'écoulement affrontées par les poissons lors d'une ascension sont supérieures lorsqu'ils sont en mouvement (Tableau 6). Les poissons s'éloignent légèrement de la paroi lors de déplacements, mais se rapprochent lorsqu'ils cessent de se déplacer, là où l'écoulement de l'eau est plus faible. Cependant, aucune différence significative n'est observée pour les vitesses d'écoulement des trajectoires et les distances moyennes à la paroi lorsque les poissons sont en mouvement ou à l'arrêt ( $p > 0.050$ ). Aucune différence significative n'est observée pour la profondeur d'écoulement des trajectoires (Tableau 6).

**Tableau 6. Comparaisons statistiques (test-t de Student) des conditions hydrauliques affrontées par les poissons (vitesse d'écoulement et profondeur d'écoulement) et de la distance moyenne à la paroi, en mouvement et à l'arrêt ( $n = 23$ ).**

Variable	En mouvement		À l'arrêt		Comparaison statistique (test-t de Student)	
	Moyenne ( $\pm$ écart-type)	Étendue (Min – Max)	Moyenne ( $\pm$ écart-type)	Étendue (Min – Max)	$t$ ( <i>d.l.</i> )	$p$
Vitesse d'écoulement (m/s)	0.28 ( $\pm$ 0.09)	0.15 - 0.51	0.23 ( $\pm$ 0.11)	0.09 – 0.45	1.447 (44)	0.155
Profondeur d'écoulement (m)	0.12 ( $\pm$ 0.04)	0.06 – 0.18	0.11 ( $\pm$ 0.04)	0.05 – 0.15	0.482 (39)	0.632
Distance à la paroi (m)	0.10 ( $\pm$ 0.06)	0.03 – 0.26	0.07 ( $\pm$ 0.04)	0.02 – 0.16	1.475 (44)	0.147

#### **4.1.4 Vitesses de nage, vitesses d'écoulement des trajectoires et ratio préférentiel de vitesse**

La vitesse au sol moyenne des poissons, soit le rapport entre le déplacement net et le temps, varie de 0.08 à 0.20 m/s (moyenne : 0.14 m/s, écart-type : 0.03 m/s, médiane : 0.14 m/s). En général, les poissons ont nagé à des vitesses faibles, mais ont atteint des vitesses de pointe considérables allant au-delà de 1.70 m/s. La vitesse de nage moyenne d'un poisson sur l'ensemble de sa trajectoire, soit l'addition de la vitesse au sol à la vitesse d'écoulement de l'eau, varie de 0.20 à 0.64 m/s (moyenne : 0.43 m/s, écart-type : 0.12 m/s, médiane : 0.42 m/s). La vitesse moyenne d'écoulement affrontée par les poissons varie de 0.09 à 0.42 m/s (moyenne : 0.24 m/s, écart-type: 0.10 m/s, médiane : 0.23 m/s). Le ratio de vitesse préférentielle, soit le ratio entre la vitesse d'écoulement des trajectoires et la vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite, varie de 0.07 à 0.56 (moyenne : 0.24, écart-type : 0.13, médiane : 0.22). Un ratio inférieur à 1.00 montre que les poissons ont affronté des vitesses inférieures à la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau dans la conduite. La profondeur moyenne d'écoulement des trajectoires varie de 0.04 à 0.12 m (moyenne : 0.09 m, écart-type : 0.02 m, médiane : 0.09 m). Le ratio de profondeur préférentielle, soit le ratio entre la profondeur d'écoulement des trajectoires et la profondeur moyenne de l'écoulement dans la conduite, varie de 0.39 à 0.94 (moyenne : 0.55, écart-type : 0.15, médiane : 0.52). Un ratio inférieur à 1.00 montre que les poissons ont affronté

des profondeurs d'eau inférieures à la profondeur d'écoulement moyenne de l'eau dans la conduite.

La vitesse moyenne au sol, la vitesse moyenne des trajectoires et la vitesse moyenne de nage ne diffèrent pas significativement entre les trois conditions hydrauliques affrontées ( $p > 0.050$ ) (Tableau 7). Pour ces variables, les poissons n'ont pas adopté un comportement différent selon la condition hydraulique affrontée. Une différence significative est cependant observée entre les conditions hydrauliques pour les variables suivantes : la profondeur moyenne d'écoulement des trajectoires, le ratio de vitesse préférentielle et le ratio de profondeur préférentielle (Tableau 7).

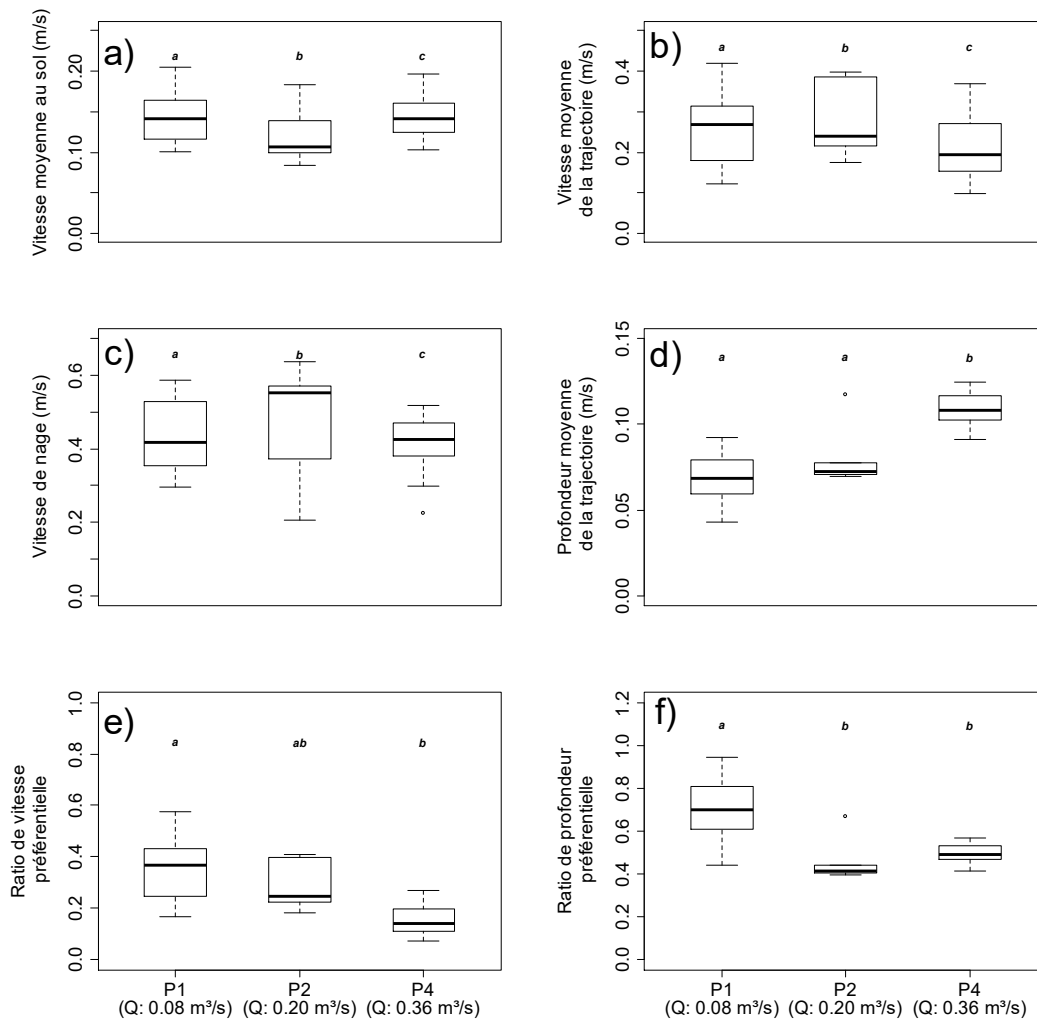
**Tableau 7. Comparaisons statistiques (ANOVA ou équivalent non paramétrique) des variables d'intérêt concernant les vitesses de nage et les conditions d'écoulement de l'eau, entre les trois conditions hydrauliques affrontées (P1, P2 et P4) (n = 23). Les différences significatives sont en caractère gras.**

Variables	Moyenne ( $\pm$ écart-type)			Comparaison statistique	
	P1	P2	P4	Statistique	$p$
Vitesse moyenne au sol (m/s)	0.14 ( $\pm$ 0.04)	0.12 ( $\pm$ 0.04)	0.14 ( $\pm$ 0.03)	ANOVA : $F_{2, 20} = 0.848$	0.443
Vitesse moyenne des trajectoires (m/s)	0.26 ( $\pm$ 0.10)	0.28 ( $\pm$ 0.10)	0.21 ( $\pm$ 0.09)	ANOVA : $F_{2, 20} = 1.024$	0.377
Vitesse moyenne de nage (m/s)	0.44 ( $\pm$ 0.11)	0.47 ( $\pm$ 0.18)	0.41 ( $\pm$ 0.09)	ANOVA : $F_{2, 20} = 0.396$	0.678
<b>Profondeur moyenne des trajectoires (m)</b>	<b>0.07 (<math>\pm</math> 0.02)</b>	<b>0.08 (<math>\pm</math> 0.02)</b>	<b>0.11 (<math>\pm</math> 0.01)</b>	<b>ANOVA : <math>F_{2, 20} = 16.38</math></b>	<b>&lt; 0.001</b>
<b>Ratio de vitesse préférentielle</b>	<b>0.35 (<math>\pm</math> 0.14)</b>	<b>0.29 (<math>\pm</math> 0.11)</b>	<b>0.15 (<math>\pm</math> 0.06)</b>	<b>ANOVA : <math>F_{2, 20} = 8.584</math></b>	<b>0.002</b>
<b>Ratio de profondeur préférentielle</b>	<b>0.70 (<math>\pm</math> 0.17)</b>	<b>0.47 (<math>\pm</math> 0.12)</b>	<b>0.49 (<math>\pm</math> 0.05)</b>	<b>Kruskal-Wallis : <math>X^2 = 9.469</math></b>	<b>0.009</b>

Une analyse *post hoc* montre que la profondeur moyenne d'écoulement des trajectoires est significativement différente entre les conditions P1 et P4 (Tukey post-hoc:  $p < 0.001$ ) et P2 et P4 (Tukey post-hoc:  $p < 0.001$ ), les poissons nageant à des profondeurs d'écoulement plus grandes dans des conditions hydrauliques élevées (Figure 26d). Le ratio de vitesse préférentielle diffère significativement entre les conditions P1 et P4 (Tukey post-hoc:  $p = 0.002$ ) (Figure 26e). Les poissons ont affronté des vitesses d'écoulement plus faibles que la vitesse moyenne d'écoulement dans le ponceau dans toutes les conditions hydrauliques, mais ce ratio est



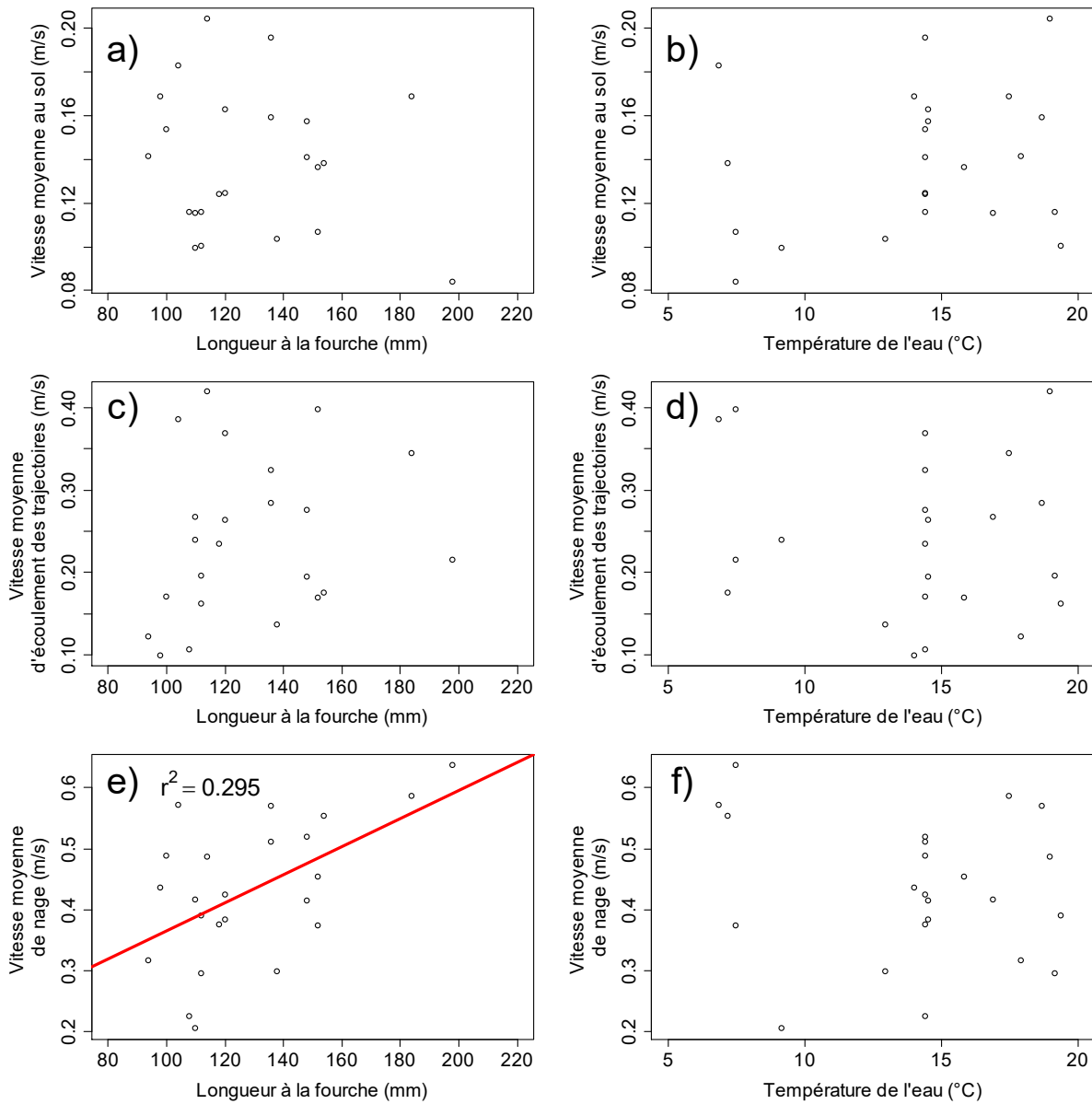
significativement plus bas pour la condition hydraulique élevée. Le ratio de profondeur préférentielle diffère significativement entre les conditions P1 et P2 (Mann-Whitney :  $U = 32$ ,  $p = 0.018$ ) ainsi que P1 et P4 (Mann-Whitney :  $U = 66$ ,  $p = 0.011$ ) (Figure 26f).



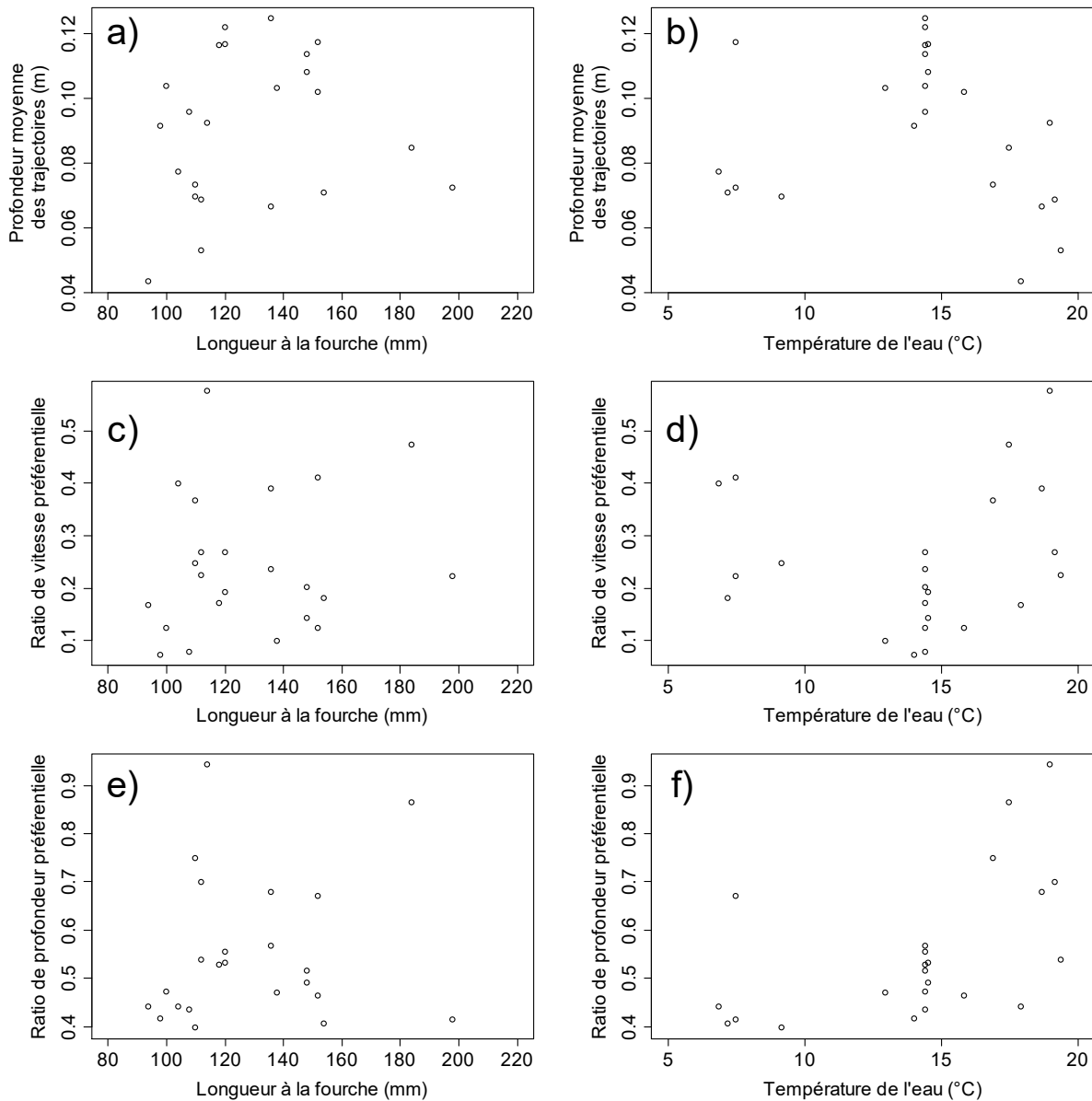
**Figure 26.** Représentation graphique de l'analyse montrant les différences entre les trois essais pour les variables de vitesses de nage et hydrauliques. Les chiffres en italique au-dessus du graphique représentent le nombre d'individus par condition. Les lettres en italique au-dessus des boîtes montrent l'absence (lettres semblables) ou la présence d'une différence significative (lettres différentes) entre les essais.

La vitesse de nage moyenne est prédite par la taille des individus, les individus de plus grande taille montrant des vitesses de nage plus grandes ( $r^2 = 0.295$ ,  $p = 0.007$ ) (Figure 27e). Aucune corrélation significative n'est observée entre la taille des individus et les autres variables

d'intérêt ( $p > 0.050$ ). Aucune corrélation significative n'est observée entre la température de l'eau et les autres variables d'intérêt ( $p > 0.050$ ) (Figure 27 et Figure 28).

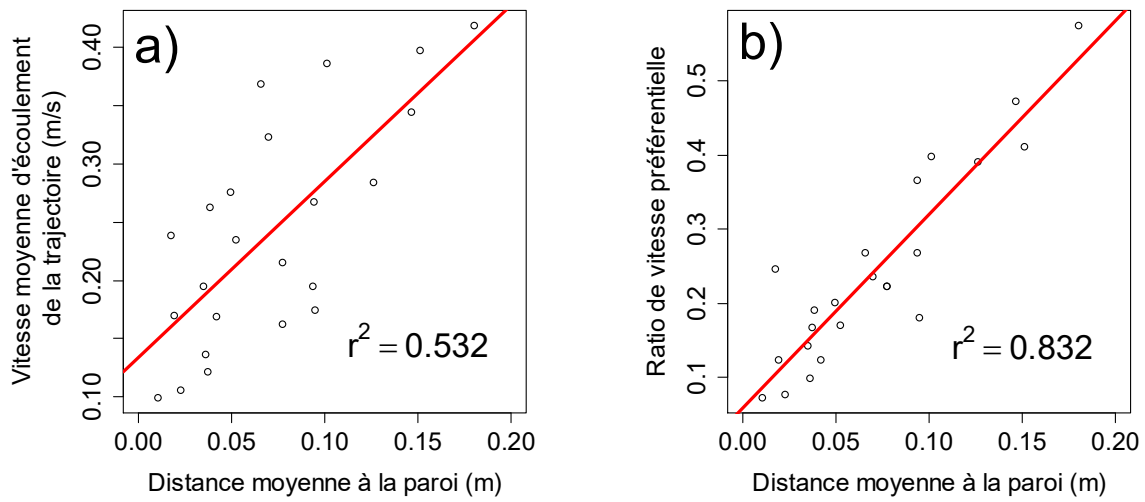


**Figure 27. Relation entre la taille des poissons, la température de l'eau et certaines variables de vitesses de nage et hydrauliques. Chaque point représente un individu (n = 23). La droite représente une relation significative linéaire. La force de la corrélation est représentée par le coefficient de détermination ( $r^2$ ).**



**Figure 28. Relation entre la taille des poissons, la température de l'eau et certaines variables de vitesses de nage et hydrauliques. Chaque point représente un individu (n = 23).**

Les résultats de l'étude montrent que la vitesse moyenne d'écoulement des trajectoires est prédite par la distance moyenne à la paroi ( $r^2 = 0.532$ ,  $p < 0.001$ ) (Figure 29a). Suivant la même logique, le ratio de vitesse préférentielle est également prédit par la distance moyenne à la paroi ( $r^2 = 0.832$ ,  $p < 0.001$ ), le ratio étant plus élevé lorsque le poisson s'éloigne de la paroi (Figure 29b).



**Figure 29. Relations entre la distance moyenne à la paroi et a) la vitesse moyenne d'écoulement de la trajectoire et b) le ratio de vitesse préférentielle. Chaque point représente un individu ( $n = 23$ ). Les droites représentent une relation significative linéaire. La force de la corrélation est représentée par le coefficient de détermination ( $r^2$ ).**

## **4.2 Effet de la personnalité**

Afin de vérifier la validité des mesures de personnalité effectuées sur les ombles de fontaine, une analyse de répétabilité a été réalisée sur deux groupes indépendants d'ombles de fontaine quelques semaines avant la documentation des trajectoires de nage des poissons dans le ponceau. Les mesures de personnalité valides ont été utilisées afin de documenter la personnalité des poissons suivis lors de l'ascension du ponceau.

### **4.2.1 Répétabilité des mesures de personnalités sur deux groupes indépendants d'ombles de fontaine**

L'examen de la distribution de fréquence du score d'audace, soit le temps requis pour quitter un refuge, montre une distribution bimodale des scores chez les deux groupes d'ombles de fontaine (Figure 30). Un groupe de poissons ont quitté le refuge rapidement (moins de 100 secondes) alors qu'un deuxième groupe de poissons n'avaient toujours pas quitté le refuge après 600 secondes, soit le temps maximal de la procédure.

Les scores d'audace sont demeurés constants chez les deux groupes d'ombles de fontaine pour les trois journées consécutives, tel que montré par les indices significatifs de corrélation de rang de Spearman (Tableau 8). Les fortes corrélations, variant de 0.50 à 0.88, montrent que les poissons ont gardé le même rang entre eux, c'est-à-dire qu'ils ont montré le même niveau d'audace par rapport aux autres, et ce, peu importe la journée.

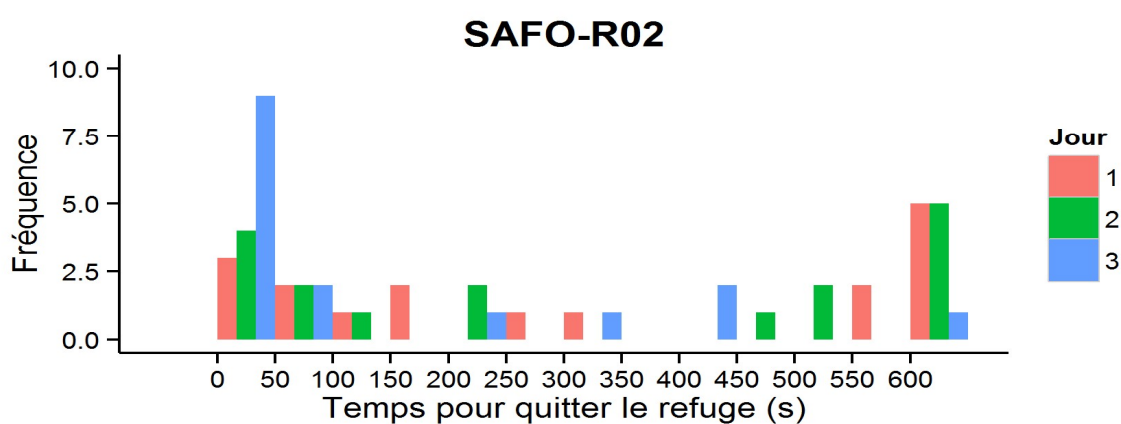
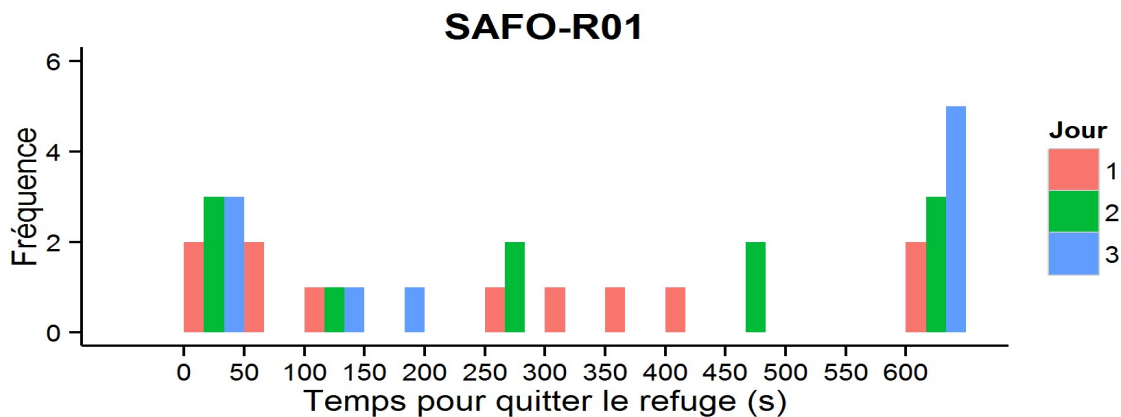


Figure 30. Distribution de fréquence du score d'audace (temps requis pour quitter le refuge) pour les deux groupes de poissons utilisés lors de la mesure de répétabilité (SAFO-R01 et SAFO-R02), pour chaque journée de mesures.

Tableau 8. Corrélations de rang de Spearman calculées sur le temps requis pour quitter le refuge (audace) sur trois journées consécutives. Les corrélations significatives sont en caractère gras. Le nombre de poissons testés est entre parenthèses.

SAFO-R01			
	Jour 1	Jour 2	Jour 3
Jour 1	1.00	<b>0.82 (10) **</b>	<b>0.88 (9) ***</b>
Jour 2	<b>0.82 (10) **</b>	1.00	<b>0.67 (9) *</b>
Jour 3	<b>0.88 (9) ***</b>	<b>0.67 (9) *</b>	1.00
SAFO-R02			
Jour 1	1.00	<b>0.72 (18) **</b>	<b>0.71 (17) **</b>
Jour 2	<b>0.72 (18) **</b>	1.00	<b>0.50 (17) *</b>
Jour 3	<b>0.71 (17) **</b>	<b>0.71 (17) **</b>	1.00

L'examen de la distribution de fréquence du score d'exploration, soit la proportion de surface explorée, montre une distribution plus ou moins uniforme des scores chez les deux groupes d'ombles de fontaine (Figure 31). La majorité des poissons ont exploré moins de 20 % de la surface totale du bassin expérimental. Seulement 3 poissons ont exploré plus de 30 % du bassin.

Toutefois, aucune mesure d'exploration n'a montré une constance significative dans le temps ( $p > 0.05$ ) (Tableau 9). Ce trait de personnalité ne sera donc pas pris en compte dans l'analyse portant sur le comportement spatial dans le ponceau.

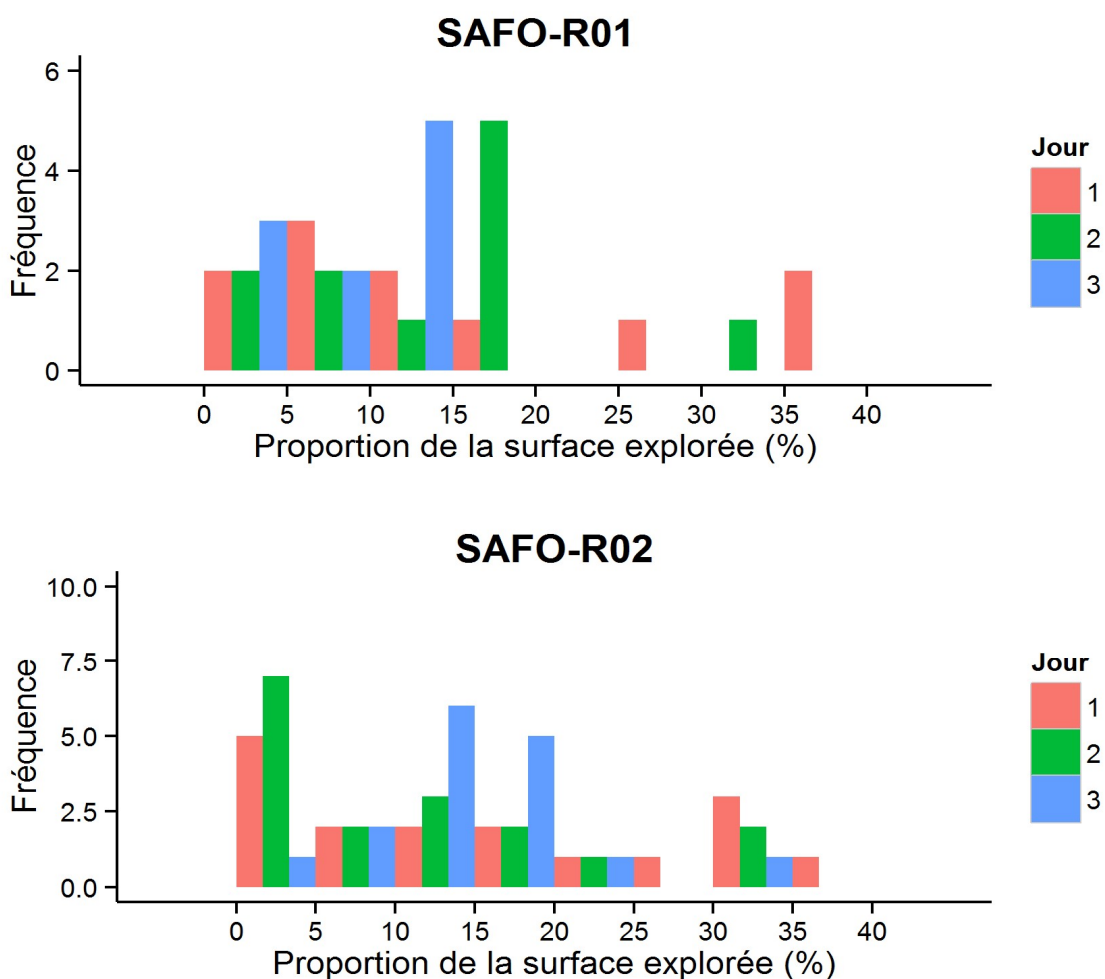


Figure 31. Distribution de fréquence du score d'exploration (proportion de la surface explorée) pour les deux groupes de poissons utilisés lors de la mesure de répétabilité (SAFO-R01 et SAFO-R02), pour chaque journée de mesures.

**Tableau 9. Corrélations de rang de Spearman calculées sur la proportion de la surface explorée (exploration) sur trois journées consécutives. Les corrélations significatives sont en caractère gras. Le nombre de poissons testés est entre parenthèses.**

SAFO-R01			
	Jour 1	Jour 2	Jour 3
Jour 1	1.00	0.44 (10)	0.43 (9)
Jour 2	0.44 (10)	1.00	0.28 (9)
Jour 3	0.43 (9)	0.28 (9)	1.00
SAFO-R02			
Jour 1	1.00	0.38 (18)	0.32 (17)
Jour 2	0.38 (18)	1.00	0.38 (17)
Jour 3	0.32 (17)	0.38 (17)	1.00

L'examen de la distribution de fréquence du score d'activité, soit la proportion de temps passé à nager, montre une distribution asymétrique vers la droite des scores chez les deux groupes d'ombles de fontaine (Figure 32). La majorité des poissons ont passé plus de 80 % du temps à nager.

Les scores d'activité sont demeurés constants chez les deux groupes d'ombles de fontaine pour certaines journées (Tableau 10). Les fortes valeurs de corrélation de Spearman montrent que le niveau d'activité est demeuré constant chez le groupe SAFO-R01 entre deux journées consécutives (Spearman :  $r = 0.72$ ,  $p = 0.019$ ). Pour le groupe SAFO-R02, les valeurs montrent une constance entre les jours 1 et 2 (Spearman :  $r = 0.82$ ,  $p < 0,001$ ) ainsi qu'entre les jours 2 et 3 (Spearman :  $r = 0.70$ ,  $p = 0.002$ ).



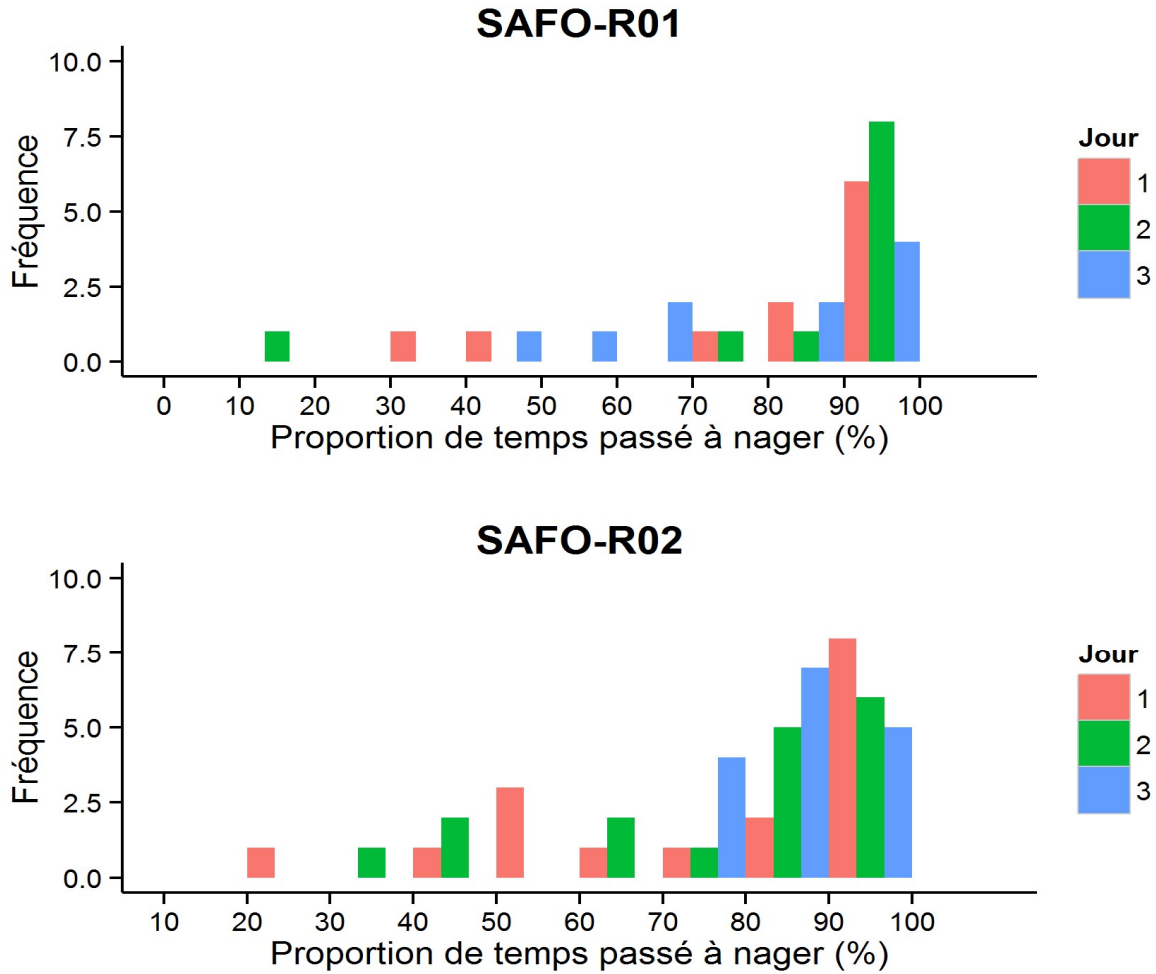


Figure 32. Distribution de fréquence du score d'activité (proportion de temps passé à nager) pour les deux groupes de poissons utilisés lors de la mesure de répétabilité (SAFO-R01 et SAFO-R02), pour chaque journée de mesures.

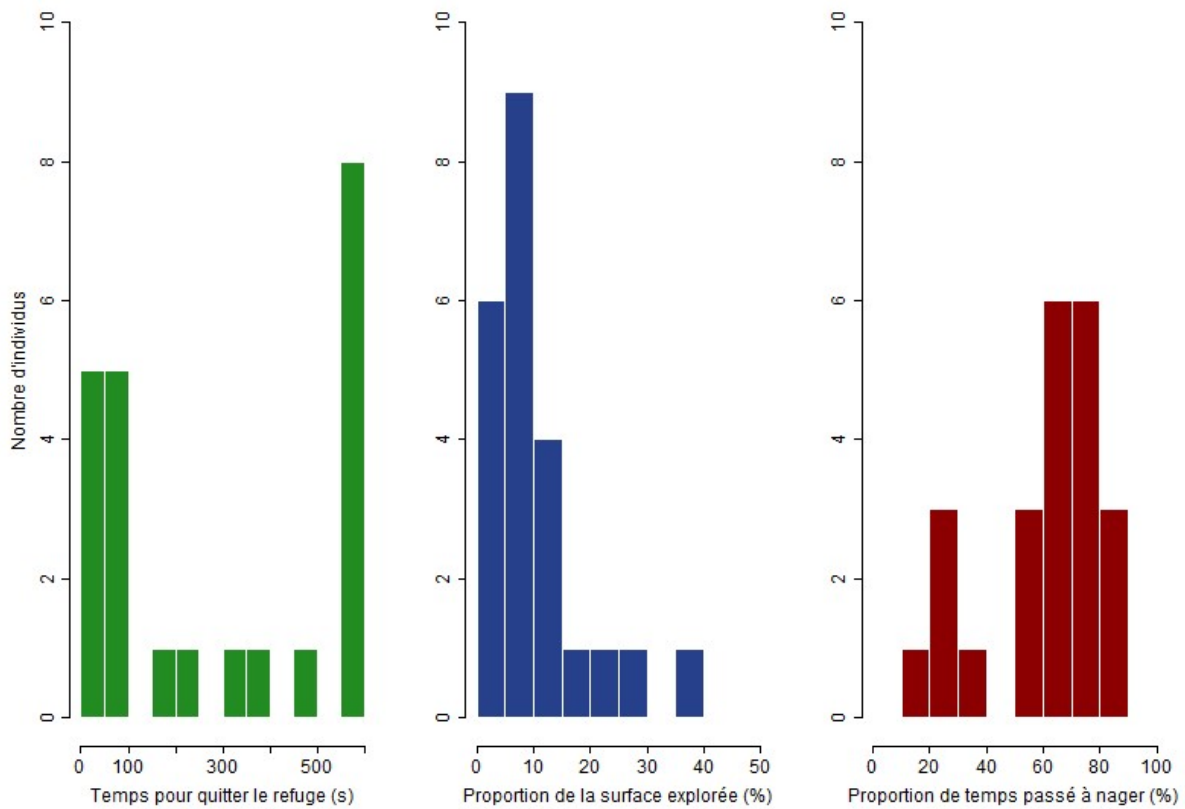
**Tableau 10. Corrélations de rang de Spearman calculées sur la proportion de temps passé à nager (activité) sur trois journées consécutives. Les corrélations significatives sont en caractère gras. Le nombre de poissons testés est entre parenthèses.**

SAFO-R01			
	Jour 1	Jour 2	Jour 3
Jour 1	1.00	0.61 (10)	0.58 (9)
Jour 2	0.61 (10)	1.00	<b>0.72 (9) *</b>
Jour 3	0.58 (9)	<b>0.72 (9) *</b>	1.00
SAFO-R02			
Jour 1	1.00	<b>0.82 (18) ****</b>	0.47 (17)
Jour 2	<b>0.82 (18) ****</b>	1.00	<b>0.70 (17) **</b>
Jour 3	0.47 (17)	<b>0.70 (17) **</b>	1.00

Les valeurs de répétabilité montrent que la mesure de l'audace, telle que décrite dans la méthodologie, est valide. La corrélation entre ce trait de personnalité et le comportement spatial peut donc être testée sur les individus suivis lors de la documentation des trajectoires dans le ponceau. Bien que le niveau d'activité, défini par la proportion de temps passé à nager, ne montre pas une constance pour chaque journée, ce trait de personnalité a également été inclus dans les analyses. Les mesures d'exploration ont été exclues de l'analyse de la personnalité et du comportement spatial dans le ponceau puisqu'aucune constance n'a été observée entre les différentes mesures. Ainsi, les traits de personnalité valides seront mesurés à une seule reprise chez les poissons qui tenteront de franchir le ponceau.

#### **4.2.2 Résultats bruts des tests de personnalité**

L'examen de la distribution de fréquence des scores de personnalité (audace, exploration et activité) chez les individus dont le comportement spatial dans le ponceau a été documenté montre une distribution des scores similaire à celle illustrée lors de la mesure de la répétabilité sur d'autres individus d'ombles de fontaine (Figure 33). Les scores d'audace montrent également une distribution bimodale, un groupe de poissons étant qualifié de téméraire (ont quitté le refuge avant 100 secondes) et un autre groupe pouvant être qualifié de non téméraire sont restés dans le refuge jusqu'à la durée maximale de l'expérimentation (Figure 33). La majorité des poissons ont exploré moins de 15 % de la surface du bassin et la majorité des poissons ont passé plus de 50 % du temps à nager.



**Figure 33. Distribution de fréquence des scores de personnalité (audace, exploration et activité) pour les poissons suivis dans le cadre de la documentation du comportement spatial dans le ponceau ( $n = 23$ ).**

Les mêmes formes de distribution sont observées pour chaque groupe d'ombles de fontaine utilisés (Figure 34). Le score d'audace ne diffère pas selon le groupe de poissons utilisés dans les différentes conditions hydrauliques (Kruskal-Wallis :  $X^2 = 0.758$ ,  $p = 0.685$ ). Le score d'activité ne diffère également pas selon le groupe de poissons utilisés dans les différentes conditions hydrauliques (Kruskal-Wallis :  $X^2 = 4.2512$ ,  $p = 0.119$ ).

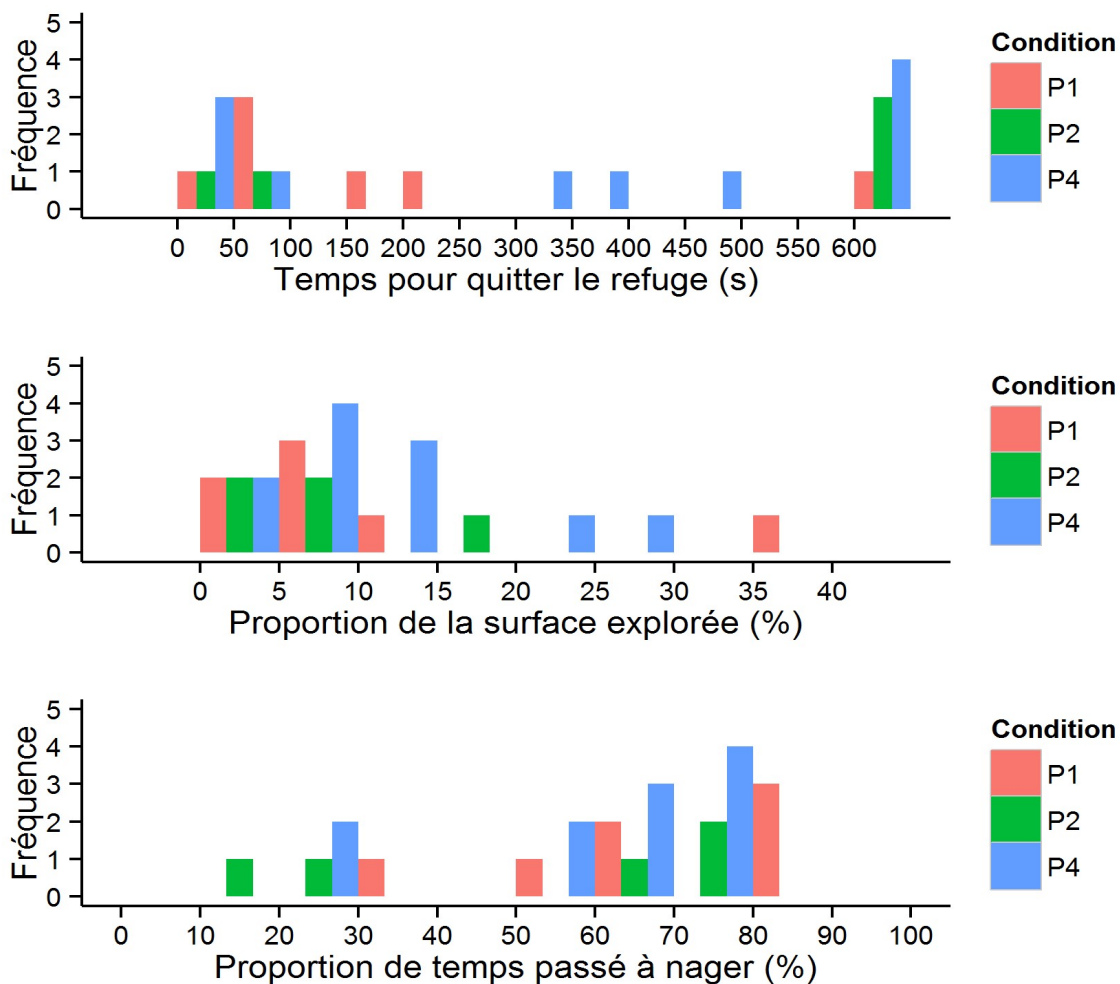
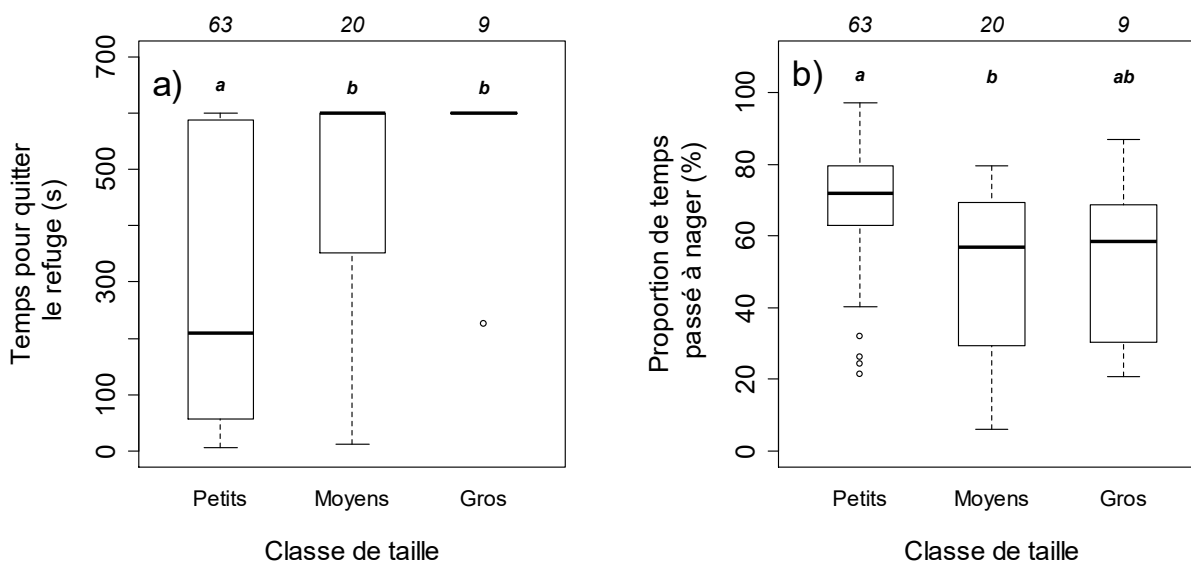


Figure 34. Distribution de fréquence des scores de personnalité (audace, exploration, activité) pour chaque groupe de poissons (conditions hydrauliques P1, P2 et P4) suivis dans le cadre de la documentation du comportement spatial dans le ponceau ( $n = 23$ ).

En regroupant l'ensemble des ombles de fontaine testés, qu'ils aient effectué ou non une tentative de passage, les scores d'audace sont significativement différents selon la classe de taille des poissons (longueur à la fourche), les poissons de petite taille étant plus audacieux que les poissons de moyenne taille (Mann-Whitney :  $U = 355$ ,  $p = 0.003$ ) et de grande taille (Mann-Whitney :  $U = 95$ ,  $p = 0.001$ ) (Figure 35Erreur ! Source du renvoi introuvable.a). Les mesures d'activité sont également significativement différentes selon les classes de taille des individus (ANOVA :  $F_{2, 89} = 7.593$ ,  $p < 0.001$ ) (Figure 35b). Une analyse *post hoc* montre que la proportion de temps passé à nager (activité) est significativement plus grande chez les poissons de petite

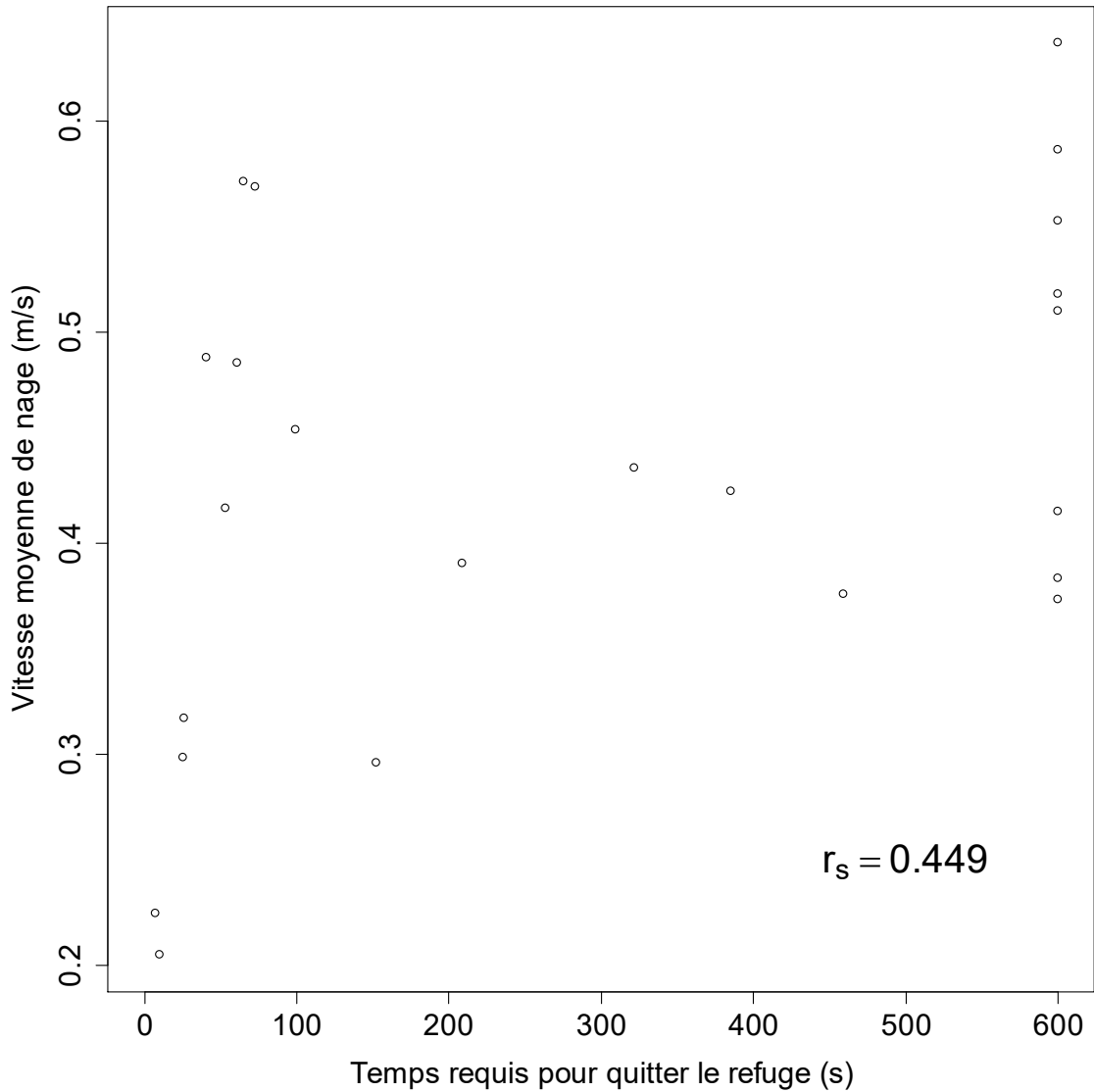
taille (proportion de temps passé à nager :  $68.6 \pm 16.9$  %) que chez les poissons de moyenne taille (proportion de temps passé à nager :  $51.1 \pm 22.3$  %), bien que les mesures montrent une grande variabilité (Tukey *post-hoc* :  $p = 0.002$ ) (Figure 35).



**Figure 35. Représentation graphique de l'analyse *post hoc* montrant les différences a) d'audace et b) d'activité entre les trois classes de taille. Les chiffres en italique au-dessus des panneaux représentent le nombre d'individus par essai. Les lettres en italique au-dessus des boîtes montrent l'absence (lettres semblables) ou la présence d'une différence significative (lettres différentes) entre les essais.**

#### 4.2.3 L'audace et le comportement de nage dans le ponceau

Les scores d'audace ne montrent aucune différence significative entre les individus ayant effectué une tentative et les individus n'ayant effectué aucune tentative (Mann-Whitney :  $U = 806$ ,  $p = 0.4294$ ). Les poissons ayant effectué des tentatives ne sont pas plus téméraires que ceux n'en ayant effectué aucune. Seule une corrélation significative a été observée entre l'audace et les variables du comportement spatial dans le ponceau. Une corrélation monotone positive est observée entre le temps pour quitter le refuge et la vitesse moyenne de nage, soit l'addition de la vitesse au sol et de la vitesse d'écoulement de la trajectoire (Spearman :  $r = 0.449$ ,  $p = 0.032$ ) (Figure 36). Les individus audacieux ont donc montré des vitesses moyennes de nage inférieures aux individus non audacieux, mais cette corrélation n'est plus observée lorsque la taille est prise en compte ( $r_{part} : 0.256$ ,  $p = 0.236$ ). Aucune corrélation significative n'est observée entre l'audace des individus et les autres variables du comportement spatial ( $p > 0.050$ ).

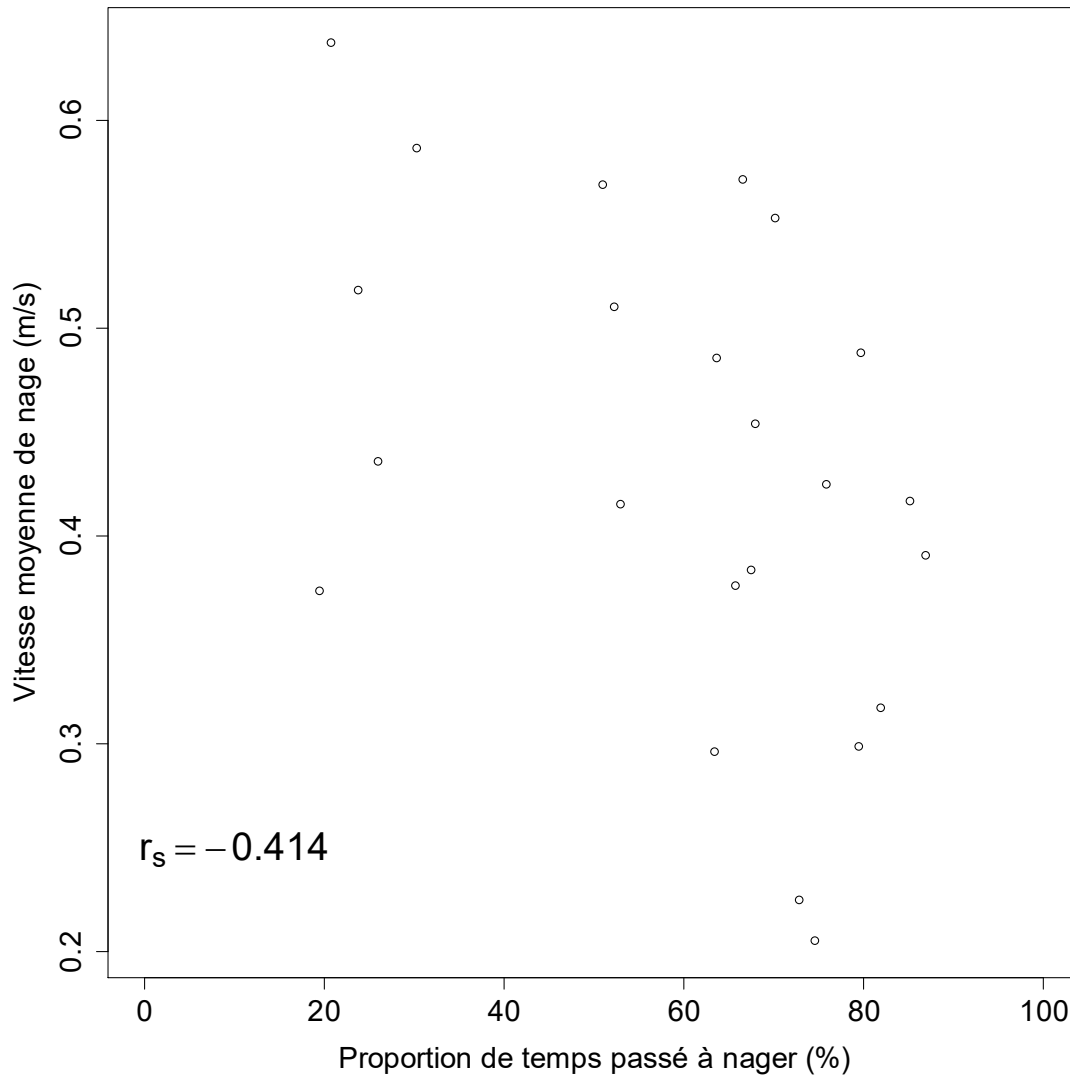


**Figure 36. Relation entre le temps requis pour quitter le refuge (audace) et la vitesse moyenne de nage des poissons dans le ponceau. Chaque point représente un individu suivi ( $n = 23$ ). La force de la corrélation est représentée par le coefficient de Spearman ( $r_s$ ).**

#### **4.2.4 L'activité et le comportement de nage dans le ponceau**

Les mesures d'activité n'ont montré aucune différence significative entre les individus ayant effectué une tentative et les individus n'ayant effectué aucune tentative (test-t de Student :  $t = 0.125$ ,  $p = 0.901$ ). Les poissons ayant effectué des tentatives ne sont pas plus actifs que ceux n'en ayant effectué aucune. Seule une corrélation significative a été observée entre l'activité et les variables du comportement spatial. Contrairement à notre attente, une corrélation monotone négative est observée entre l'activité et la vitesse moyenne de nage, soit l'addition de la vitesse

au sol et de la vitesse d'écoulement de la trajectoire (Spearman :  $r = -0.414$ ,  $p = 0.05$ ) (Figure 37). Les individus actifs dans les bassins expérimentaux ont montré des vitesses moyennes de nage inférieures aux individus non actifs, mais cette corrélation n'est plus observée lorsque la taille est prise en compte ( $r_{part} : -0.264$ ,  $p = 0.221$ ). Aucune corrélation significative n'est observée entre l'activité des individus et les autres variables du comportement spatial ( $p > 0.050$ ).



**Figure 37. Relation entre la proportion de temps passé à nager (activité) et la vitesse moyenne de nage des poissons dans le ponceau. Chaque point représente un individu suivi ( $n = 23$ ). La force de la corrélation est représentée par le coefficient de Spearman ( $r_s$ ).**





## **5. DISCUSSION**

### **5.1 Comportement spatial de l'omble de fontaine dans un ponceau**

Le comportement spatial de l'omble de fontaine *Salvelinus fontinalis*, lors de l'ascension d'un ponceau à paroi rugueuse, a été documenté en utilisant un système de suivi original combinant des caméras à éclairage infrarouge et la technologie de télémétrie radio passive, sous trois conditions naturelles d'écoulement. Une caractérisation fine des vitesses d'écoulement ainsi qu'un suivi des trajectoires de nage à une échelle spatio-temporelle très fine ont permis de documenter le comportement spatial de l'omble de fontaine lors de l'ascension du ponceau.

#### **5.1.1 Tentatives et succès de passage**

Contrairement à nos attentes, presque tous les poissons ayant effectué au moins une tentative ont réussi à franchir le ponceau, et ce, même à des conditions hydrauliques élevées. Une plus grande proportion de poissons a effectué une tentative au débit le plus élevé (P4), et ce, plus rapidement que pour les autres conditions hydrauliques. Une plus grande proportion de tentatives est généralement observée à des conditions hydrauliques élevées dans les études portant sur la performance de nage des poissons (Castro-Santos, 2004, Castro-Santos *et al.*, 2013, Goerig *et al.*, 2017b). Ce taux de tentative est similaire à celui observé dans une étude portant sur les facteurs motivant les poissons à franchir les ponceaux (Goerig *et al.*, 2017b). Dans cette étude, les ombles de fontaine ont montré un plus grand taux de tentatives à l'approche de la période de reproduction, à des débits élevés ainsi que pour les individus de plus grande taille. Un inconfort subi par les poissons dans la cage ou une rhéotaxie positive à des vitesses d'écoulement plus élevées pourraient expliquer le nombre de tentatives plus élevé à des conditions hydrauliques élevées. Les poissons ayant effectué une tentative sont de plus grande taille que ceux qui n'en ont pas effectué. Il est cependant difficile de distinguer l'effet du débit et d'autres facteurs tels que la température et l'approche de la période de reproduction sur le nombre de tentatives.

#### **5.1.2 Description générale des trajectoires**

Cette étude illustre la complexité du comportement de nage des salmonidés lors de la traversée d'un ponceau. Plutôt que de franchir le ponceau en nageant de façon continue, les poissons ont plutôt adopté une nage ponctuée d'arrêts à des endroits stratégiques et de durée

variable. Les poissons ont tous démontré un comportement de nage similaire, soit celui de franchir le ponceau en suivant une trajectoire sinueuse plutôt que linéaire. Les poissons ont ainsi parcouru des distances totales moyennes de 48.7 mètres, soit plus de 40 % supérieures à la longueur de la conduite. Certains ont parcouru une distance moyenne au-delà de 100 mètres. Ce résultat suggère que l'utilisation de la longueur du ponceau dans les modèles de prédiction du succès de passage n'est pas représentative de l'effort fourni par les poissons lors de l'ascension. Une étude portant sur les variables explicatives du succès de passage de plus de 1000 ombles de fontaine dans 13 ponceaux a démontré que la longueur des ponceaux n'était pas une variable prédictive significative (Goerig *et al.*, 2016). Elle devrait être utilisée en combinaison avec d'autres variables pertinentes, telles que la pente ou le type de ponceau. La plus forte sinuosité des trajectoires observée à la condition hydraulique intermédiaire est possiblement associée aux basses températures de l'eau à ce moment, qui ont pu affecter l'activité métabolique des poissons et donc leur comportement spatial (Brett, 1971). Les poissons ont nagé à une distance moyenne de la paroi variant de 0.04 à 0.11 m. Cette distance est beaucoup plus faible que celles observées dans une étude sur la performance de nage de l'omble de fontaine, où les poissons ont suivi des trajectoires à environ 0.2 m de la paroi d'un tunnel de nage (Castro-Santos *et al.*, 2013). Toutefois, le tunnel de nage utilisé était à paroi lisse et les vitesses d'écoulement dans la conduite étaient probablement uniformes, contraignant les poissons à nager contre de plus grandes vitesses.

### **5.1.3 Continuité de la nage lors des ascensions**

Aucun individu n'a nagé continuellement lors de l'ascension, effectuant plutôt des progressions ponctuées d'arrêts de durées variables. Contrairement à nos attentes, le nombre d'arrêts effectués n'est pas plus élevé et la longueur moyenne des progressions n'est pas plus courte pour les conditions hydrauliques élevées. Par contre, la durée moyenne des arrêts, qui représente plus de 80 % du temps total passé dans le ponceau, augmente avec l'intensité des conditions hydrauliques. Ceci suggère que les poissons compensent un effort de nage plus exigeant en effectuant non pas plus d'arrêts, mais des arrêts de plus longue durée à des endroits stratégiques. Ces arrêts sont probablement nécessaires aux poissons afin de récupérer d'un effort anaérobie intense et de diminuer les concentrations d'acide lactique dans les muscles (Tudorache *et al.*, 2010a). Les poissons ont cependant effectué des arrêts à des endroits où la vitesse et la profondeur d'écoulement de l'eau n'étaient pas différentes de celles de la trajectoire même. Le ponceau ne présentant pas de zone de reflat avec écoulement lent suffisamment grand, les poissons ont pu profiter des vitesses d'écoulement inférieures en longeant la paroi. Des analyses bioénergétiques supplémentaires du coût total associé à une progression (durée x

vitesse de nage) pourraient permettre de déterminer les raisons associées à la fréquence, la durée et la localisation des arrêts. Par exemple, il est possible que les poissons se soient arrêtés d'épuisement, après avoir affronté des vitesses d'écoulement trop élevées pendant trop longtemps ou en adoptant des vitesses de nage non optimales (Castro-Santos, 2005). Il est intéressant de noter que les poissons ont passé moins de 20 % du temps en mouvement lors de l'essai P2 où la température de l'eau était plus froide que pour P1 et P4. À des températures supérieures 14°C, les poissons ont démontré un plus grand niveau d'activité. La température optimale pour la croissance et les capacités aérobiques des salmonidés se situant autour de 15-16°C (Brett, 1971, Tang *et al.*, 1995, Tudorache *et al.*, 2010b), il est possible que pour P2, la température plus froide se soit répercutée sur l'activité de nage du poisson.

#### **5.1.4 Vitesses de nage, vitesses d'écoulement des trajectoires et ratio de vitesse préférentielle**

Les résultats de l'étude suggèrent que peu importe la condition hydraulique dans le ponceau, les poissons empruntent une trajectoire qui leur permet de nager contre une vitesse d'écoulement similaire en gardant une vitesse au sol similaire dans le but de nager à une vitesse possiblement optimale. Il a déjà été observé que la vitesse moyenne au sol d'un poisson durant un mouvement ne diffère pas selon les conditions hydrauliques, suggérant que le poisson adapte sa vitesse de nage pour garder sa vitesse au sol constante (Castro-Santos, 2005). Ce résultat supporte l'hypothèse générale selon laquelle les poissons nageant librement et dans un environnement composé d'une complexité hydraulique sont capables d'utiliser des zones d'écoulement à vitesse réduite. Les vitesses d'écoulement présentes dans les ponceaux à paroi rugueuse sont non uniformes (Ead *et al.*, 2000, Clark *et al.*, 2014). Des zones d'écoulement à vitesses réduites sont créées le long des parois et peuvent faciliter l'ascension des poissons lorsque les vitesses observées au centre du ponceau excèdent la capacité de nage de ces derniers. Plusieurs études ont montré que les salmonidés se déplacent en exploitant ces zones pendant l'ascension d'un ponceau lorsque les vitesses d'écoulement deviennent trop exigeantes (Powers *et al.*, 1997, Johnson *et al.*, 2012, Peterson *et al.*, 2013). Les poissons dont la taille est inférieure aux ondulations sont également susceptibles d'exploiter ces zones à vitesse d'écoulement nulle comme refuge hydraulique (Goerig *et al.*, 2016). Les vitesses d'écoulement augmentant de façon radiale à partir du centre du ponceau, les poissons sont contraints à nager plus près de la paroi du ponceau afin d'éviter les vitesses d'écoulement élevées. La forte relation linéaire entre la vitesse d'écoulement affrontée par le poisson et la distance moyenne par rapport

à la paroi de la conduite montre qu'en s'approchant de la paroi de la conduite, les poissons bénéficient de vitesses d'écoulement plus faibles. Ce comportement a permis aux poissons de nager contre des vitesses d'écoulement variant entre 0.09 et 0.42 m/s, soit contre des vitesses de 65 à 85 % inférieures à la vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite. Le ratio de vitesse préférentielle semble diminuer avec l'augmentation du débit. Les ratios obtenus varient de 0.15 à 0.35 pour des vitesses d'écoulement de 0.73 à 1.37 m/s. Dans une récente étude portant sur le comportement de nage de l'omble de fontaine dans un ponceau, le ratio observé était d'environ 0.4 pour une vitesse moyenne d'écoulement de 0.63 m/s (Goerig *et al.*, 2017a). Les ratios étaient toutefois supérieurs à 1 pour des vitesses moyennes d'écoulement de 0.30 à 0.45 m/s, les poissons montrant des trajectoires de nage plus sinueuses sur la largeur du ponceau. En suivant cette logique, les poissons vont adopter un mode de nage moins contraignant à de faibles vitesses d'écoulement, mais vont adopter des trajectoires plutôt linéaires en suivant les parois du ponceau lorsque les vitesses d'écoulement deviennent plus exigeantes, évitant ainsi la transition vers un métabolisme anaérobique (Peake *et al.*, 1997). Ces ratios sont supérieurs aux ratios calculés pour la conception de ponceau pour l'ombre Arctique (Behlke *et al.*, 1991). Les résultats indiquent que la vitesse moyenne d'écoulement affrontée par les ombles lors de l'ascension ne diffère pas selon la condition hydraulique. Cependant, sachant que la vitesse moyenne dans la conduite augmente avec le débit, le fait que le poisson réussisse à affronter toujours la même vitesse montre qu'il se déplace afin de trouver l'endroit où la vitesse d'écoulement est plus faible, soit principalement le long des parois. La distance moyenne par rapport à la paroi est plus faible pour la condition hydraulique élevée, démontrant que le poisson se rapproche davantage de la paroi pour franchir le ponceau, là où les vitesses d'écoulement rencontrées sont plus faibles. Ce résultat illustre encore une fois la capacité des poissons à déceler et utiliser des trajectoires minimisant les vitesses d'écoulement rencontrées. Il est possible que ce comportement de nage ne soit pas observé chez toutes les espèces de poissons. Une étude réalisée dans des ponceaux expérimentaux lisses et rugueux a montré que les carpes communes juvéniles et les carpes à grosse tête n'utilisaient pas des trajectoires minimisant les vitesses d'écoulement rencontrées (Newbold *et al.*, 2015, Newbold *et al.*, 2016). Les résultats montrent également que la profondeur moyenne des trajectoires augmente à la condition hydraulique élevée (P4). Ceci est dû au fait que la profondeur de l'eau augmente le long des parois à mesure que s'accroît le diamètre hydraulique dans un ponceau circulaire.

### 5.1.5 Limites de l'étude

Les principaux résultats obtenus dans cette étude doivent être interprétés en toute connaissance des limites méthodologiques et statistiques. Les analyses ont été effectuées sur un nombre limité de poissons ( $n = 23$ ), ce qui limite la puissance statistique des tests réalisés. La relation entre la taille des individus et les variables du comportement spatial doit également être interprétée avec prudence puisque les individus de grande taille étaient sous-représentés. Bien que cette limitation ait pu faire diminuer les chances d'observer des relations significatives, l'objectif qualitatif, de l'étude a permis de documenter fidèlement le comportement spatial des poissons lors du franchissement d'un ponceau. Le fait qu'il y ait peu ou pas de poissons ayant subi un échec lors du franchissement du ponceau n'a pas permis de distinguer les comportements spatiaux favorisant le succès de passage. Les conditions hydrauliques testées variant d'intermédiaires à élevées, il aurait été intéressant de tester des conditions hydrauliques plus faibles. Ceci aurait permis de documenter le comportement spatial des poissons alors que les vitesses d'écoulement de l'eau sont moins contraignantes. L'étude se déroulant dans un environnement naturel et dynamique, plusieurs facteurs environnementaux tels que la température, les événements météorologiques et la turbulence de l'eau peuvent avoir eu un effet confondant. La turbulence présente dans les ponceaux rugueux peut être à la fois néfaste ou bénéfique pour les poissons. Des variations rapides et de fortes amplitudes des vitesses d'écoulement de l'eau sont susceptibles d'augmenter les coûts énergétiques de nage (Enders *et al.*, 2005) ou de déstabiliser les poissons (Tritico *et al.*, 2010). Au contraire, les poissons peuvent profiter de l'énergie créée par des tourbillons afin de se propulser et réduire leur dépense énergétique de nage (Liao *et al.*, 2003, Taguchi *et al.*, 2011). Les poissons nageant dans un environnement dynamique et imprévisible, il aurait été intéressant de mesurer la turbulence de l'écoulement. L'approche de la période de reproduction à l'automne peut également avoir amené un biais lors de l'interprétation des résultats.

## 5.2 Effet de la personnalité

Un jour avant la réalisation des essais dans le ponceau, la personnalité des ombles de fontaine a été documentée sur chaque individu selon un protocole standardisé issu de la littérature. La personnalité a été documentée à partir de la mesure de trois traits, soit l'audace, l'exploration et l'activité. Les mesures ont été effectuées dans des bassins expérimentaux situés directement dans le lit du cours d'eau, soit dans un milieu naturel. Ces mesures ont premièrement été répétées à trois reprises sur deux groupes indépendants d'omble de fontaine, quelques semaines précédant l'expérimentation dans le ponceau, afin de tester la validité des mesures.

### 5.2.1 Répétabilité des mesures de personnalité

La répétabilité n'a pas pu être calculée sur les scores bruts de personnalité puisque les données ne respectaient pas les conditions statistiques (Lessells *et al.*, 1987). La répétabilité a plutôt été estimée à partir de corrélations de rang de Spearman. Les scores d'audace sont demeurés constants chez les deux groupes d'ombles de fontaine durant les trois journées consécutives de mesures. Bien que les individus n'aient pas obtenu le même score brut d'une journée à l'autre, ils ont gardé le même rang par rapport aux autres. Ce résultat suggère que la mesure de l'audace était valide et a pu être considérée dans l'analyse du comportement spatial dans le ponceau. Plusieurs études portant sur la personnalité ont montré que les mesures d'audace chez les poissons étaient constantes dans le temps ou selon la situation (Cote *et al.*, 2010, Cote *et al.*, 2011, Dzieweczynski *et al.*, 2011, Aubin-Horth *et al.*, 2012, Edelsparre *et al.*, 2013, Mazué *et al.*, 2015). Dans une étude portant sur la corrélation entre la personnalité et le stress hormonal chez l'épinoche à trois épines, la mesure d'audace s'est avérée répétable sur deux jours consécutifs (Aubin-Horth *et al.*, 2012). Les scores d'activités obtenues dans la présente étude sont également restés constants pendant deux à trois journées consécutives. Plusieurs études ont également montré que les mesures d'activité demeurent constantes dans le temps ou selon la situation (Fraser *et al.*, 2001, Biro *et al.*, 2008, Wilson *et al.*, 2009a, Cote *et al.*, 2010, Cote *et al.*, 2011, Aubin-Horth *et al.*, 2012).

Peu d'analyses de la répétabilité des tests de personnalité sont présentes dans la littérature, spécialement pour les poissons (Bell *et al.*, 2009). La présente étude montre que l'audace et l'activité chez l'omble de fontaine peuvent être mesurées à l'aide de tests standardisés et que les mesures effectuées peuvent également être utilisées afin de déterminer si la personnalité constitue une variable prédictive du comportement spatial de l'omble de fontaine

dans différents contextes (ex. comportement d'alimentation, déplacements journaliers, performance de nage dans les ponceaux).

### **5.2.2 Effet des traits de personnalité sur le comportement spatial adopté dans le ponceau**

Un des objectifs de l'étude était de tester l'hypothèse que les individus audacieux, exploreurs et actifs auraient tendance à effectuer plus de tentatives pour franchir le ponceau et à obtenir un plus grand succès de passage. Contrairement à notre hypothèse, les individus ayant montré des niveaux supérieurs d'audace et d'activité dans les bassins expérimentaux n'ont pas effectué plus de tentatives d'ascension du ponceau que les autres. Plusieurs études ont cependant montré l'existence d'un lien entre la personnalité et le comportement spatial des poissons (Fraser *et al.*, 2001, McDonald *et al.*, 2007, Chapman *et al.*, 2011, Cote *et al.*, 2011, Rasmussen *et al.*, 2012, Edelsparre *et al.*, 2013). La variabilité comportementale interindividuelle et interpopulationnelle du mouvement est un phénomène également souvent observé chez les salmonidés (Bradford *et al.*, 1997, Morrissey *et al.*, 2011, Roy *et al.*, 2013). Le nombre de tentatives pour franchir un ponceau a récemment été utilisé afin de quantifier le niveau de motivation des poissons (Castro-Santos, 2004, Goerig *et al.*, 2017b). Dans la présente étude, aucun trait de personnalité n'a pu être associé à une mesure de la motivation des poissons à franchir le ponceau. D'autres facteurs intrinsèques et extrinsèques reliés à l'histoire de vie du poisson, la physiologie du poisson ou à l'environnement, sont susceptibles d'affecter le nombre de tentatives. Dans une récente étude portant sur la motivation des ombles de fontaine à franchir un ponceau, le nombre de tentatives était expliqué par l'approche de la saison de reproduction, le débit et la taille des poissons (Goerig *et al.*, 2017b). Le fait qu'il y ait peu ou pas de poissons ayant subi un échec lors du franchissement du ponceau n'a pas permis de tester l'hypothèse selon laquelle la personnalité pourrait constituer une variable prédictive du succès de passage. Une seule variable du comportement spatial dans le ponceau a montré une relation avec les traits de personnalité. Plus les poissons étaient audacieux ou actifs, plus les vitesses moyennes de nage dans le ponceau étaient faibles. Logiquement, on devrait s'attendre à ce que les individus ayant un niveau d'activité général élevé montrent des vitesses de nage plus élevées lorsqu'ils franchissent un ponceau. Il semble plutôt s'agir d'un effet de la taille puisque les poissons de plus petites tailles sont plus audacieux et actifs, alors que la vitesse moyenne de nage dans le ponceau était prédite par la taille des poissons. De plus, en tenant compte de la taille, les traits de personnalité (audace et activité) ne sont pas corrélés à la vitesse de nage dans le ponceau.

Les résultats ont montré que les scores d'audace des ombles de fontaine se distribuent de façon bimodale. Les individus semblent en effet se diviser en deux groupes, soit les audacieux et les non-audacieux avec quelques individus ayant un degré intermédiaire d'audace. Cette distribution est similaire à celle observée dans une étude sur l'audace et la tendance à migrer du gardon, un autre poisson d'eau douce (Chapman *et al.*, 2011). Les scores d'audace étaient significativement différents selon la taille des ombles de fontaine lorsque tous les individus étaient pris en compte, indépendamment du nombre de tentatives. Les ombles de petite taille (80-119 mm) ont montré des scores d'audace plus élevés que les individus de taille moyenne (120-159 mm) et de grande taille (160 mm et plus). Les ombles de fontaine ont montré un niveau d'activité général élevé, avec peu d'individus ayant passé moins de 40 % du temps à nager dans les bassins expérimentaux. La même distribution des scores d'audace et d'activité a été observée lors des mesures de répétabilité. Les scores d'activité étaient significativement différents selon la taille des ombles de fontaine lorsque tous les individus étaient pris en compte. Les ombles de petite taille ont montré un niveau d'activité plus élevé que les individus de taille moyenne. Cet effet de taille (ou de l'âge) sur le comportement des poissons est souvent observé dans la nature. Par exemple, la tendance à prendre des risques et le temps passé à chercher des proies est un comportement observé chez les jeunes poissons afin de satisfaire leurs besoins énergétiques élevés en début de vie (Farwell *et al.*, 2009, Adriaenssens *et al.*, 2010, Edelsparre *et al.*, 2013, Závorka *et al.*, 2015)

Les principaux résultats obtenus concernant la personnalité des poissons doivent être interprétés en toute connaissance des limites statistiques. Le comportement spatial de seulement 23 individus a été documenté dans le ponceau. Les analyses ont donc été effectuées sur un nombre limité de poissons, ce qui limite la puissance statistique des tests réalisés.



## 6. CONCLUSION

À notre connaissance, cette étude est la seule à documenter le comportement spatial de salmonidés lors de l'ascension d'un ponceau à une échelle spatio-temporelle aussi fine. L'utilisation novatrice de caméras vidéo à éclairage infrarouge a permis de suivre l'ascension des ombles de fontaine dans le ponceau de jour comme de nuit, et ce, sous différentes conditions hydrauliques. Les trajectoires numérisées de 23 ombles de fontaine ainsi que la caractérisation fine des vitesses d'écoulement de l'eau ont permis d'extraire plusieurs variables pertinentes du comportement de nage afin de documenter le comportement spatial des ombles. L'ensemble des résultats de cette étude apporte une possible explication sur le fait que les modèles prédictifs du succès de passage des poissons dans les ponceaux donnent de mauvaises prédictions. Ces modèles sont basés sur le fait que les poissons vont nager de façon continue contre la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau de la conduite. Cependant, la documentation du comportement spatial a montré que les poissons qui font l'ascension d'un ponceau alternent entre les progressions et les arrêts. Les poissons ont également emprunté des trajectoires où les vitesses d'écoulement étaient inférieures à la vitesse moyenne d'écoulement de la conduite. Sous des conditions hydrauliques exigeantes, les poissons sont susceptibles d'utiliser une variété de stratégies afin de minimiser les dépenses d'énergie et éviter d'utiliser leur métabolisme anaérobie. L'utilisation de zones aux vitesses d'écoulement inférieures par les salmonidés montre que ces derniers suivent le chemin de moindre résistance, soit celui qui minimise la vitesse d'écoulement rencontrée (McElroy *et al.*, 2012, Lindberg *et al.*, 2016). Ces résultats démontrent que l'utilisation de la vitesse moyenne de l'écoulement de l'eau ne permet pas d'estimer avec précision l'impact d'un ponceau sur le succès de passage. Le développement d'un coefficient de correction basé sur le ratio « vitesse d'écoulement de la trajectoire et vitesse moyenne d'écoulement de l'eau » pourrait permettre de raffiner les modèles existants. Toutefois, il a été démontré que ce ratio change avec les conditions hydrauliques et la performance de nage des poissons. Des études supplémentaires du comportement spatial de différentes espèces de poissons et de caractérisation de vitesses d'écoulement dans différents types de ponceaux sont nécessaires afin de calculer une gamme de ratios à intégrer dans les modèles existants. Il est également impératif de prendre en compte toute la complexité hydraulique spatiale et temporelle des ponceaux lorsque des prévisions sont effectuées, les poissons devant s'adapter à la fois aux conditions hydrauliques et physicochimiques de leur environnement immédiat. Les arbres de classification basés uniquement sur des caractéristiques physiques (variables statiques telles que la pente ou la hauteur de chute) devraient être utilisés pour prédire la perméabilité des ponceaux

à l'échelle de bassins versants de façon à cibler certains secteurs montrant une problématique à l'égard de la libre circulation des poissons. Des études écohydrauliques devraient être envisagées pour évaluer plus précisément le succès de passage des poissons dans les ponceaux dont l'évaluation est incertaine ou dont le remplacement impliquerait des coûts économiques élevés. La complexité hydraulique présente dans les ponceaux rugueux est susceptible de favoriser l'ascension des poissons, contrairement aux écoulements uniformes des ponceaux lisses. Il serait également pertinent d'ajouter des éléments rugueux de différentes tailles dans les ponceaux lisses à des endroits stratégiques qui pourraient servir de refuges hydrauliques aux poissons (Goerig *et al.*, 2016, Rodgers *et al.*, 2017). Ces éléments rugueux pourraient être intégrés dans les ponceaux en remplacement des déflecteurs, et ce, à moindres coûts. Il serait également possible de mouler les ponceaux dont l'emplacement des éléments rugueux est spécifique aux espèces de poissons présentes dans la section de cours d'eau. Dans notre étude, les ombles ont effectué des arrêts à tous les deux mètres, en moyenne, ce qui pourrait constituer une distance optimale entre les éléments rugueux ajoutés. Évidemment, cette distance est susceptible de changer avec l'espèce, la taille des poissons et les caractéristiques du ponceau. Par exemple, des espèces démontrant de plus faibles capacités de nage nécessiteraient probablement des éléments rugueux distribués sur de plus petites distances. Bien que la personnalité des poissons soit connue pour être corrélée au comportement spatial des poissons, ni l'audace ou l'activité n'ont permis d'expliquer les différences observées. Toutefois, cette étude est une des rares à avoir mesuré la personnalité directement dans un milieu naturel. Elle a notamment montré que les mesures d'audace et d'activité chez l'omble de fontaine sont valides et peuvent être utilisées afin d'analyser le comportement spatial ou la performance de nage lors de l'ascension des ponceaux. Le protocole établi dans cette étude et l'utilisation de caméras vidéo pavent la voie à une utilisation innovante de la technologie dans le but de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents de l'écologie spatiale, spécialement dans les petites structures telles que les ponceaux ou les passes migratoires.

## BIBLIOGRAPHIE

- Adriaenssens B & Johnsson JI (2010) Shy trout grow faster: exploring links between personality and fitness-related traits in the wild. *Behavioral Ecology* 22(1):135-143.
- Ali M (1961) Histophysiological studies on the juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) retina: II. Responses to light intensities, wavelengths, temperatures, and continuous light or dark. *Canadian Journal of Zoology* 39(4):511-526.
- Andrén H (1994) Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos* 71(3):355-366.
- Aubin-Horth N, Deschênes M & Cloutier S (2012) Natural variation in the molecular stress network correlates with a behavioural syndrome. *Hormones and behavior* 61(1):140-146.
- Baguette M, Blanchet S, Legrand D, Stevens VM & Turlure C (2012) Individual dispersal, landscape connectivity and ecological networks. *Biological Reviews* 88(2):310-326.
- Barbin Zydlewski G, Haro A, Whalen K & McCormick S (2001) Performance of stationary and portable passive transponder detection systems for monitoring of fish movements. *Journal of Fish Biology* 58(5):1471-1475.
- Bateman DS & Gresswell RE (2006) Survival and growth of age-0 steelhead after surgical implantation of 23-mm passive integrated transponders. *North American Journal of Fisheries Management* 26(3):545-550.
- Behlke CE, Kane DL, McLean RF & Travis MD (1991) *Fundamentals of culvert design for passage of weak-swimming fish*. Alaska Department of Transportation and Public Facilities, 177 p.
- 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.
- Bell AM, Hankison SJ & Laskowski KL (2009) The repeatability of behaviour: a meta-analysis. *Animal Behaviour* 77(4):771-783.
- Bentley KT, Schindler DE, Armstrong JB, Cline TJ & Brooks GT (2015) Inter-tributary movements by resident salmonids across a boreal riverscape. *PLoS ONE* 10(9):e0136985.
- Benton PD, Ensign WE & Freeman BJ (2008) The effect of road crossings on fish movements in small Etowah Basin streams. *Southeastern Naturalist* 7(2):301-310.
- Biro PA & Ridgway MS (2008) Repeatability of foraging tactics in young brook trout, *Salvelinus fontinalis*. *The Canadian field-naturalist* 122(1):40-44.
- Bourne C, Kehler D, Wiersma Y & Cote D (2011) Barriers to fish passage and barriers to fish passage assessments: the impact of assessment methods and assumptions on barrier identification and quantification of watershed connectivity. *Aquatic Ecology* 45(3):389-403.
- Bouska WW & Paukert CP (2010) Road crossing designs and their impact on fish assemblages of Great Plains streams. *Transactions of the American Fisheries Society* 139(1):214-222.
- Bradford MJ & Taylor GC (1997) Individual variation in dispersal behaviour of newly emerged chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) from the Upper Fraser River, British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54(7):1585-1592.

- Brett JR (1971) Energetic responses of salmon to temperature. A study of some thermal relations in the physiology and freshwater ecology of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *American Zoologist* 11(1):99-113.
- Briggs AS & Galarowicz TL (2013) Fish passage through culverts in Central Michigan warmwater streams. *North American Journal of Fisheries Management* 33(3):652-664.
- Brown C, Burgess F & Braithwaite VA (2007) Heritable and experiential effects on boldness in a tropical poeciliid. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 62(2):237-243.
- Brown C, Jones F & Braithwaite V (2005) In situ examination of boldness–shyness traits in the tropical poeciliid, *Brachyrhaphis episcopi*. *Animal Behaviour* 70(5):1003-1009.
- Brown RS, Cooke SJ, Anderson WG & McKinley RS (1999) Evidence to challenge the “2% rule” for biotelemetry. *North American Journal of Fisheries Management* 19(3):867-871.
- Brown RS, Geist DR, Deters KA & Grassell A (2006) Effects of surgically implanted acoustic transmitters > 2% of body mass on the swimming performance, survival and growth of juvenile sockeye and Chinook salmon. *Journal of Fish Biology* 69(6):1626-1638.
- Burford DD, McMahan TE, Cahoon JE & Blank M (2009) Assessment of trout passage through culverts in a large Montana drainage during summer low flow. *North American Journal of Fisheries Management* 29(3):739-752.
- Campbell Grant EH, Lowe WH & Fagan WF (2007) Living in the branches: population dynamics and ecological processes in dendritic networks. *Ecology Letters* 10(2):165-175.
- Carlsson J & Nilsson J (2001) Effects of geomorphological structures on genetic differentiation among brown trout populations in a northern boreal river drainage. *Transactions of the American Fisheries Society* 130(1):36-45.
- Castric V, Bonney F & Bernatchez L (2001) Landscape structure and hierarchical genetic diversity in the brook charr, *Salvelinus fontinalis*. *Evolution* 55(5):1016-1028.
- Castro-Santos T (2006) Modeling the effect of varying swim speeds on fish passage through velocity barriers. *Transactions of the American Fisheries Society* 135(5):1230-1237.
- 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 (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, Sanz-Ronda FJ, Ruiz-Legazpi J & Jonsson B (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.
- Chapman BB, Hulthén K, Blomqvist DR, Hansson LA, Nilsson JÅ, Brodersen J, Anders Nilsson P, Skov C & Brönmark C (2011) To boldly go: individual differences in boldness influence migratory tendency. *Ecology Letters* 14(9):871-876.
- Clark SP, Toews JS & Tkach R (2014) Beyond average velocity: modelling velocity distributions in partially filled culverts to support fish passage guidelines. *International Journal of River Basin Management* 12(2):101-110.
- Coffman JS (2005) *Evaluation of a predictive model for upstream fish passage through culverts*. Master thesis (James Madison University Harrisonburg, Virginia). 104 p

- Collinge SK (1996) Ecological consequences of habitat fragmentation: implications for landscape architecture and planning. *Landscape and Urban Planning* 36(1):59-77.
- Conrad JL, Weinersmith KL, Brodin T, Saltz JB & Sih A (2011) Behavioural syndromes in fishes: a review with implications for ecology and fisheries management. *Journal of Fish Biology* 78(2):395-435.
- Constantin PM & Bergeron NE (2015) *Inventaire de ponceaux dans les bassins versants des rivières Matapédia et Patapédia - Document synthèse*. Institut national de la recherche scientifique, 10 p.
- Cote D, Kehler DG, Bourne C & Wiersma YF (2009) A new measure of longitudinal connectivity for stream networks. *Landscape Ecology* 24(1):101-113.
- Cote J, Fogarty S, Brodin T, Weinersmith K & Sih A (2011) Personality-dependent dispersal in the invasive mosquitofish: group composition matters. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 278(1712):1670-1678.
- Cote J, Fogarty S, Weinersmith K, Brodin T & Sih A (2010) Personality traits and dispersal tendency in the invasive mosquitofish (*Gambusia affinis*). *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 277(1687):1571-1579.
- Dall SR, Houston AI & McNamara JM (2004) The behavioural ecology of personality: consistent individual differences from an adaptive perspective. *Ecology Letters* 7(8):734-739.
- Davis J & Barmuta L (1989) An ecologically useful classification of mean and near-bed flows in streams and rivers. *Freshwater Biology* 21(2):271-282.
- Davis JC & Davis GA (2011) The influence of stream-crossing structures on the distribution of rearing juvenile Pacific salmon. *Journal of the North American Benthological Society* 30(4):1117-1128.
- Debinski DM & Holt RD (2000) A Survey and Overview of Habitat Fragmentation Experiments. *Conservation Biology* 14(2):342-355.
- Diebel MW, Fedora M, Cogswell S & O'Hanley JR (2014) Effects of road crossings on habitat connectivity for stream-resident fish. *River Research and Applications* 31(10):1251-1261.
- Dixo M, Metzger JP, Morgante JS & Zamudio KR (2009) Habitat fragmentation reduces genetic diversity and connectivity among toad populations in the Brazilian Atlantic Coastal Forest. *Biological Conservation* 142(8):1560-1569.
- Dubé M, Delisle S, Lachance S & Dostie R (2006) *L'impact de ponceaux aménagés en milieu forestier sur l'habitat de l'omble de fontaine*. Ministère des ressources naturelles et de la faune, Direction de l'environnement forestier, Direction de l'aménagement de la faune de la Mauricie et du Centre-du-Québec, 62 p.
- Dugdale SJ, Franssen J, Corey E, Bergeron NE, Lapointe M & Cunjak RA (2015) Main stem movement of Atlantic salmon parr in response to high river temperature. *Ecology of Freshwater Fish* 10.1111/eff.12224:n/a-n/a.
- Dzieweczynski TL & Crovo JA (2011) Shyness and boldness differences across contexts in juvenile three-spined stickleback *Gasterosteus aculeatus* from an anadromous population. *Journal of Fish Biology* 79(3):776-788.
- Ead S, Rajaratnam N, Katopodis C & Ade F (2000) Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts. *Journal of Hydraulic Engineering* 126(10):750-757.

- EcoTec (2014) *L'industrie faunique comme moteur économique régional*. Pour le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 71 p.
- Edelsparre AH, McLaughlin RL & Rodríguez MA (2013) Risk taking not foraging behavior predicts dispersal of recently emerged stream brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Ecosphere* 4(6):art73.
- 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.
- Erkinaro J, Erkinaro H & Niemelä E (2017) Road culvert restoration expands the habitat connectivity and production area of juvenile Atlantic salmon in a large subarctic river system. *Fisheries Management and Ecology* 24(1):73-81.
- Fagan WF (2002) Connectivity, fragmentation, and extinction risk in dendritic metapopulations. *Ecology* 83(12):3243-3249.
- Fahrig L (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*:487-515.
- Farwell M & McLaughlin RL (2009) Alternative foraging tactics and risk taking in brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Behavioral Ecology* 20(5):913-921.
- Fausch KD, Torgersen CE, Baxter CV & Li HW (2002) Landscapes to riverscapes: bridging the gap between research and conservation of stream fishes. *BioScience* 52(6):483-498.
- Fraser DF, Gilliam JF, Daley MJ, Le AN & Skalski GT (2001) Explaining leptokurtic movement distributions: intrapopulation variation in boldness and exploration. *The American Naturalist* 158(2):124-135.
- Fullerton AH, Burnett KM, Steel EA, Flitcroft RL, Pess GR, Feist BE, Torgersen CE, Miller DJ & Sanderson BL (2010) Hydrological connectivity for riverine fish: measurement challenges and research opportunities. *Freshwater Biology* 55(11):2215-2237.
- Furniss M, Love M, Firor S, Moynan K, Llanos A, Guntle J & Gubernick R (2008) FishXing, Version 3.0. US Forest Service, San Dimas Technology and Development Center, San Dimas, CA. Also available at [www.stream.fs.fed.us/fishxing](http://www.stream.fs.fed.us/fishxing).
- Gibson RJ, Haedrich RL & Wernerheim CM (2005) Loss of Fish Habitat as a Consequence of Inappropriately Constructed Stream Crossings. *Fisheries* 30(1):10-17.
- Goerig E, 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):1-9.
- Goerig E, Castro-Santos T & Bergeron NE (2016) Brook trout passage performance through culverts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 73(1):1-11.
- Gordon ND, McMahon TA, Finlayson BL, Gippel CJ & Nathan RJ (2004) *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*. Wiley. 444 p
- Gosling SD (2001) From mice to men: what can we learn about personality from animal research? *Psychological Bulletin* 127(1):45.
- Gowan C & Fausch KD (1996) Mobile brook trout in two high-elevation Colorado streams: reevaluating the concept of restricted movement. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53(6):1370-1381.

- Höjesjö J, Adriaenssens B, Bohlin T, Jönsson C, Hellström I & Johnsson JI (2011) Behavioural syndromes in juvenile brown trout (*Salmo trutta*); life history, family variation and performance in the wild. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 65(9):1801-1810.
- Hunt M, Clark S & Tkach R (2012) Velocity distributions near the inlet of corrugated steel pipe culverts. *Canadian Journal of Civil Engineering* 39(12):1243-1251.
- 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.
- Kahler TH, Roni P & Quinn TP (2001) Summer movement and growth of juvenile anadromous salmonids in small western Washington streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58(10):1947-1956.
- Kanno Y, Letcher BH, Coombs JA, Nislow KH & Whiteley AR (2014) Linking movement and reproductive history of brook trout to assess habitat connectivity in a heterogeneous stream network. *Freshwater Biology* 59(1):142-154.
- Keller I, Nentwig W & Largiader CR (2004) Recent habitat fragmentation due to roads can lead to significant genetic differentiation in an abundant flightless ground beetle. *Molecular ecology* 13(10):2983-2994.
- 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.
- Kemp PS, Worthington TA, Langford TEL, Tree ARJ & Gaywood MJ (2012) Qualitative and quantitative effects of reintroduced beavers on stream fish. *Fish and Fisheries* 13(2):158-181.
- 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.
- Lapointe NW, Cooke SJ, Imhof JG, Boisclair D, Casselman JM, Curry RA, Langer OE, McLaughlin RL, Minns CK & Post JR (2013) Principles for ensuring healthy and productive freshwater ecosystems that support sustainable fisheries. *Environmental Reviews* 22(2):110-134.
- Larsen MH, Thorn AN, Skov C & Aarestrup K (2013) Effects of passive integrated transponder tags on survival and growth of juvenile Atlantic salmon *Salmo salar*. *Animal Biotelemetry* 1(1):1-8.
- Le Pichon C, Gorges G, Baudry J, Goreaud F & Boët P (2009) Spatial metrics and methods for riverscapes: quantifying variability in riverine fish habitat patterns. *Environmetrics* 20(5):512-526.
- Le Pichon C, Tales É, Gorges G, Baudry J & Boët P (2016) Using a continuous riverscape survey to examine the effects of the spatial structure of functional habitats on fish distribution. *Journal of Freshwater Ecology* 31(1):1-19.
- Lessells C & Boag PT (1987) Unrepeatable repeatabilities: a common mistake. *The Auk*:116-121.
- Letcher BH, Nislow KH, Coombs JA, O'Donnell MJ & Dubreuil TL (2007) Population response to habitat fragmentation in a stream-dwelling brook trout population. *PLoS One* 2(11):e1139.
- Liao JC, Beal DN, Lauder GV & Triantafyllou MS (2003) Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science* 302(5650):1566-1569.

- Lindberg DE, Leonardsson K & Lundqvist H (2016) Path selection of Atlantic salmon (*Salmo salar*) migrating through a fishway. *River Research and Applications* 32(4):795-803.
- Love M & Taylor RN (2003) California salmonid stream habitat restoration Manual—Part IX Fish Passage Evaluation at Stream Crossings. *California Department of Fish and Game, Sacramento, CA*.
- 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 (2013) 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.
- Mazué GPF, Dechaume-Moncharmont F-X & Godin J-GJ (2015) Boldness—exploration behavioral syndrome: interfamily variability and repeatability of personality traits in the young of the convict cichlid (*Amatitlania siquia*). *Behavioral Ecology* 26(3):900-908.
- McCormick SD, Hansen LP, Quinn TP & Saunders RL (1998) Movement, migration, and smolting of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(S1):77-92.
- McDonald D, Keeler R & McFarlane W (2007) The relationships among sprint performance, voluntary swimming activity, and social dominance in juvenile rainbow trout. *Physiological and Biochemical Zoology* 80(6):619-634.
- McElroy B, DeLonay A & Jacobson R (2012) Optimum swimming pathways of fish spawning migrations in rivers. *Ecology* 93(1):29-34.
- Meixler MS, Bain MB & Todd Walter M (2009) Predicting barrier passage and habitat suitability for migratory fish species. *Ecological Modelling* 220(20):2782-2791.
- Morita K & Yamamoto S (2002) Effects of habitat fragmentation by damming on the persistence of stream-dwelling charr populations. *Conservation Biology* 16(5):1318-1323.
- Morrison RR, Hotchkiss RH, Stone M, Thurman D & Horner-Devine AR (2009) Turbulence characteristics of flow in a spiral corrugated culvert fitted with baffles and implications for fish passage. *Ecological Engineering* 35(3):381-392.
- Morrissey MB & Ferguson MM (2011) Individual variation in movement throughout the life cycle of a stream-dwelling salmonid fish. *Molecular ecology* 20(2):235-248.
- Nakagawa S & Schielzeth H (2010) Repeatability for Gaussian and non-Gaussian data: a practical guide for biologists. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 85(4):935-956.
- Neary VS (2012) Binary fish passage models for uniform and nonuniform flows. *River Research and Applications* 28(4):418-428.
- Newbold LR & Kemp PS (2015) Influence of corrugated boundary hydrodynamics on the swimming performance and behaviour of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*). *Ecological Engineering* 82:112-120.
- Newbold LR, Shi X, Hou Y, Han D & Kemp PS (2016) Swimming performance and behaviour of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*): Application to fish passage and exclusion criteria. *Ecological Engineering* 95:690-698.



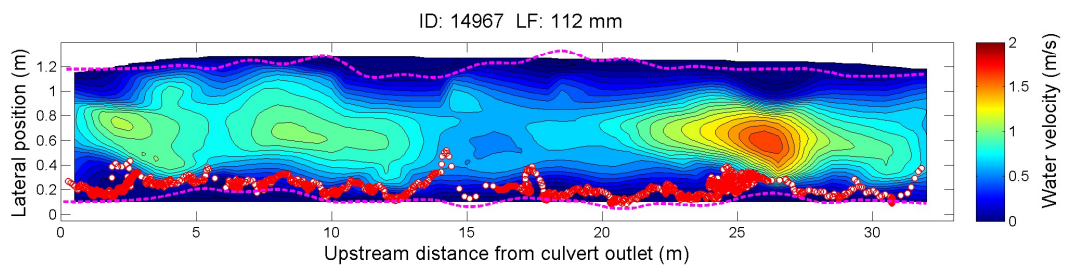
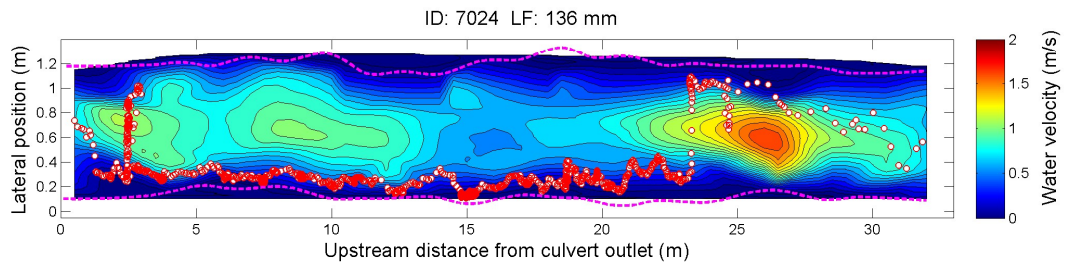
- Newby NC, Binder TR & Stevens ED (2007) Passive integrated transponder (PIT) tagging did not negatively affect the short-term feeding behavior or swimming performance of juvenile rainbow trout. *Transactions of the American Fisheries Society* 136(2):341-345.
- Nislow KH, Hudy M, Letcher BH & Smith 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.
- Ombredane D, Bagliniere JL & Marchand F (1998) The effects of passive integrated transponder tags on survival and growth of juvenile brown trout (*Salmo trutta* L.) and their use for studying movement in a small river. *Advances in Invertebrates and Fish Telemetry*, Springer. p 99-106.
- OQLF (2013) *Ponceau*. [http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8356222](http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8356222) (Consulté le 2017-08-19)
- Park D, Sullivan M, Bayne E & Scrimgeour G (2008) Landscape-level stream fragmentation caused by hanging culverts along roads in Alberta's boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* 38(3):566-575.
- Peake S (2004) An evaluation of the use of critical swimming speed for determination of culvert water velocity criteria for smallmouth bass. *Transactions of the American Fisheries Society* 133(6):1472-1479.
- Peake S, McKinley RS & Scruton D (1997) Swimming performance of various freshwater Newfoundland salmonids relative to habitat selection and fishway design. *Journal of Fish Biology* 51(4):710-723.
- Peake SJ & Farrell AP (2006) Fatigue is a behavioural response in respirometer-confined smallmouth bass. *Journal of Fish Biology* 68(6):1742-1755.
- Pépin 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.
- Perry RW, Plumb JM, Fielding SD, Adams NS & Rondorf DW (2013) Comparing effects of transmitters within and among populations: application to swimming performance of juvenile Chinook salmon. *Transactions of the American Fisheries Society* 142(4):901-911.
- 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, Hansbarger JL, Huntsman BM & Mazik PM (2012) Brook trout movement in response to temperature, flow, and thermal refugia within a complex Appalachian riverscape. *Transactions of the American Fisheries Society* 141(4):1060-1073.
- 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.
- Pinfold G (2011) *Economic value of wild Atlantic salmon*. Atlantic Salmon Federation, Canada, 70 p.
- 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.
- Portz DE, Woodley CM & Cech Jr JJ (2006) Stress-associated impacts of short-term holding on fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 16(2):125-170.

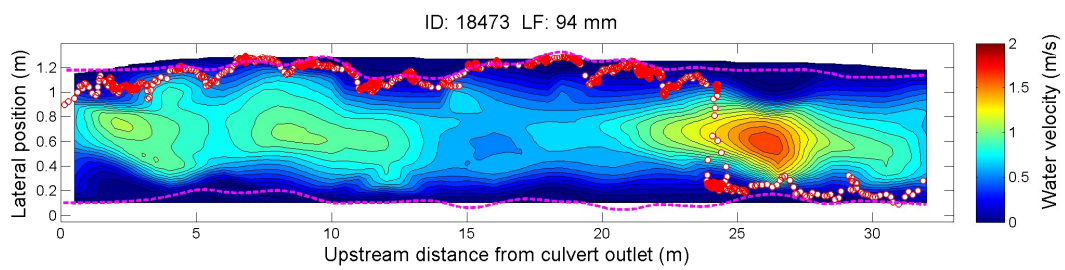
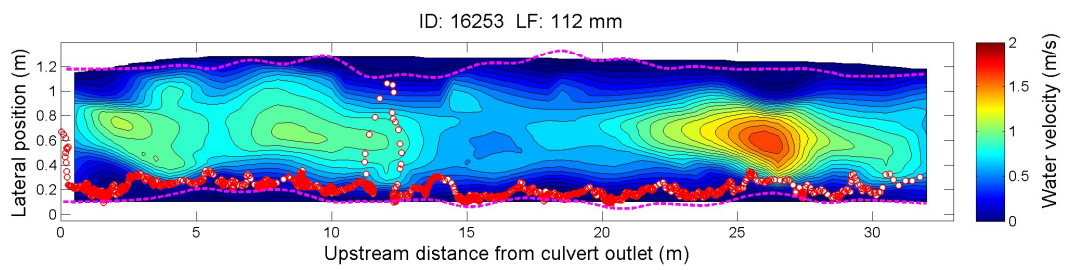
- Powers PD & Bates K (1997) *Culvert hydraulics related to upstream juvenile salmon passage*. Washington Department of Fish and Wildlife, Land and Restoration Services Program, Environmental Engineering Services, 20 p.
- Price DM, Quinn T & Barnard RJ (2010) Fish passage effectiveness of recently constructed road crossing culverts in the Puget Sound region of Washington State. *North American Journal of Fisheries Management* 30(5):1110-1125.
- Rasmussen JE & Belk MC (2012) Dispersal behavior correlates with personality of a North American fish. *Current Zoology* 58(2):260-270.
- Réale D, Garant D, Humphries MM, Bergeron P, Careau V & Montiglio P-O (2010) Personality and the emergence of the pace-of-life syndrome concept at the population level. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365(1560):4051-4063.
- Reale D, Reader SM, Sol D, McDougall PT & Dingemanse NJ (2007) Integrating animal temperament within ecology and evolution. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 82(2):291-318.
- Richard A, O'Rourke J, Caudron A & Cattaneo F (2013) Effects of passive integrated transponder tagging methods on survival, tag retention and growth of age-0 brown trout. *Fisheries Research* 145(Supplement C):37-42.
- 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.
- Rodgers EM, Heaslip BM, Cramp RL, Riches M, Gordos MA & Franklin CE (2017) Substrate roughening improves swimming performance in two small-bodied riverine fishes: implications for culvert remediation and design. *Conservation Physiology* 5(1):1-10.
- Roy ML, Roy AG, Grant JWA, Bergeron NE & Fleming I (2013) Individual variability in the movement behaviour of juvenile Atlantic salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 70(2):339-347.
- Schlosser IJ (1991) Stream Fish Ecology: A Landscape Perspective. *BioScience* 41(10):704-712.
- Sigourney DB, Horton GE, Dubreuil TL, Varaday AM & Letcher BH (2005) Electroshocking and PIT tagging of juvenile Atlantic salmon: are there interactive effects on growth and survival? *North American Journal of Fisheries Management* 25(3):1016-1021.
- 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.
- Tang M & Boisclair D (1995) Relationship between respiration rate of juvenile brook trout (*Salvelinus fontinalis*), water temperature, and swimming characteristics. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52(10):2138-2145.
- Taylor MK & Cooke SJ (2014) Repeatability of movement behaviour in a wild salmonid revealed by telemetry. *Journal of Fish Biology* 84(4):1240-1246.
- Toms CN, Echevarria DJ & Jouandot DJ (2010) A methodological review of personality-related studies in fish: focus on the shy-bold axis of behavior. *International Journal of Comparative Psychology* 23(1):1-25.

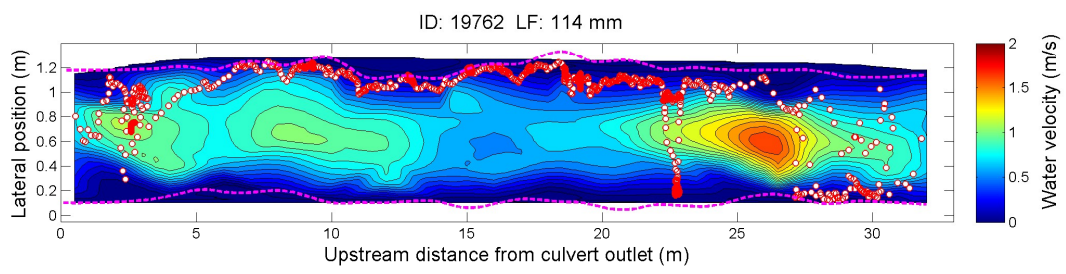
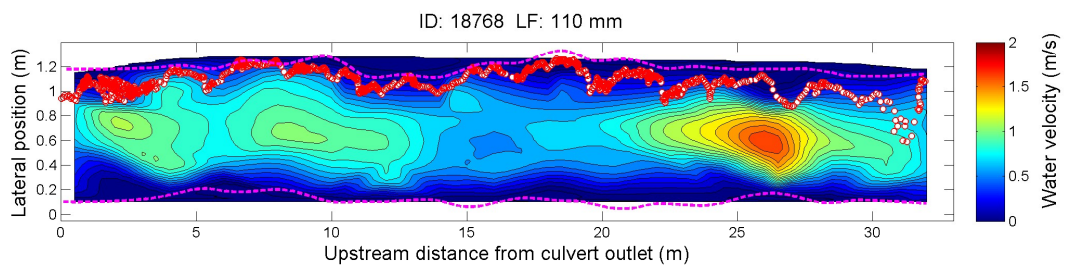
- Torterotot J-B, Perrier C, Bergeron NE & Bernatchez L (2014) Influence of forest road culverts and waterfalls on the fine-scale distribution of brook trout genetic diversity in a boreal watershed. *Transactions of the American Fisheries Society* 143(6):1577-1591.
- Tritico H & Cotel A (2010) The effects 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, O'Keefe R & Benfey T (2010a) Flume length and post-exercise impingement affect anaerobic metabolism in brook charr *Salvelinus fontinalis*. *Journal of Fish Biology* 76(3):729-733.
- Tudorache C, O'Keefe RA & Benfey TJ (2010b) The effect of temperature and ammonia exposure on swimming performance of brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 156(4):523-528.
- 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.
- Wadham-Gagnon B & Castilloux M (2010) *Suivi télémétrique de saumons atlantiques (Salmo salar) dans l'estuaire et l'embâcle de la rivière St-Jean (Gaspésie, Québec, Canada)*.n.d. p.
- Warren JML & Pardew MG (1998) Road crossings as barriers to small-stream fish movement. *Transactions of the American Fisheries Society* 127(4):637-644.
- Wilcove DS, McLellan CH & Dobson AP (1986) Habitat fragmentation in the temperate zone. *Conservation Biology* 6:237-256.
- Wilson ADM & Godin JGJ (2009a) Boldness and behavioral syndromes in the bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*. *Behavioral Ecology* 20(2):231-237.
- Wilson ADM & Godin JGJ (2009b) Boldness and intermittent locomotion in the bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*. *Behavioral Ecology* 21(1):57-62.
- Wofford JE, Gresswell RE & Banks MA (2005) Influence of barriers to movement on within-watershed genetic variation of coastal cutthroat trout. *Ecological Applications* 15(2):628-637.
- Závorka L, Aldvén D, Näslund J, Höjesjö J & Johnsson JI (2015) Linking lab activity with growth and movement in the wild: explaining pace-of-life in a trout stream. *Behavioral Ecology* 26(3):877-884.

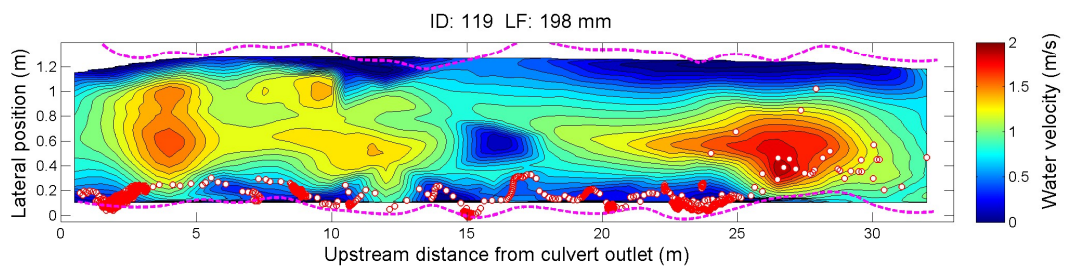
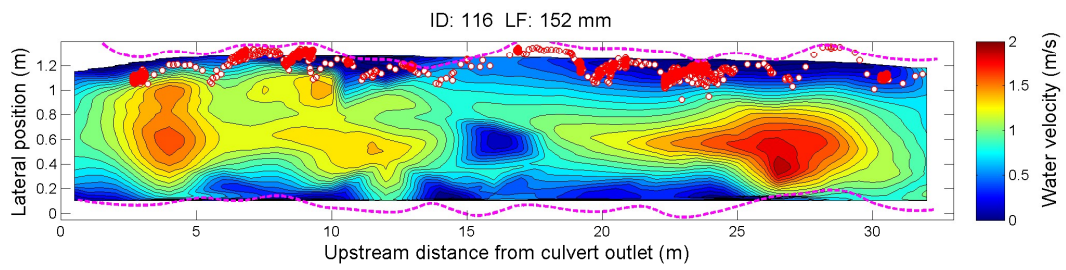
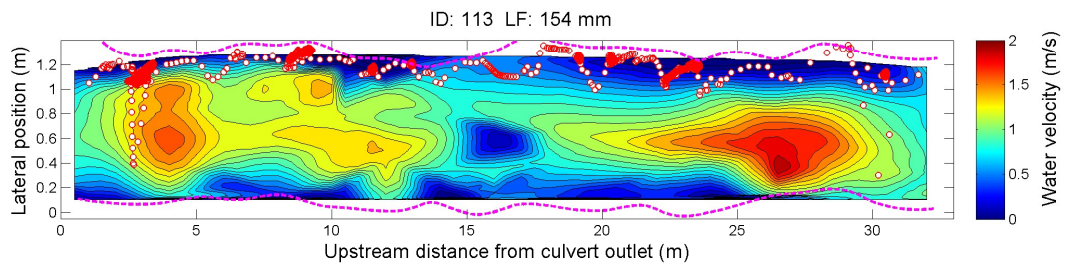
# ANNEXES

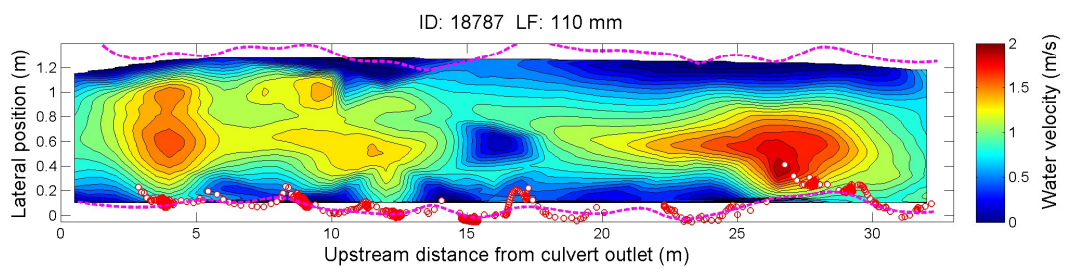
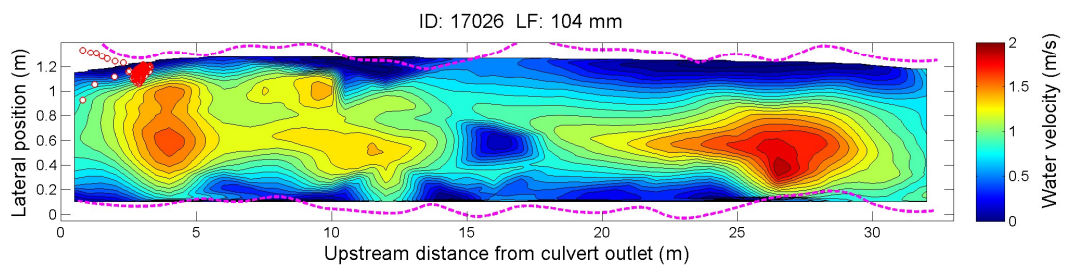
## Annexe I – Trajectoires individuelles des poissons



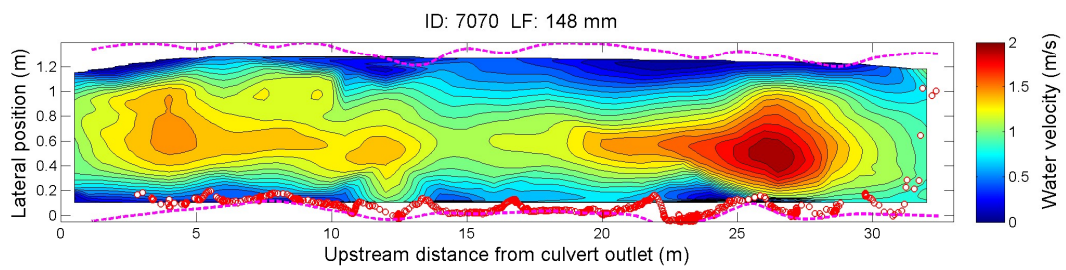
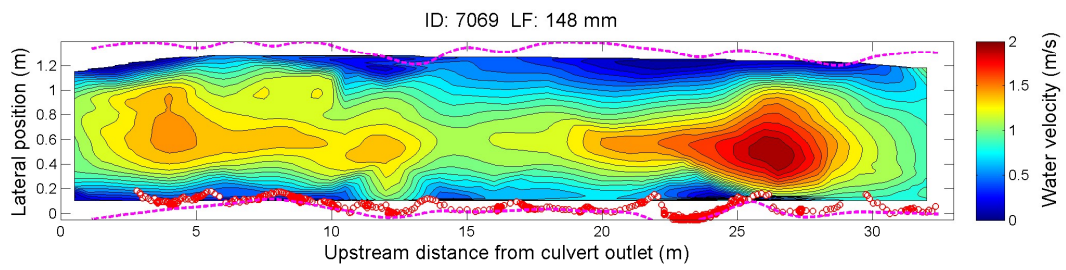
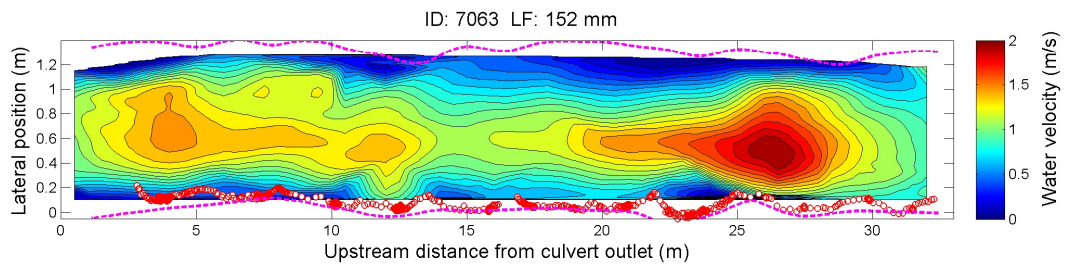


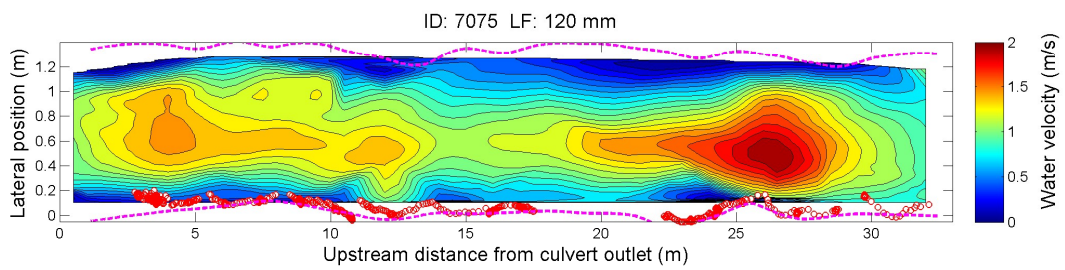
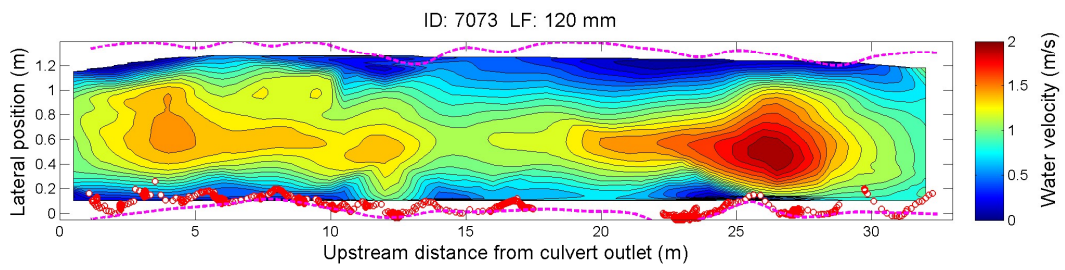
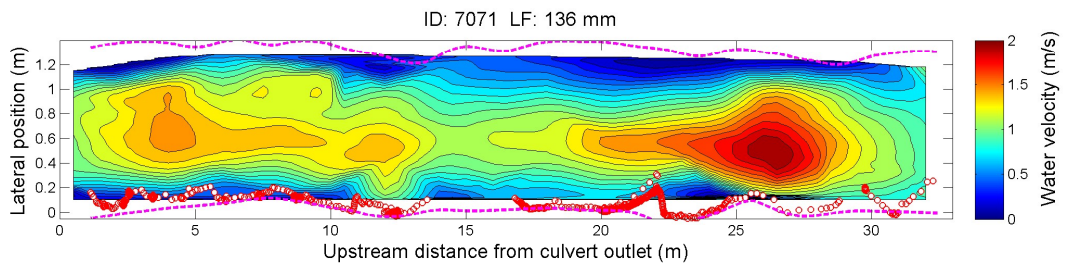


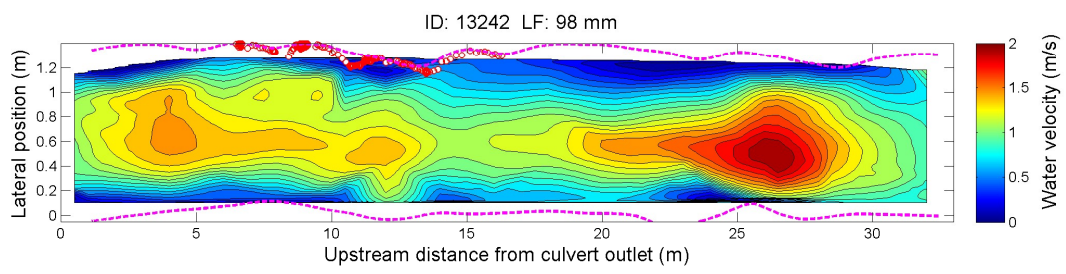
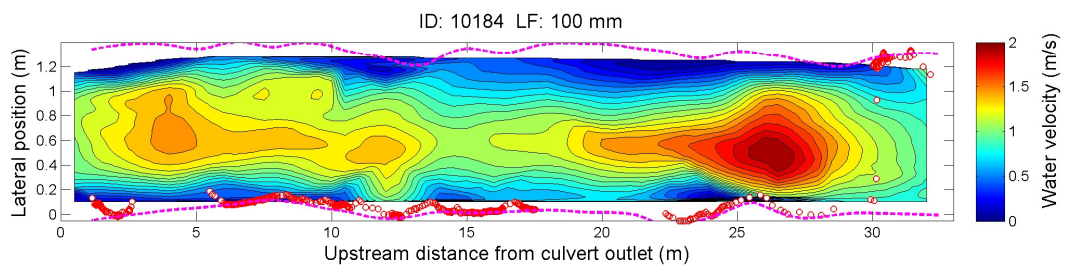


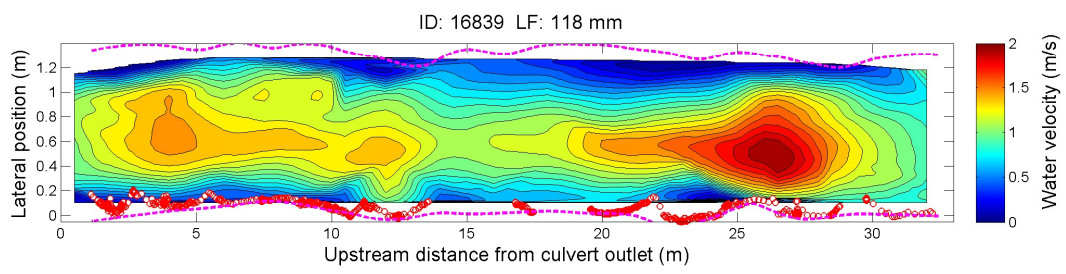
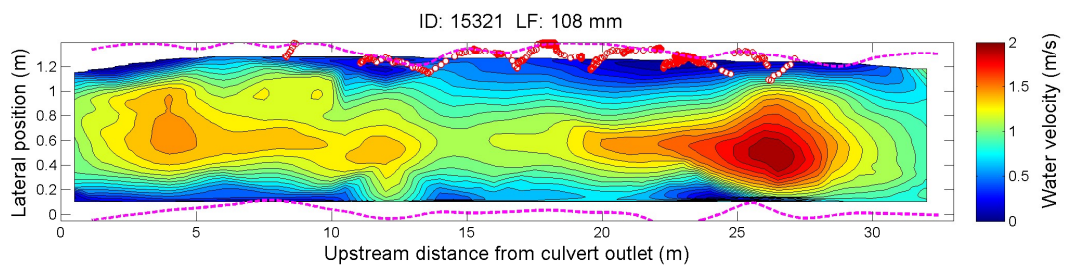




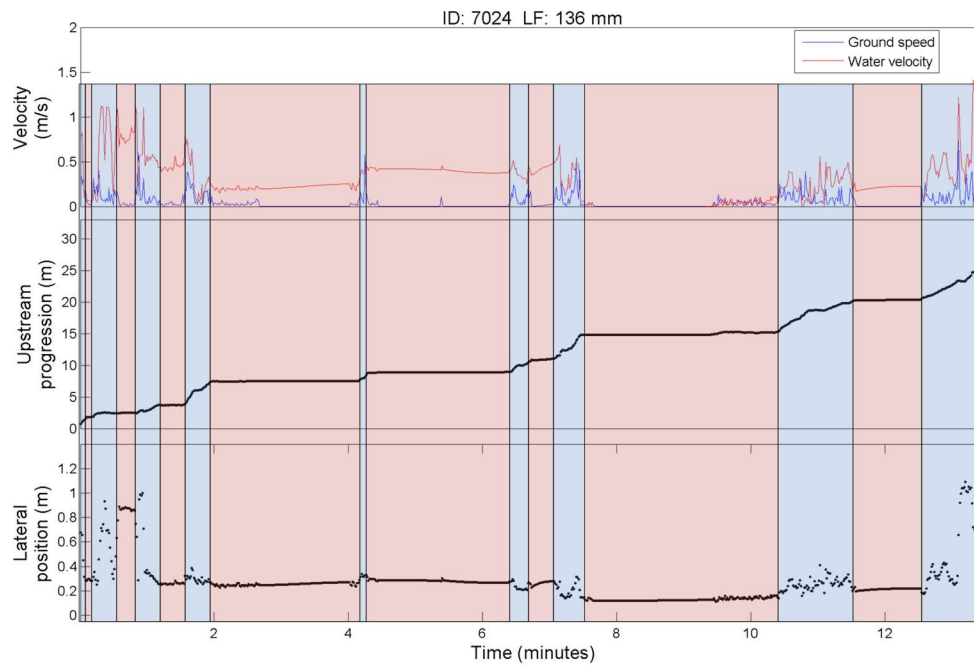
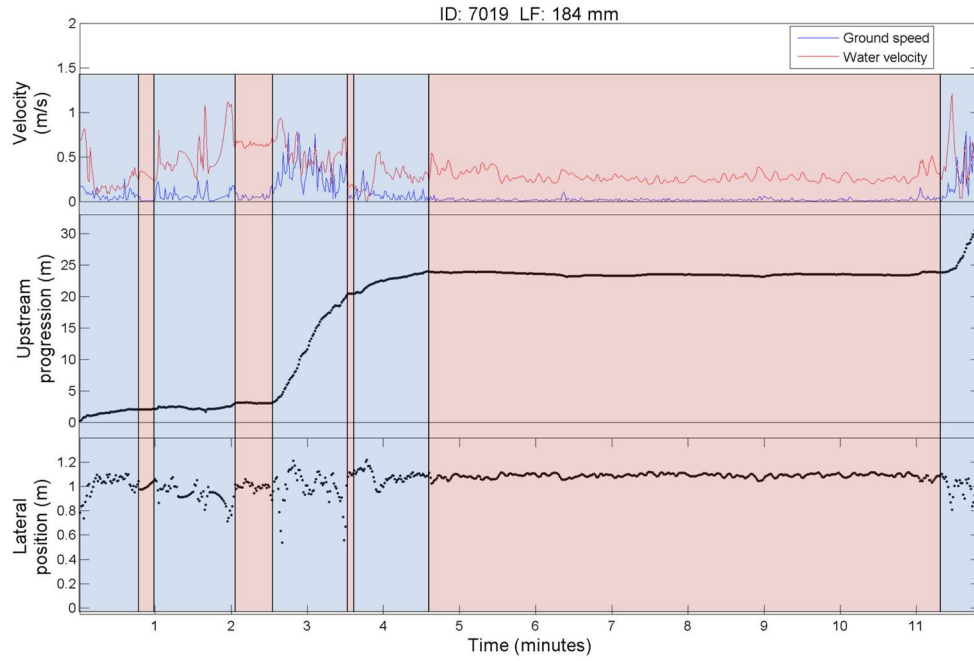


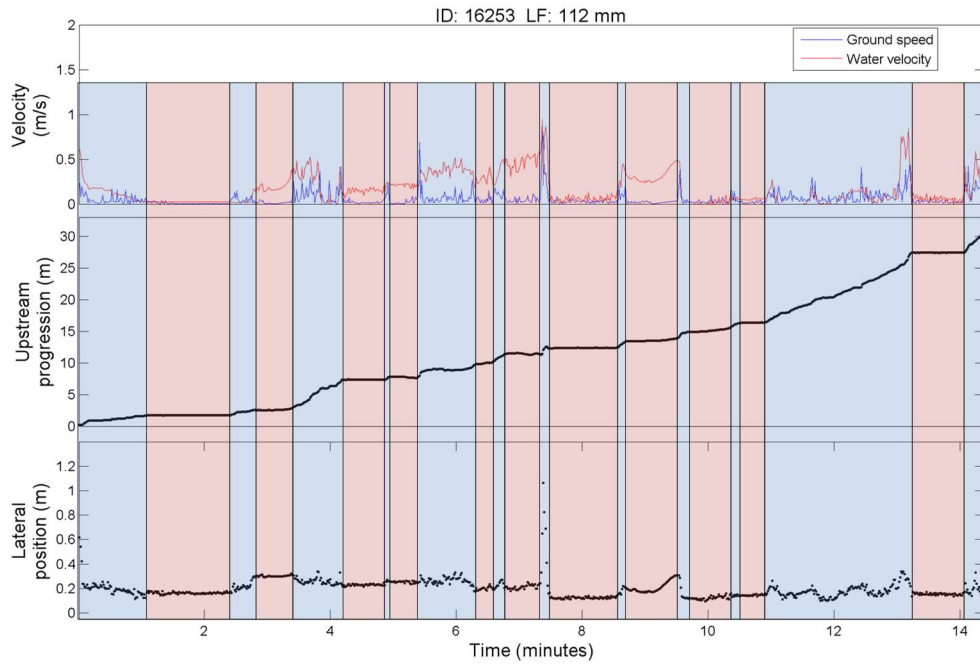
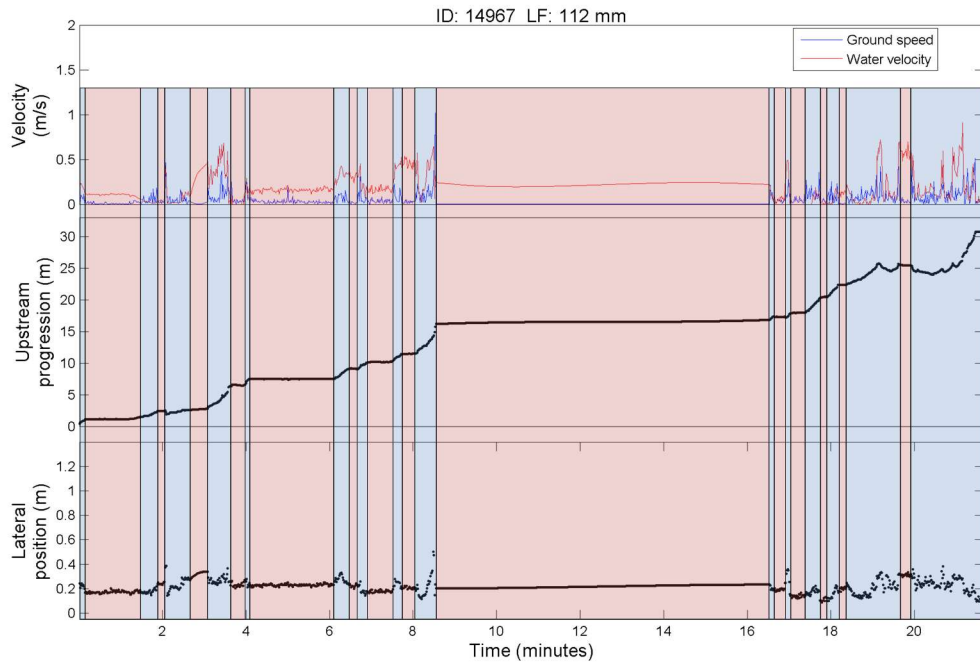


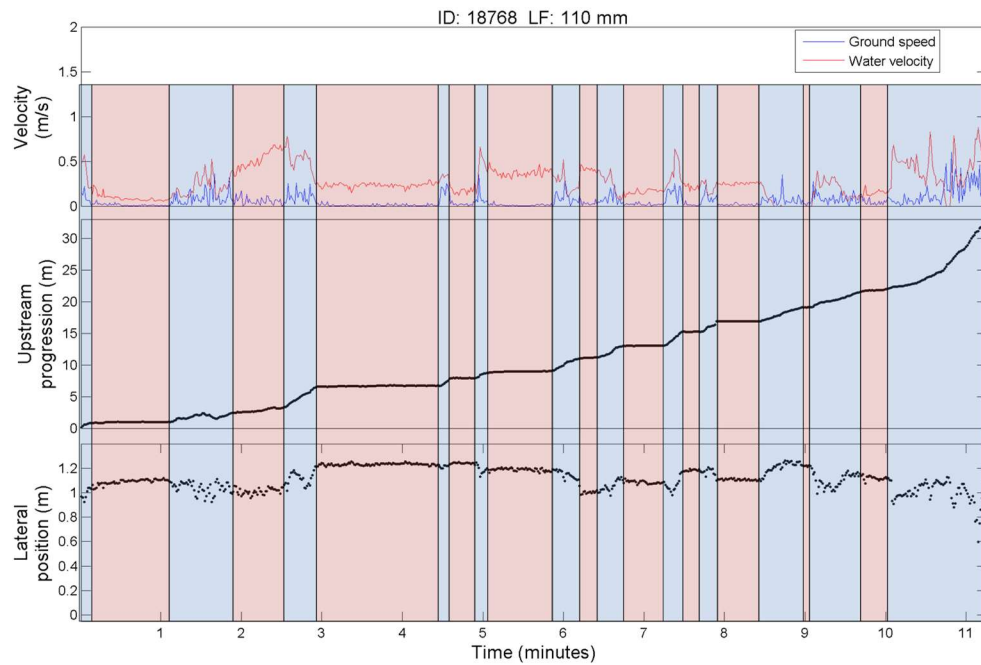
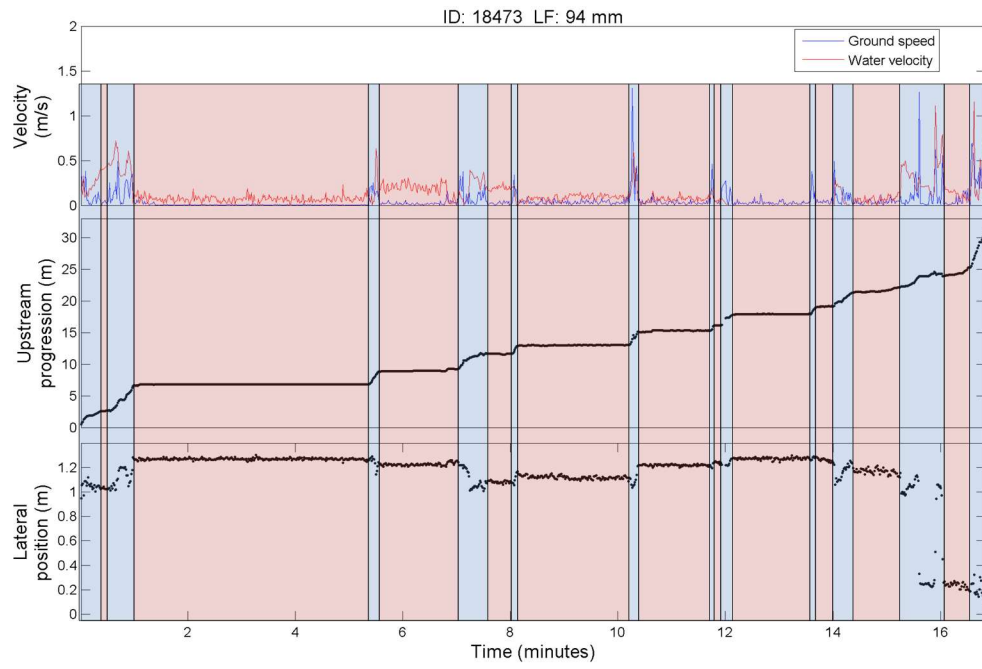


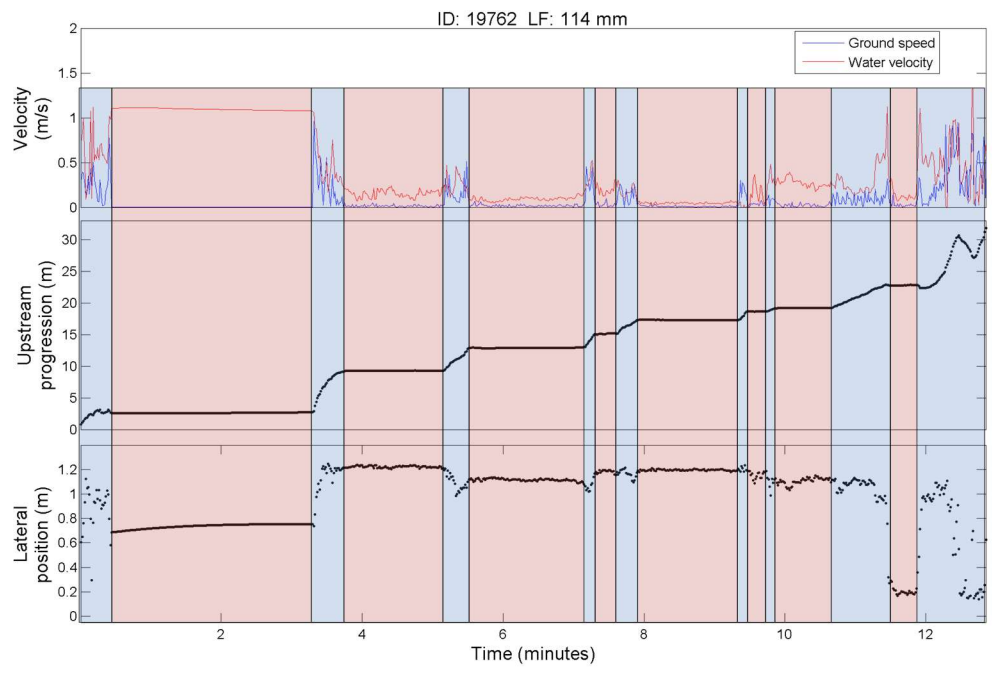


## Annexe II – Trajectoires individuelles décomposées des poissons

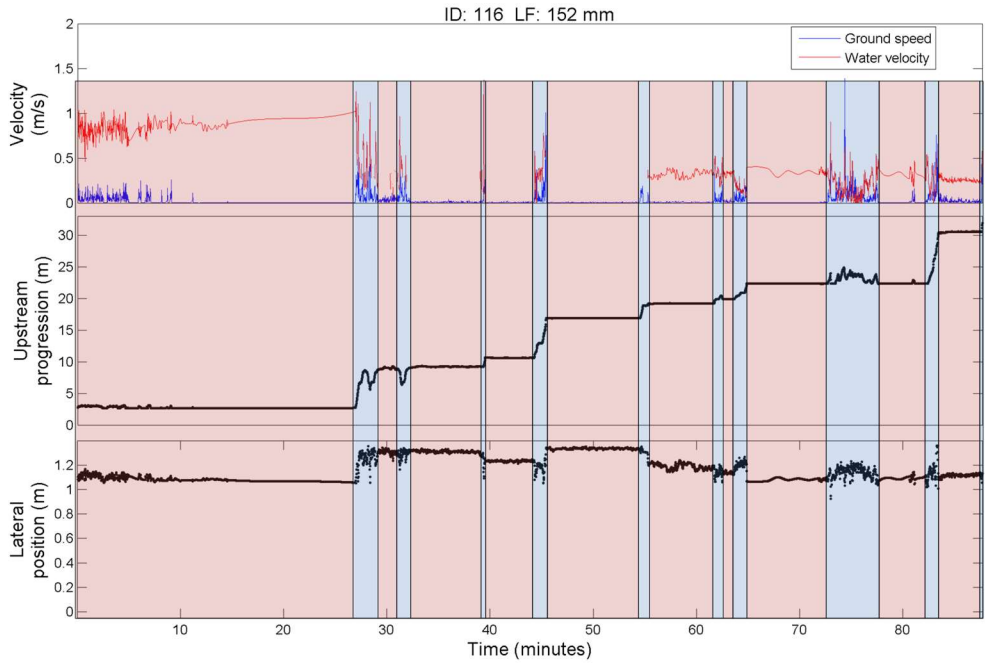
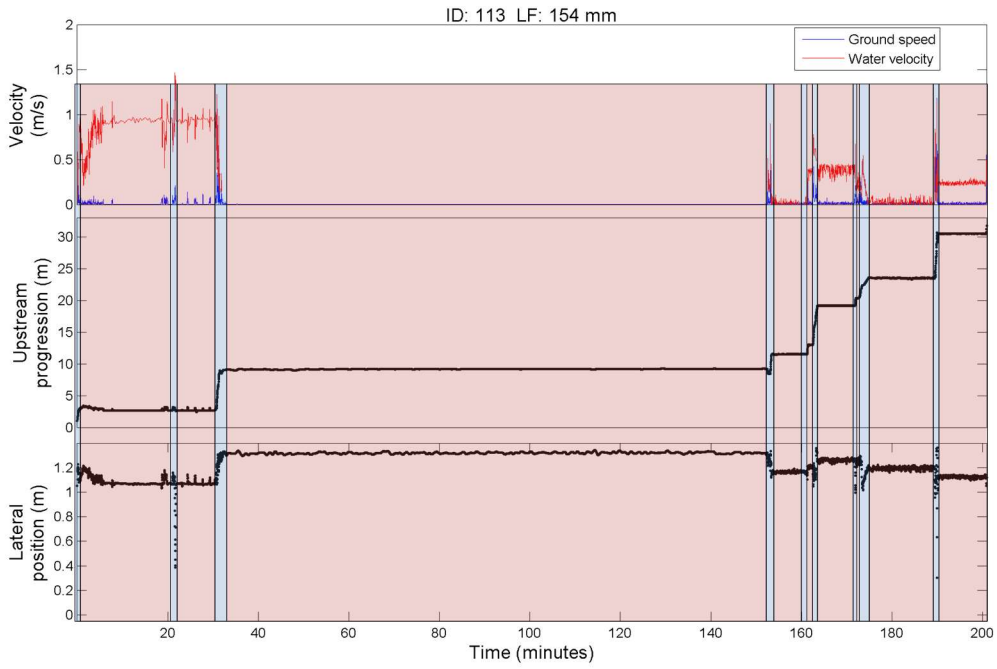


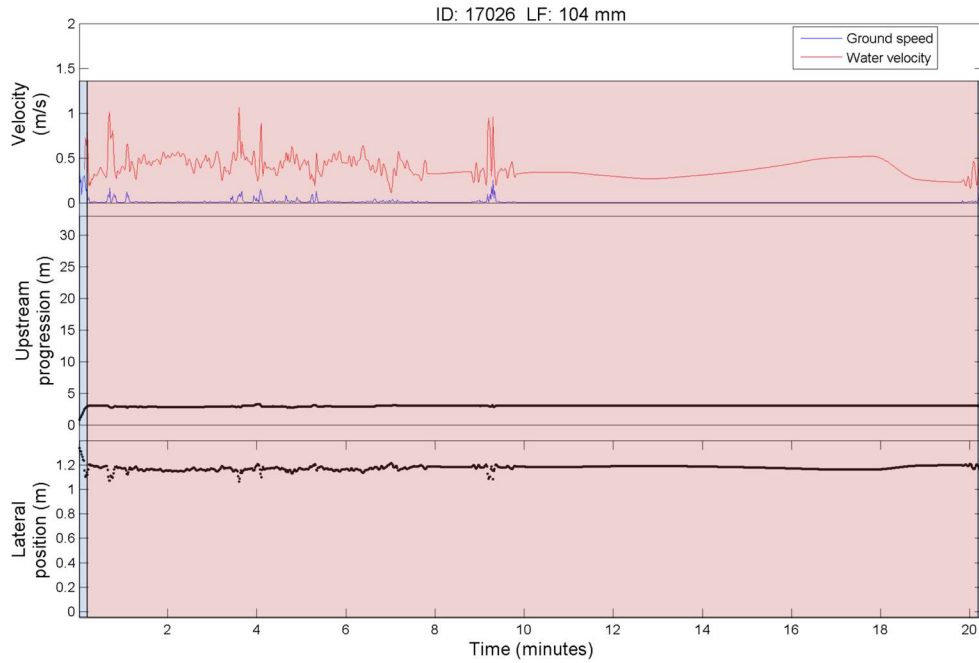
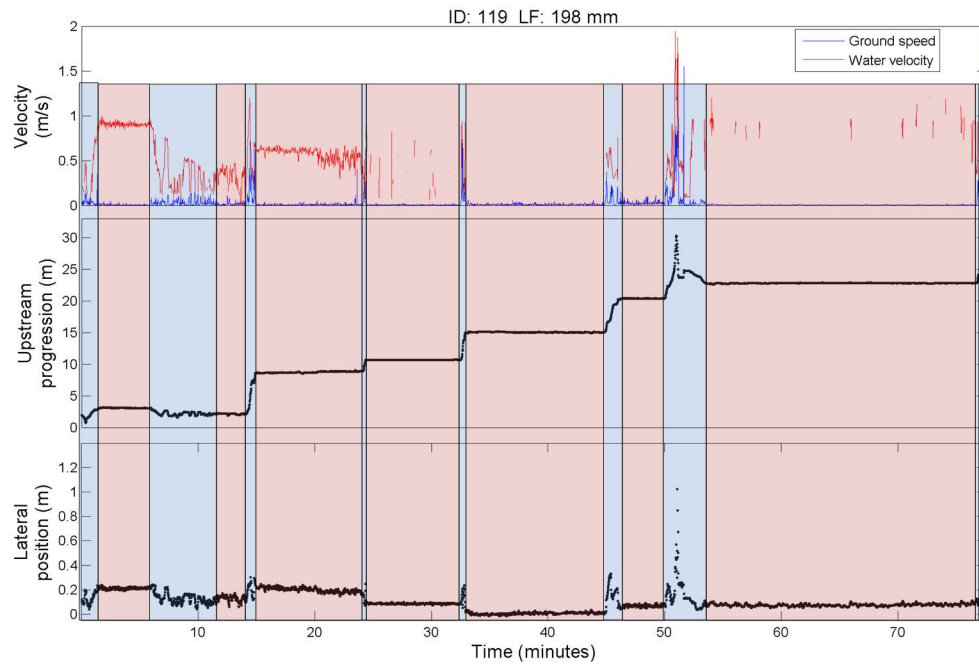




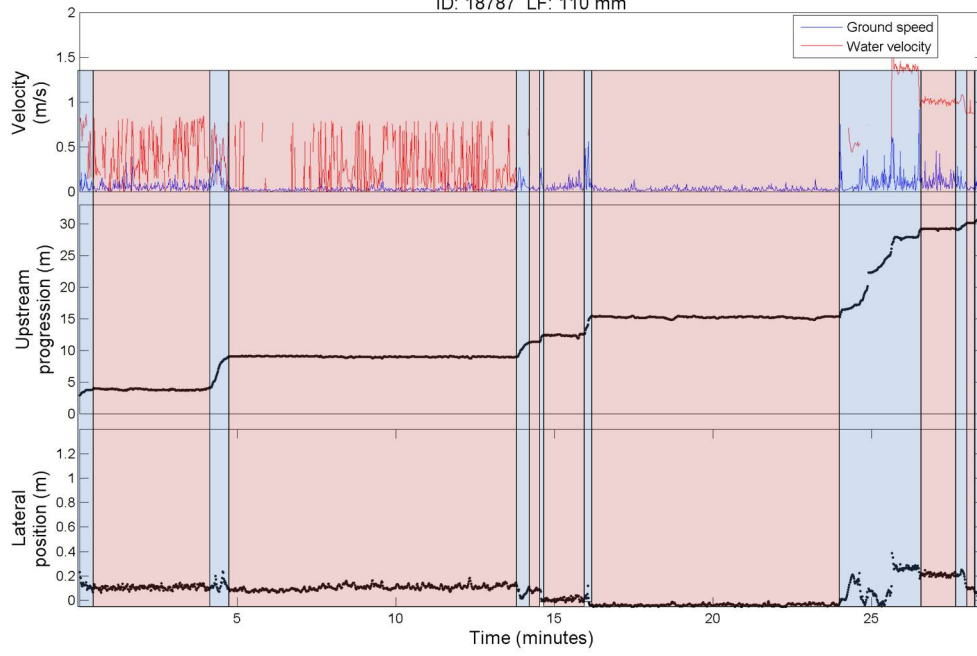


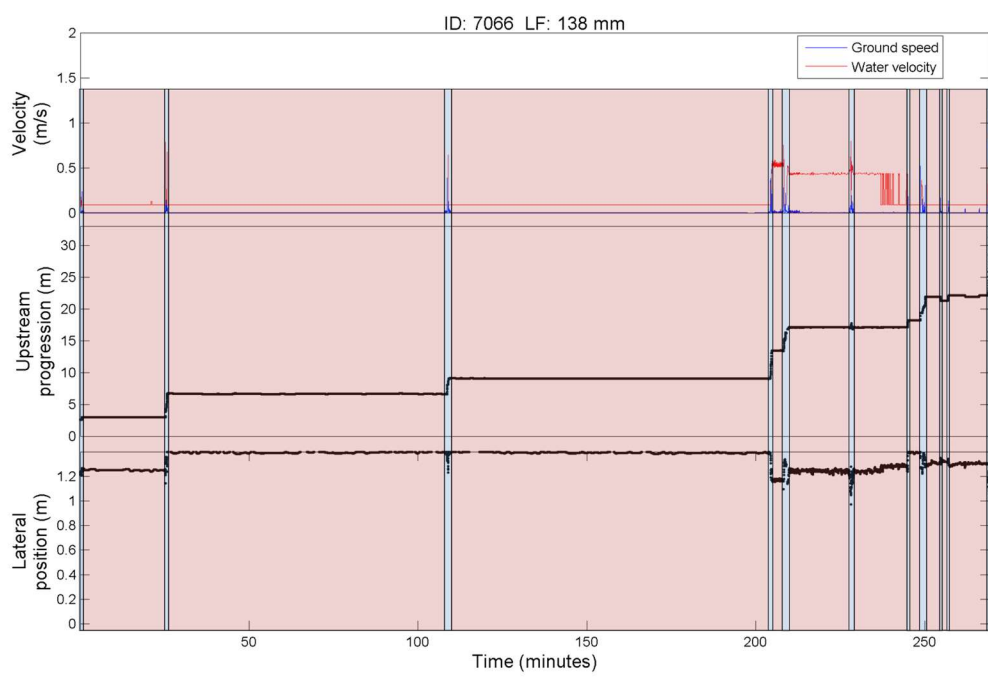
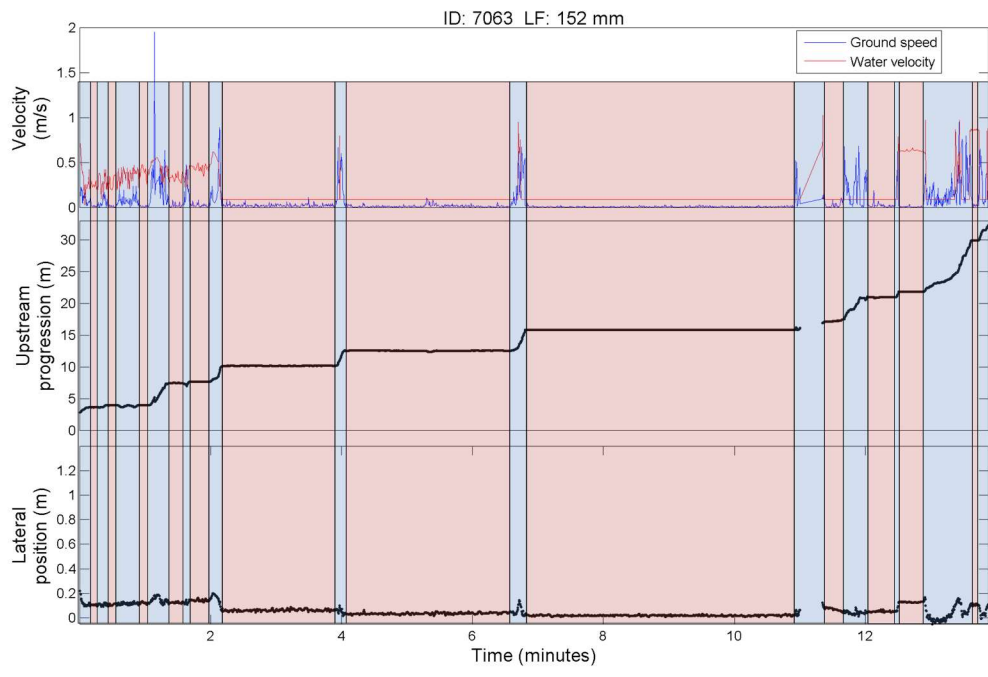


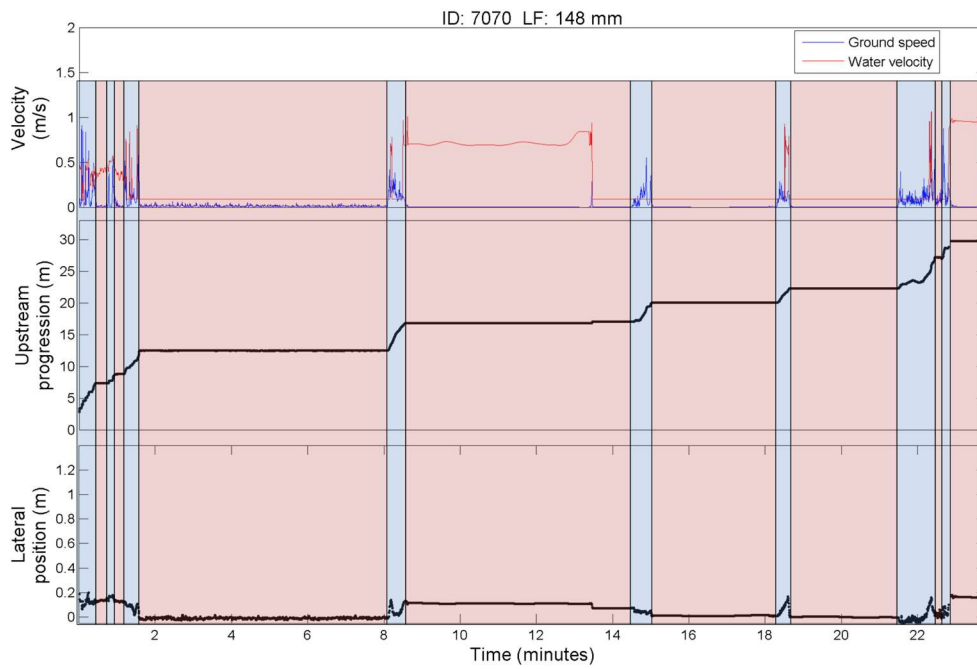
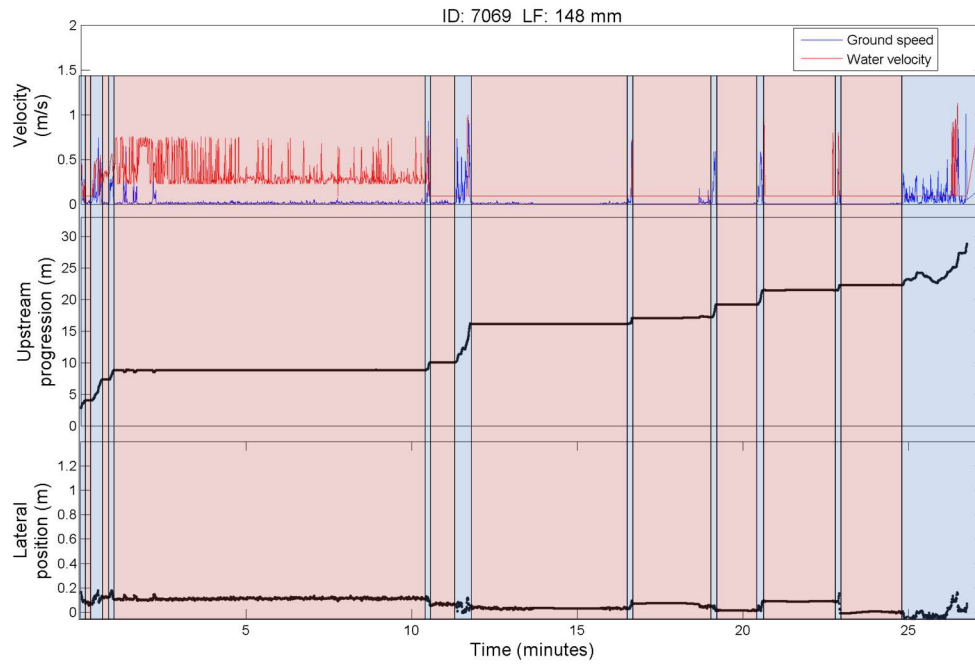


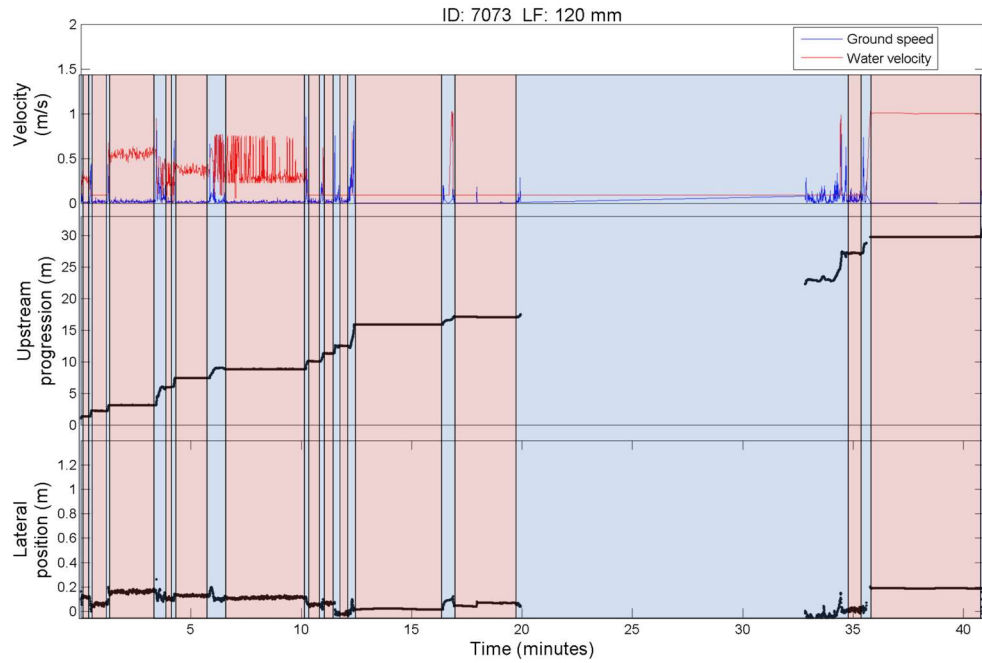
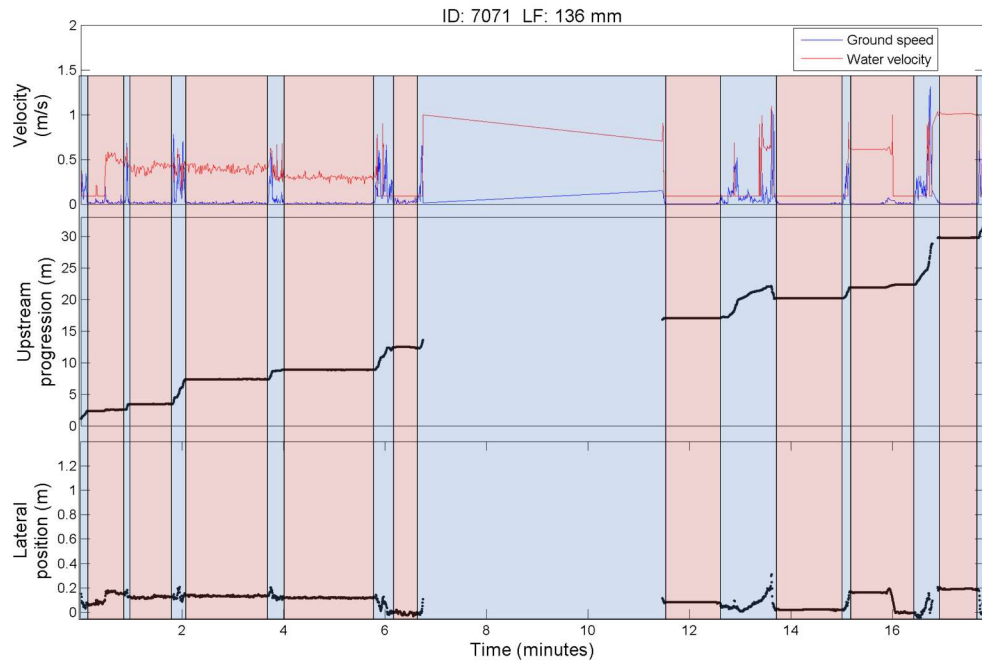


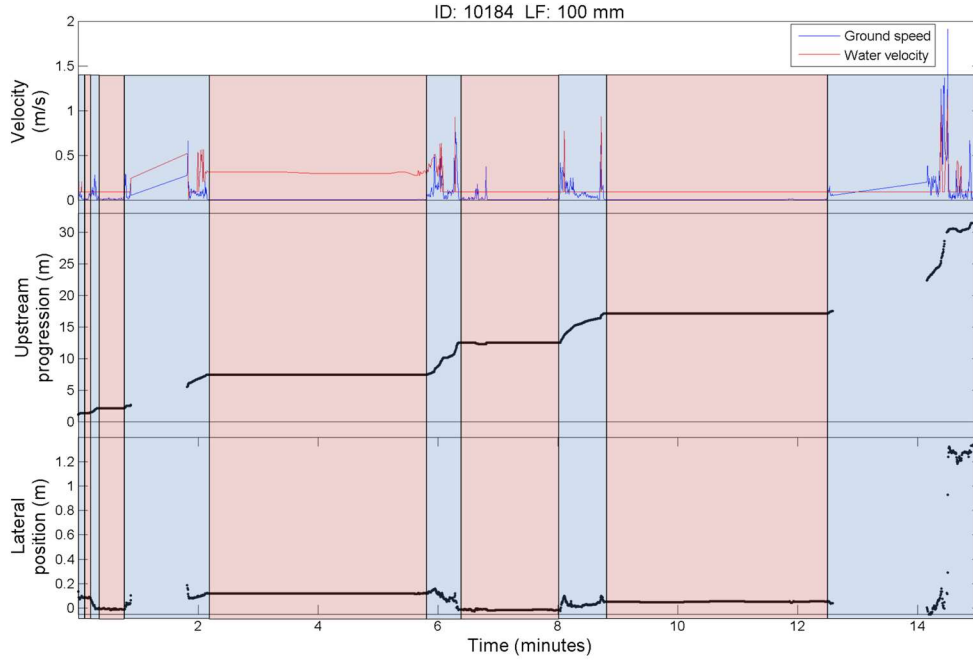
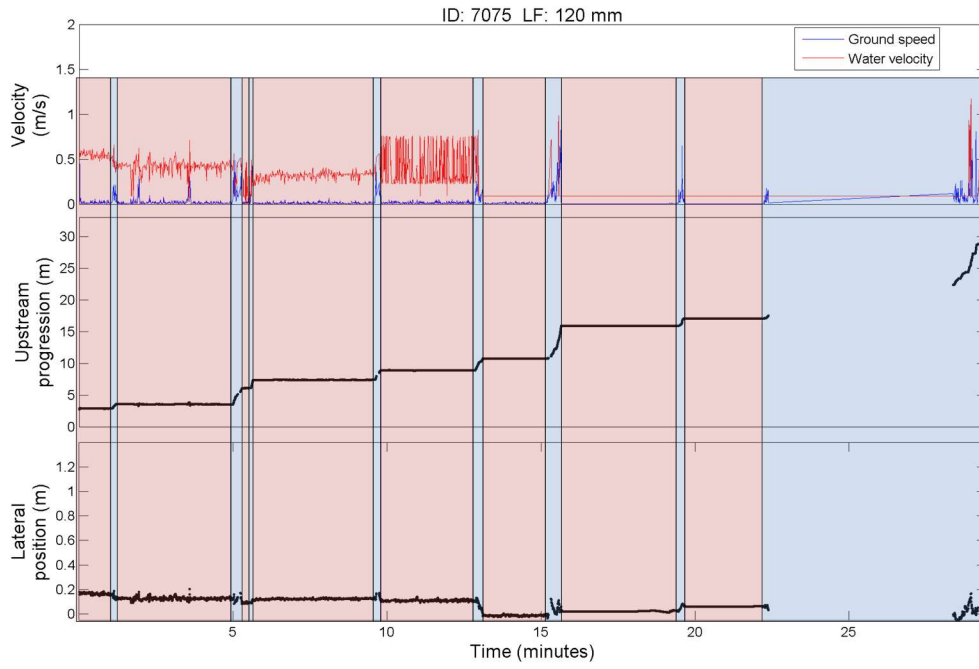
ID: 18787 LF: 110 mm

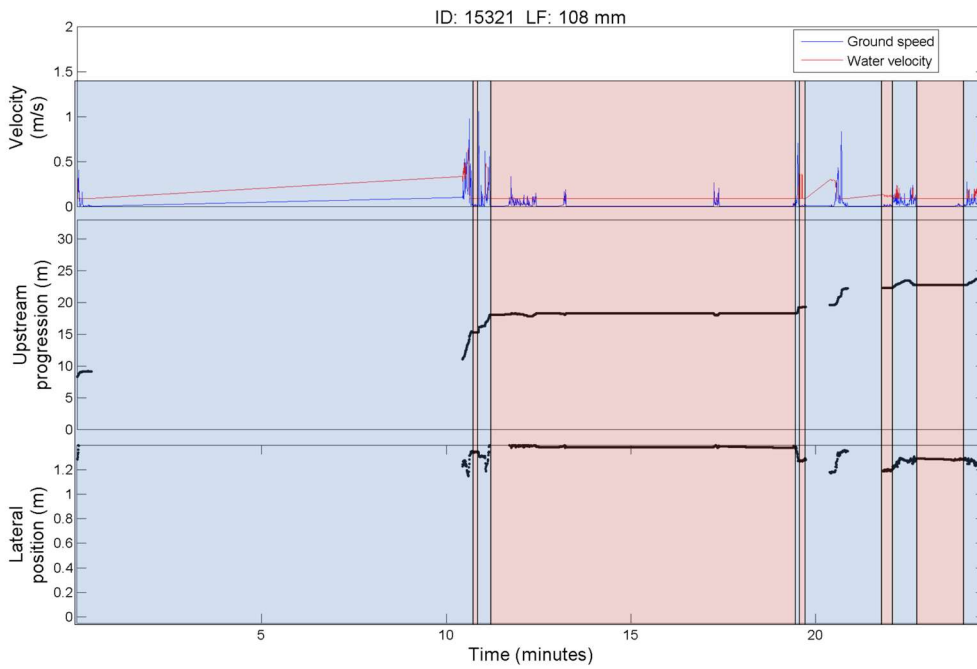
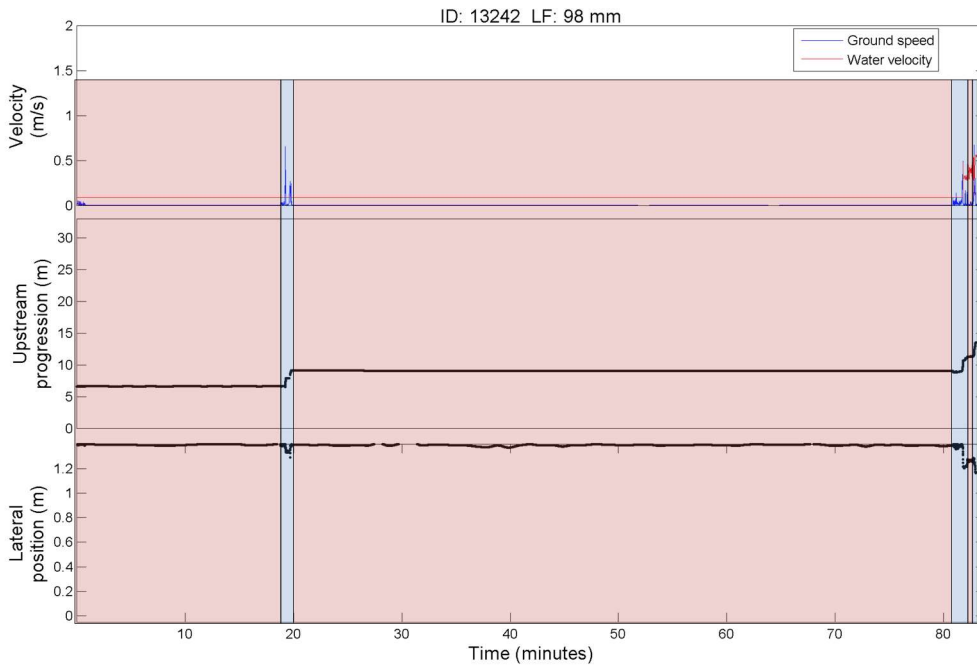














ID: 16839 LF: 118 mm

