Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) à franchir les ponceaux

Rapport final

Réalisé pour le compte du ministère des Transports
Direction de la Capitale-Nationale

INRS
Université d'avant-garde

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec et a été financée par la Direction de l'environnement et de la recherche.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports du Québec.

Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) à franchir les ponceaux

Rapport final

Elsa Goerig et Normand Bergeron
Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique
490, rue de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9
418 654-3170/418 654-3703
elsa.goerig@ete.inrs.ca
normand.bergeron@ete.inrs.ca

Réalisé pour le compte du ministère des Transports
Direction de la Capitale-Nationale

Mai 2014

Référence à citer :

Goerig, E. et Bergeron, N. 2014. Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) à franchir les ponceaux. Institut National de la Recherche Scientifique pour le compte du ministère des Transports du Québec. 90 pages + annexes.

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Chercheur

Normand Bergeron
Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique

Étudiant gradué

Elsa Goerig
Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique

Assistants de recherche :

Jean-Nicolas Bujold
Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique

Jean-Baptiste Torterotot
Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique

André Boivin
Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique

Francis Bérubé
Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique

Marc-André Pouliot
Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique

Joëlle Bédard
Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique

Stagiaires

Maxim Fortin
Département de Génie
Université Laval

Anne Provencher Saint-Pierre
Département de biologie
Université Laval

Hugo Bouchard
Département de chimie et biologie
Université du Québec à Trois-Rivières

Christine Larouche
Département des sciences biologiques
Université du Québec à Montréal

Pascal Marcotte
Département de génie
Université de Sherbrooke

Flavien Pichon
Département des sciences de la Terre
Université de Tours

Marion Tisserand
École Nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg

Alexandra Blanchette
Département de biologie
Université Laval

Charlie Couchoud
Ingénierie des milieux aquatiques et des corridors fluviaux
Université de Tours

Pierre-Marc Constantin
Département de biologie
Université du Québec à Trois-Rivières

COMITÉ DE SUIVI

Ministère des Transports du Québec

Martin Lafrance, coordonnateur du projet
Audrey Turcotte
Christian Poirier
Éric Alain
Jacques Bélanger
Jacqueline Peltier
Isabel Bernier-Bourgault

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec

Suzanne Lepage

Ministère des Ressources naturelles du Québec

Jolyane Roberge

Pêches et Océans Canada

Dominic Boula

Serge-Éric Picard

BPR

Charles Fortier

REMERCIEMENTS

De nombreuses personnes ont contribué à la réussite de ce projet. Nous tenons en premier lieu à remercier les assistants de recherche ayant participé aux travaux et offert un soutien technique et logistique indispensable : Marc-André Pouliot, André Boivin, Francis Bérubé, Jean-Nicolas Bujold et Steve Dugdale. Nous offrons des remerciements particuliers à Jean-Baptiste Torterotot qui, en l'absence de Mme Goerig, a pris en charge les travaux de terrain durant la saison 2010. Nous remercions également les stagiaires impliqués pour leur enthousiasme et leur aide précieuse sur le terrain.

Ce projet de recherche a été mené en collaboration avec le ministère des Transports et nous souhaitons remercier toutes les personnes qui ont apporté leur soutien : Martin Lafrance et Éric Alain de la Direction Capitale-Nationale, Jacques Bélanger et son équipe de la Direction Chaudières-Appalaches, Marc-André Larose de la Direction Mauricie-Centre-du-Québec, Christian Poirier ainsi que toute l'équipe du Service de la coordination de la recherche et de l'innovation. Nous tenons par ailleurs à remercier les membres du comité de suivi qui ont apporté leur avis professionnel ainsi que des commentaires constructifs tout au long du projet.

Enfin, des remerciements particuliers sont accordés à la famille d'Alain Tardif, de Saint-Jacques-de-Leeds, qui nous a permis de séjourner gracieusement sur ses terres et nous a offert du soutien logistique en cas de besoin.

Ce projet a été réalisé grâce à l'octroi d'un important contrat de recherche par le ministère des Transports. Des fonds additionnels ont été octroyés par le Fonds de la recherche forestière du Saguenay-Lac-Saint-Jean, permettant la réalisation de travaux sur des ponceaux en milieu forestier. Nous remercions ainsi Mme Ursula Larouche, de la Conférence régionale des élus du Saguenay Lac-Saint-Jean ainsi que l'équipe de la Direction de l'expertise de Jonquière du ministère des Ressources Naturelles pour leur soutien. Des bourses de recherche de premier cycle et de doctorat du CRSNG et du FQRNT ont également permis de soutenir financièrement les étudiants et stagiaires impliqués dans le projet.

SOMMAIRE

Le présent document vise à rendre compte des résultats du projet «Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) à franchir les ponceaux». Le sujet de recherche de ce projet porte sur les ponceaux en tant qu'éléments potentiels de fragmentation de l'espace fluvial et sur la capacité des salmonidés à franchir ces structures sous différentes conditions d'écoulement.

Ce rapport final aborde le sujet dans son contexte actuel et effectue un survol de la littérature existante. L'ensemble des travaux qui ont été effectués dans le cadre du projet de recherche est présenté ainsi que les principaux résultats en lien avec chacun des quatre objectifs spécifiques du projet, dont voici le sommaire :

Objectif 1 : développer et tester une nouvelle approche utilisant la technologie des transpondeurs passifs afin de déterminer, sur le terrain, la capacité des poissons à franchir les ponceaux.

- La méthode développée comporte de nombreux avantages pour étudier la capacité des poissons à franchir les ponceaux. Elle permet non seulement de déterminer le succès ou l'échec de tentatives de passage, mais également la vitesse de progression des ombles et la distance maximale parcourue à chacune de leurs tentatives. Par ailleurs, l'efficacité des systèmes PIT-tag semble excellente, bien que des analyses plus poussées soient nécessaires pour la quantifier plus en détails.

- L'utilisation d'une cage pour tester les ombles de fontaine augmente le nombre d'individus qui effectuent des tentatives, mais semble sans effet sur le nombre d'individus réussissant à franchir le ponceau.

Objectif 2 : réaliser des travaux de terrain permettant de déterminer les critères biologiques et les conditions hydrauliques qui régissent la capacité des ombles de fontaine à franchir les ponceaux.

- Pour la gamme de longueurs de ponceau (8-45 m) et de conditions hydrauliques (0,39-2 m/s) testées, la longueur des ombles n'influence pas significativement la capacité de passage.

- Dans les essais effectués, la longueur du ponceau n'influence pas la capacité de passage des ombles.

- La vitesse moyenne de l'écoulement dans le ponceau n'a que peu d'influence sur la proportion d'individus effectuant des tentatives. Toutefois, une forte corrélation s'observe entre la vitesse de l'écoulement, la distance maximale d'ascension et, conséquemment, le succès de passage, une diminution importante de la proportion d'individus réussissant la remontée ayant lieu lorsque la vitesse moyenne est supérieure à 1 m/s (succès de passage < 40%). La profondeur d'écoulement seule ne semble pas avoir d'effet marqué sur les tentatives ou le succès de passage, mais elle interagit avec la vitesse d'écoulement, une profondeur élevée favorisant le succès de passage.

- Une relation similaire existe entre le succès de passage et la pente du ponceau, le succès diminuant de façon marquée lorsque la pente devient supérieure à 2,5 %.

- La vitesse de progression médiane des poissons ayant échoué à franchir le ponceau est plus élevée que celle de ceux ayant réussi. La variabilité est également plus grande pour les ombles ayant échoué. En général, les ombles ayant réussi le passage ont nagé à des vitesses entre 0.5 et 2 *BL*/s. Ces résultats peuvent démontrer l'adoption par les ombles d'une stratégie d'optimisation de la distance parcourue et des analyses plus poussées pourront éventuellement confirmer cette hypothèse.

Objectif 3 : réaliser des travaux de terrain permettant de comparer les caractéristiques d'écoulement et la capacité de passage des ombles de fontaine dans des ponceaux rugueux (en tôle ondulée) et lisse (en béton ou polyéthylène) afin d'évaluer les impacts réels de la réfection de ponceaux à l'aide de la technique d'insertion.

- Lors des essais de passage, une gamme plus large de vitesses d'écoulement a été testée dans les ponceaux lisses. Les profondeurs

d'écoulement et les nombres de Reynolds étaient en général plus faibles dans ce type de ponceau.

- Des travaux de modélisation par calculs hydrauliques (Duguay, J. et J. Lacey, Université de Sherbrooke, communication personnelle) montrent que lors d'une réfection de ponceau par la technique d'insertion, les profondeurs d'écoulement vont décroître en moyenne de 35% (± 6%) et la vitesse va augmenter en moyenne de 100% (± 20%).

Objectif 4 : développer un modèle prédictif du succès de passage des ombles de fontaine dans les ponceaux intégrant des variables biologiques (e.g. espèce, âge, taille, facteur de condition), hydrauliques (e.g. vitesse de l'eau, profondeur d'eau, débit) et environnementales (e.g. luminosité, température de l'eau).

- Les prédictions de trois modèles de succès de passage pour l'omble de fontaine ont été validées avec les observations de terrain. Deux des modèles ont démontré un taux de classification correcte modéré (60 et 63%) mais acceptable et ce, particulièrement pour des ponceaux lisses (68 et 69 %). L'approche de Castro-Santos et al. (2013) est celle ayant le plus bas taux de sous-estimation de la capacité de passage, ce qui en fait actuellement l'approche à privilégier. La performance du modèle FishXing s'est toutefois avérée faible et il n'est pas recommandé d'utiliser celui-ci sous sa forme actuelle pour prédire la capacité de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux.

- Une approche logistique a été développée afin de prédire la probabilité de succès d'une tentative de passage donnée. Le modèle s'ajustant le mieux aux données s'avère être celui comprenant la température de l'eau, le type de ponceau, la longueur à la fourche du poisson, l'interaction entre le type de ponceau et la longueur du poisson, la vitesse de l'écoulement, le rayon hydraulique, la profondeur de la fosse aval ainsi que la durée de l'essai.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

De façon générale, les résultats de ce projet ainsi que ceux de la thèse de doctorat qui lui est associé permettent de mieux comprendre les facteurs qui régissent la capacité de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux. Lors de l'atelier de travail tenu sur ce sujet le 30 avril 2013 à l'Université Laval[1] il fut intéressant de constater que ce projet de recherche a pu permettre à des participants de différents ministères et organismes de mettre à niveau et d'échanger leurs connaissances ainsi que d'exprimer leurs préoccupations quant à cet enjeu. Il est apparu évident qu'un travail de concertation restait à entreprendre pour renouveler les normes de conception de ponceaux et mieux outiller les concepteurs afin de rendre les ouvrages de traversées de cours d'eau plus perméables aux mouvement des poissons.

À ce stade-ci des analyses, il est encore tôt pour émettre des conclusions définitives en ce qui a trait à l'influence des différentes variables étudiées sur le succès de passage. Au terme de ce projet de recherche, beaucoup de questions demeurent sans réponse. La poursuite des travaux dans le cadre de la thèse de doctorat vont permettre de pousser plus loin le processus d'acquisition de connaissances. En fonction des connaissances actuelles et des résultats disponibles au terme de ce projet, il est possible d'émettre certaines recommandations en ce qui a trait au libre passage de l'omble de fontaine dans les ponceaux. Les valeurs seuils énoncées dans ces recommandations sont issues des résultats propres au présent projet en date de ce rapport ainsi que de d'autres travaux recherches déjà publiés. Les valeurs seuils ainsi que les connaissances sur le sujet sont toutefois susceptibles d'évoluer avec l'avancement des travaux de recherche en cours.

En premier lieu, il n'est actuellement pas recommandé d'utiliser le logiciel FishXing pour déterminer la capacité de passage de l'omble de fontaine dans un ponceau donné. Les données de performance de nage qu'utilise le logiciel pour faire les simulations de passage sont conservatrices du point de vue de la capacité de nage de cette espèce. Une refonte du logiciel serait nécessaire afin de rendre son utilisation plus facile et transparente, notamment en ce qui a trait au choix des paramètres biologiques (temps à l'épuisement de l'espèce visée) et du choix des données de performance de nage (intégration de données issues d'études récentes). Dans le cas où FishXing est remis à jour, son utilisation pourrait devenir intéressante. Les relations de temps à

[1] Le compte-rendu intégral de cet atelier est disponible à l'annexe C de ce rapport.

l'épuisement de Castro-Santos et al. (2013) peuvent être utilisées pour prédire si un omble de fontaine d'une taille donnée peut franchir un ponceau sous différentes conditions hydrauliques. En fonction des modèles existants actuels, c'est celui offrant les résultats optimaux quant aux données terrain obtenus dans le présent projet, soit pour prédire correctement le succès de passage du poisson sous diverses conditions hydrauliques. Cette approche est détaillée à la section portant sur les modèles de type «distance de remontée» et illustrée à l'annexe B pour des ombles de différentes tailles. Par contre, avec la finalisation des modèles en développement dans le cadre du présent projet, il est possible d'espérer comprendre encore plus finement les variables prépondérantes au succès de passage du poisson.

Bien que la construction d'un pont comportant des unités de fondation situées à l'extérieur du cours d'eau demeure l'option qui maximise la perméabilité d'une infrastructure routière traversant un habitat du poisson, il est évident que les coûts et les autres contraintes associées à ce type d'ouvrage font que l'aménagement de ponceaux sera souvent l'option privilégiée. Afin d'assurer un niveau de franchissement élevé dans ce type de traverses de cours d'eau, il est recommandé que les ponceaux possèdent les caractéristiques suivantes :

- **Pente**

  Idéalement, maintenir une pente suivant le profil naturel du cours d'eau dans le cas où la pente de celui-ci est inférieure à 2 %. À une pente supérieure, les vitesses d'écoulement sont accrues significativement, résultant dans le présent projet en 50% d'échec dans les tentatives de passage. Il est également recommandé, dans le cas de la conception d'une nouvelle route, de sélectionner dans la mesure du possible un tracé où les pentes des traverses de cours d'eau seront inférieures à 2%.

- **Largeur du cours d'eau.**

  Réduire au minimum la largeur du cours d'eau. Le fait de réduire celle-ci favorise une contraction de l'écoulement à l'extrémité amont du ponceau et une élévation des vitesses d'écoulement dans celui-ci, ce qui peut limiter la capacité de passage du poisson.

- **Extrémité aval du ponceau:**

L'extrémité aval du ponceau ne doit idéalement pas être surélevée, bien qu'une chute inférieure à 10 cm par rapport à la surface du cours d'eau peut permettre à des ombles de longueurs variées d'entrer dans le ponceau (Kondratieff and Myrick, 2005). La création d'un bassin de dissipation d'énergie à l'aval du ponceau peut être utile afin de procurer une profondeur adéquate et des abris aux poissons, leur permettant de se reposer après une tentative de passage. Un bassin à l'aval permet également d'augmenter la probabilité de franchissement dans le cas où la sortie aval du ponceau est surélevée (Kondratieff and Myrick, 2005).

- **Vitesse d'écoulement moyenne**

La vitesse d'écoulement moyenne dans le ponceau devrait être inférieure à 1 m/s, en excluant des périodes de crue. À l'intérieur du présent projet, à des vitesses moyennes supérieures à 1m/s, le succès de passage était inférieur à 40%, tandis qu'à des vitesses moyennes inférieures à 1m/s, le succès de passage était de plus de 60%. De plus, une vitesse d'écoulement moyenne égale ou inférieure à 1 m/s permet à des ombles de fontaine de plus de 125 mm de franchir des ponceaux d'une longueur égale ou supérieure à 25 m (Castro-Santos et al. 2013). Pour des individus dont la longueur se situe entre 90 et 125 mm, les distances de remontée minimales vont de 10 à 25 mètres lorsque la vitesse de l'écoulement est de 1 m/s et plus si elle est inférieure à 1 m/s. L'annexe B présente les courbes illustrant la distance de remontée maximale possible en fonction de la vitesse d'écoulement pour des ombles de 90 à 225 mm dans des structures lisses. Si le ponceau est rugueux, il est possible que les distances de remontée puissent être plus grandes, mais les données actuelles ne permettent pas d'estimer dans quelle proportion.

- **Longueur du ponceau :**

Dans le cadre du présent projet, aucune relation significative n'a été identifiée entre la longueur du ponceau et la capacité de passage du poisson (longueurs étudiées de 45 m ou moins). Néanmoins, selon les travaux de Castro-Santos (2013), il est possible qu'au-delà d'une longueur de 25 m certains ponceaux soient difficilement franchissables pour l'omble de fontaine, même sous des conditions hydrauliques

favorables. Cela va principalement dépendre de la taille des ombles Les figures de l'annexe B illustrent comment longueur de l'obstacle et vitesse de l'écoulement interagissent pour limiter le succès de passage.

- **Profondeur minimale d'écoulement**

  Idéalement, la profondeur minimale d'écoulement dans le ponceau devrait être égale ou supérieure à 10 cm en tout temps. La valeur de 10 cm provient d'une interprétation de la littérature existante ainsi que des résultats du présent projet. Bien que la profondeur ne semble pas constituer une limite physique à la capacité de passage des ombles dans la présente étude, elle interagit avec la vitesse de l'écoulement en ce qui a trait au succès de passage. Cela est liée au fait que, pour recruter différents muscles nécessaires à la nage, le poisson a besoin d'un certain espace pour se mouvoir. Par ailleurs, une plus grande profondeur accroît l'hétérogénéité des vitesses d'écoulement dans la colonne d'eau, ce qui permet au poisson d'exploiter les zones de vitesses inférieures à la vitesse moyenne pour optimiser sa distance de remontée à un coût énergétique moindre.

- **Type de ponceau**

  La rugosité du ponceau influence le succès de passage du poisson. Les ponceaux de tôle ondulée galvanisée (TTOG) sont habituellement associés à une plus grande hétérogénéité des vitesses d'écoulement ainsi qu'à des profondeurs plus élevées, dues à la présence d'ondulations amenant une rugosité supérieure des parois. Il est également possible que certains ombles puissent prendre du repos au creux des ondulations, bien que des études additionnelles soient nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Une rugosité élevée va

tempérer l'effet de la vitesse de l'écoulement (notamment influencée par la pente du ponceau) sur la capacité de passage.
C'est pourquoi, si le ponceau est constitué de matériel lisse et comporte des caractéristiques susceptibles de limiter le passage (telles que : une pente > 2%, une longueur > 25 m, une vitesse moyenne > à 1 m/s, une profondeur < à 10 cm), il est recommandé de recréer des éléments de rugosité à l'intérieur du ponceau.

- **Aménagements particuliers**

Dans le cas où certaines des caractéristiques hydrauliques et structurantes du ponceau s'avèrent limitantes pour le libre passage des ombles, certaines options d'aménagement sont à considérer afin de recréer des zones d'écoulement réduit, dont:

- L'enfouissement du radier par rapport au thalweg naturel du cours d'eau, ce qui permet la création d'une **zone de refoulement** en aval du ponceau et réduit la longueur du ponceau où les conditions sont limitantes.
- L'aménagement d'un substrat durable et hétérogène dans le ponceau et, finalement;
- L'aménagement de déversoirs dans le ponceau afin de minimiser les vitesses d'écoulement, de créer des zones de repos et de fractionner les dénivelés à franchir.

- **Réfection de ponceau par insertion**

Une attention particulière doit être portée à l'utilisation de la technique d'insertion aux endroits où le passage du poisson est requis. Le fait que cette technique réduit simultanément le diamètre du ponceau ainsi que sa rugosité a des effets directs sur les conditions hydrauliques ayant cours dans la structure. Des travaux de modélisation par calculs hydrauliques montrent en effet que, lors d'une réfection de ponceau par la technique d'insertion, les profondeurs d'écoulement vont décroître en moyenne de 35% (± 6%) et la vitesse va augmenter en moyenne de 100% (± 20%) (Duguay, J. et J. Lacey, Université de Sherbrooke, communication personnelle).

Une caractérisation des habitats (comprenant au besoin un inventaire par pêche à l'électricité) situés en amont et en aval du site de la traversée devrait être effectuée préalablement au choix du concept de la structure. Dans le cas où l'intervenant responsable juge que la population de poisson présente devrait être en mesure de pouvoir franchir l'infrastructure routière en vue de satisfaire ses besoins vitaux, il est recommandé de réduire le moins possible le diamètre du ponceau existant et d'apporter les aménagements nécessaires si on suspecte que les vitesses d'écoulement y seront excessives. Aussi, l'analyse des conditions hydrauliques dans le cours d'eau est nécessaire préalablement à ce genre de travaux, dans le but d'identifier des débits ou des vitesses plus représentatives des conditions normales ou d'étiage auxquelles peuvent être confrontés les poissons, plutôt que les conditions de crues traditionnellement modélisées.

Dans le cas où des mesures comme l'aménagement de déversoirs dans le ponceau à insérer ou d'un seuil en aval afin de créer une zone de refoulement vers l'amont ne sont pas applicables du point de vue de la capacité hydraulique, d'autres options devront être évaluée (p.ex. l'ajout d'un autre ponceau par forage directionnel ou la reconstruction complète en tranchée).

TABLE DES MATIÈRES

Équipe de réalisation i

Comité de suivi iii

Remerciements iv

Sommaire v

Synthèse des conclusions et recommandations viii

Table des matières xiv

Liste des tableaux xvii

Liste des figures xix

Liste des annexes xxii

Introduction et mise en contexte 1

Les besoins en déplacements des salmonidés 3

Effet des ponceaux sur l'habitat du poisson 3

Problématique 6

Revue de la littérature existante 7

Capacité et comportement de nage 7

Modélisation de la capacité de passage 12

Modèle de type «distance de remontée» 12

Modèle de type «seuil d'épuisement» 17

En résumé 18

Mise en contexte et objectifs 20

Méthodologie 21

Approche générale 21
Localisation des sites d'études 21
Récolte des données 22
Passage des ombles dans les ponceaux 22
Capacité de nage 25
Variables hydrauliques 27
Résumé des travaux effectués 28
Résultats 32
Objectif 1 32
Efficacité des systèmes PIT-tag 33
Utilisation d'une cage 33
Objectif 2 36
Température de l'eau 40
Longueur du ponceau 44
Profondeur et vitesse de l'écoulement 45
Vitesses de nage observées 49
Objectif 3 52
Objectif 4 55
Performance des modèles de passage existants 56
Approche de Peake et al., (1997) et Castro-Santos (2005) 58
Castro-Santos et al., (2013) 62
FishXing (Furniss et al., 2003) 65
Discussion 67

Choix d'un modèle 70

Modélisation de la probabilité de succès pour un omble donné..... 71

Résultats 72

Application et validation du modèle..... 77

Discussion et avenues de recherche futures..... 79

Conclusion..... 81

Publications 87

Communications..... 88

Colloques, congrès et conférences..... 88

Présence dans les médias 90

Médias écrits (papiers et électroniques) 90

Télévision..... 90

Références 91

Annexe A..... 97

Algorithme de nage de FishXing..... 98

Annexe B..... 100

Distance de remontée en fonction de la vitesse de l'écoulement pour l'omble de fontaine 101

Annexe C..... 102

Synthèse de l'atelier 103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Localisation et caractéristiques des sites d'étude 22

Tableau 2: Nombre d'individus testés par type de ponceau et condition expérimentale 28

Tableau 3: Matrice des conditions de température et vitesse de l'eau testées pour chaque type de ponceaux 29

Tableau 4: Récapitulatif des caractéristiques des essais de passage, 2009 à 2012 30

Tableau 5: Exemple d'une matrice de confusion 56

Tableau 6 : Matrice de confusion pour tous les individus testés. 59

Tableau 7: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux rugueux. 60

Tableau 8: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux lisses. 61

Tableau 9: Matrice de confusion et indices associés pour l'ensemble des individus testés. 62

Tableau 10: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux rugueux. 63

Tableau 11: Matrice de confusion pour les individus testés dans des ponceaux lisses. 64

Tableau 12: Matrice de confusion pour tous les individus testés. Approche de FishXing 65

Tableau 13: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux rugueux. 66

Tableau 14: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux lisses. 67

Tableau 15: Indices Kappa des approches prédictives 67

Tableau 16 : Ce tableau contient les trois modèles recevant le support le plus élevé des données. Il présente aussi les valeurs d'AIC pour chacun des modèles, le nombre de paramètres (K), les différences d'AIC entre le meilleur modèle et ses concurrents (Δ AIC) ainsi qu'entre le modèle nul (Δ AIC nul) et le poids d'Akaike (*w*), correspondant à une approximation de la fréquence de sélection d'un modèle en tant que meilleur modèle 72

Tableau 17 : Estimés standardisés des paramètres du modèle logistique avec les variables standardisées en longueurs de corps et les variables en unités standards. Le coefficient β2 est multiplié par 1 dans le cas d'un ponceau rugueux et par 0 dans celui d'un ponceau lisse. 74

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Différents types de ponceaux : a) et b) circulaire en tôle ondulée galvanisée; c) circulaire en béton armé; d) rectangulaire en béton armé..... 2

Figure 2: Arbre de classification des niveaux de franchissement des traverses4

Figure 3 : Relation entre la capacité de nage en mode soutenu et la taille pour l'omble de fontaine (•) et les tacons de saumon atlantique (▫). Les lignes pointillées indiquent les intervalles de confiance de 95%..... 8

Figure 4: Isovels normalisés avec vecteurs de circulation secondaire pour des stations de mesure localisées à une distance correspondant à 0.25 x le diamètre à l'aval de l'entrée amont du ponceau et b) 2 x le diamètre à l'aval de l'entrée amont..... 9

Figure 5: Omble de fontaine dans l'ondulation d'un ponceau 10

Figure 6: Distance maximale (en m) prédite par l'équation 6 en fonction de la vitesse de nage absolue (m/s) pour : (a) des ombles de fontaine testés à 1,6 m/s; (b) des ombles de fontaine testés à 2,5 m/s et (c) des truites brunes testées à 1,6 et 2,5 m/s. Les points gris indiquent des poissons nageant sous le mode sprint 1 et les triangles noirs ceux nageant sous le mode sprint 2. Les courbes illustrent les distances maximales de remontée calculées pour la gamme possible de vitesses de nage pour différentes longueurs de poissons de l'étude (10e, 50e et 90e percentiles)..... 16

Figure 7: Pêche électrique 23

Figure 8: À gauche : insertion d'un PIT-tag par chirurgie abdominale 23

Figure 9:(à gauche): cage fixée à l'aval d'un ponceau 24

Figure 10: (à droite): antenne PIT-tag installée à l'aval d'un ponceau 24

Figure 11: Schéma de la localisation des antennes PIT-tags dans un ponceau 24

Figure 12: Système permettant de faire varier le débit dans a) une section du ponceau; b) un ponceau à trois tuyaux. 25

Figure 13: Localisation des mesures de vitesses et de profondeur de l'eau dans la coupe transversale d'un ponceau, effectuées à chaque station de mesure 27

Figure 14: Système PIT à haute résolution spatiale..... 33

Figure 15: Effet de la cage sur la proportion d'individus d'un essai ayant effectué au moins une tentative 34

Figure 16: Effet de la cage sur le nombre de tentatives par individu selon le type d'essai..... 35

Figure 17: Effet de la cage sur la proportion moyenne d'individus par essai ayant effectué au moins un passage..... 35

Figure 18: Longueurs des individus selon les sites d'étude 36

Figure 19: Nombre de tentatives effectuées en fonction de la longueur des individus 38

Figure 20: Distribution de la longueur des ombles en fonction du succès de passage..... 39

Figure 21: Distribution du facteur de condition (k) des ombles en fonction du succès de passage..... 39

Figure 22: Températures moyennes de l'eau pour les essais de 2009-2012.. 40

Figure 23: Effet de la température de l'eau sur la proportion d'individus par essai effectuant des tentatives 41

Figure 24: Proportion d'omble effectuant des tentatives en fonction de l'approche de la période de reproduction 42

Figure 25: Nombre de tentatives par individu par période de 24h en fonction de l'approche de la période de reproduction 42

Figure 26: Effet de la température de l'eau sur la proportion d'individus par essai effectuant au moins un passage 43

Figure 27: Effet de la longueur du ponceau sur la proportion d'individus traversant le ponceau..... 44

Figure 28: Effet de la profondeur de l'écoulement sur la proportion d'individus traversant le ponceau 45

Figure 29: Effet de la vitesse de l'écoulement sur la proportion d'individus effectuant des tentatives 46

Figure 30: Effet de la vitesse de l'écoulement sur la distance maximale de remontée 47

Figure 31: Proportion d'individu traversant le ponceau en fonction de classes de vitesse d'écoulement. 47

Figure 32: Proportion d'individu traversant le ponceau en fonction de la pente du ponceau 48

Figure 33: Omble en progression dans un ponceau 49

Figure 34:`Vitesses de nage observées dans les essais de 2009 à 2012 en a) mètres par seconde et b) longueurs de corps(*BL*) par secondes 50

Figure 35: Distribution de la vitesse de progression au sol (en longueurs de corps (BL) par seconde) selon l'échec ou le succès de passage 51

Figure 36: Distribution de la vitesse moyenne de l'écoulement selon le type de ponceau 52

Figure 37: Distribution de la profondeur moyenne de l'écoulement dans les essais selon le type de ponceau 53

Figure 38: Distribution du nombre de Reynolds dans les essais selon le type de ponceau 54

Figure 39: Aire sous la courbe ROC pour deux modèles prédictifs de passage : l'un incluant la vitesse de l'écoulement et l'autre la pente du ponceau. 78

Figure 40: Distance de remontée en fonction de la vitesse de l'écoulement pour des ombles de fontaine de 90- 225 mm en mode sprint 1 (bleu) et sprint 2 (rouge). La transition de mode de nage intervient lorsque la vitesse de l'écoulement atteint 13,69 *BL*/s. Source : Castro-Santos et al. 2013 101

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Algorithme de nage de FishXing

Annexe B Distance de remontée en fonction de la vitesse de l'écoulement pour l'omble de fontaine

Annexe C Compte-rendu de l'atelier

INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE

Les besoins en espace et en ressources amènent l'homme à développer et à aménager le territoire autour de lui. Les besoins en déplacements, que ce soit pour l'accès aux ressources, pour relier des communautés éloignées ou simplement pour passer d'une sphère de la vie quotidienne à l'autre, sont multiples et diversifiés. Ils entraînent le développement d'infrastructures de transport, qui sont des composantes essentielles de l'aménagement du territoire. Les routes, peu importe leur type et leur dimensions, permettent à l'homme de se mettre en mouvement et d'accéder à l'espace qui l'entoure. En d'autres mots, elles rendent l'habitat humain accessible et utilisable. Le fait de se déplacer dans l'espace afin de combler différents besoins n'est toutefois pas le propre de l'homme. La plupart des espèces animales se déplacent sur des distances variables pour combler leurs différents besoins vitaux. Paradoxalement, les voies de transport qui permettent l'interconnexion des territoires et l'utilisation de ceux-ci par l'homme peuvent réduire son accessibilité pour les autres espèces animales. En effet, l'aménagement du territoire dans le but de favoriser son accessibilité peut avoir comme effet de fragmenter celui-ci en une multitude de parcelles entrecoupées par des voies de transport diverses (chemins, routes, voies ferrées). Ces dernières peuvent dans certains cas constituer de véritables obstacles aux déplacements des espèces fauniques, réduisant ainsi la portion accessible de leur habitat. Ce phénomène, assez visible dans le cas de la grande faune avec des espèces telles que l'ours ou l'orignal, s'avère souvent moins flagrant dans celui des espèces aquatiques. Les traverses de cours d'eau, ponts ou ponceaux, assurent dans l'imaginaire collectif la continuité fluviale. L'eau s'écoulant sous la route semble en effet ne rencontrer aucun obstacle à sa course. Pourquoi alors en serait-il autrement des espèces aquatiques présentes dans le cours d'eau?

Là où il y a une route, ne serait-ce qu'un simple chemin de gravier, il y a une traverse de cours d'eau quelque part. Aussi bien dire que, à l'échelle du territoire nord-américain où le réseau hydrographique est bien développé, il y a des ponts et des ponceaux partout. À l'image du pont qui assure la traversée des rivières, le ponceau permet aux routes d'enjamber les cours d'eau de plus petites dimensions : petits ou gros ruisseaux, cours d'eau intermittents et fossés de drainage. Le nombre de ponceaux sur un territoire est fonction de la densité des réseaux routier et hydrographique présents sur celui-ci. Au Québec, 58 376 ponceaux transversaux et tuyaux raccordés au fossé sont sous la responsabilité du ministère des Transports (communication personnelle, Annie-Claude Têtu, Direction du soutien aux opérations, 8 mars 2013). À ceux-ci s'ajoutent les ponceaux situés sur des routes secondaires ou des chemins forestiers. Il est difficile d'avancer un nombre précis, mais il est possible d'affirmer que plusieurs milliers de ponceaux sont installés ou remplacés chaque année au Québec (Prévost et al., 2002). Aux États-Unis, le *US Fish and Wildlife Service* estime le nombre de traverses de cours d'eau sur le territoire américain à 1,4 millions (USFWS, 2003). De dimensions allant de quelques dizaines de centimètres à plus de trois mètres de diamètre, les ponceaux

peuvent être de formes diverses (circulaire, rectangulaire, en arche) et constitués de différents matériaux. La figure 1 présente différents types de ponceaux.

a) b) c) d)

Figure 1: Différents types de ponceaux : a) et b) circulaire en tôle ondulée galvanisée; c) circulaire en béton armé; d) rectangulaire en béton armé
Source : Elsa Goerig (INRS), 2009

Les ponceaux constitués de métal possèdent habituellement des ondulations de type hélicoïdal ou annulaire dont la longueur d'onde et la profondeur varient. La largeur de la route et la hauteur du remblai font varier la longueur des ponceaux de quelques mètres, dans le cas d'un chemin forestier, à plus de 80 mètres dans celui d'une autoroute. La pente à laquelle est installée un ponceau varie également, bien que suivant habituellement la pente naturelle du cours d'eau. Certains ponceaux sont par ailleurs parfois enfouis sur un certain pourcentage de leur diamètre afin de favoriser le dépôt de substrat naturel à l'intérieur et de ne pas favoriser la création d'une chute à son extrémité aval.

Sur le territoire forestier public québécois, l'installation des ponceaux est régie depuis 1996 par le «Règlement sur les normes d'intervention forestière dans les forêts du domaine public» (RNI), article 171 de la «Loi sur les forêts» instaurée par le Ministère des Ressources Naturelles. Ce règlement est présentement en cours de révision pour devenir le Règlement sur l'aménagement durable des forêts (RADF). Les ponceaux en général sont par ailleurs soumis aux exigences de la «Loi sur les Pêches», une loi fédérale sous la responsabilité de Pêches et Océans Canada, qui vise, en ce qui concerne les ponceaux, à protéger l'habitat du poisson. Des lignes directrices pour la conception des traversées de cours d'eau sont émises par Pêches et Océans Canada afin de favoriser le libre-passage des poissons (Pêches et Océans Canada, 2012).

L'aspect du libre passage des poissons dans les ponceaux demeure cependant encore mal connu et ses effets sur les habitats aquatiques, autant en matière de qualité que de quantité, n'a jamais fait l'objet d'études approfondies au Québec. Une étude effectuée au Labrador a analysé 47 nouveaux ponceaux dont la construction était soumise aux normes recommandées par Pêches et Océans Canada (Gibson et al., 2005). Une proportion de 53 % de ces ponceaux ne répondaient pas à ces normes et constituaient un obstacle au passage des poissons en raison de problèmes de conception ou d'installation. Plusieurs intervenants du milieu de la faune appréhendent actuellement

une situation similaire sur le territoire québécois mais l'absence d'évaluation de l'efficacité des ponceaux en regard du libre passage du poisson ne permet pas de dresser un portrait réel de la situation.

Les besoins en déplacements des salmonidés

Il est connu dans la littérature que les salmonidés juvéniles ont tendance à migrer vers les petits tributaires (Huntsman 1945; Curry et al., 1993; Erkinaro and Gibson 1997; Erkinaro et al., 1998). Les petits cours d'eau produisent en effet plus d'invertébrés par unité de surface que les grands cours d'eau (Hynes 1970) et les salmonidés y trouvent une alimentation plus abondante leur permettant d'obtenir de meilleurs taux de croissance que dans le tronçon principal d'une rivière (Erkinaro et Niemelä 1995). D'autres motivations aux mouvements vers l'amont des salmonidés sont liées à la reproduction, à la recherche d'une eau plus fraîche durant l'été (Meyers et al., 1992) et, à l'approche de l'hiver, de substrat suffisamment grossier afin de leur permettre de s'enfouir dans les interstices (Bjorn, 1971; Young 1998). Bien que les espèces non-anadromes se déplacent sur des distances moins grandes que celles anadromes, des études récentes indiquent que les déplacements de plus de cinquante mètres ne sont pas inhabituels chez ces espèces (Gowan and Fausch 1996, Rodriguez 2002). Ces déplacements peuvent avoir cours à différents moments de l'année et non pas seulement dans la période de reproduction. Ainsi, une étude réalisée au Montana par Burford et al., (2009) a relevé un nombre élevé de déplacements vers l'amont durant la période d'étiage estival pour l'omble de fontaine et la truite fardée. Les comportements de déplacement peuvent ainsi être hétérogènes pour une population donnée, certains individus étant plus mobiles que d'autres (Gurarie et al., 2009, Magnan et al., 2012; Rodriguez, 2002).

Effet des ponceaux sur l'habitat du poisson

Les ponceaux sont susceptibles d'avoir des effets négatifs sur l'habitat du poisson. Il est connu que leur mise en place peut favoriser l'introduction de sédiments fins dans les cours d'eau (Prévost et al., 2002). Plusieurs études effectuées au Québec et ailleurs ont permis d'analyser cet aspect de la problématique et de proposer de nouvelles normes d'installation et de stabilisation permettant de minimiser les impacts sur la faune aquatique (Magnan et al., 2012). Le ponceau, en modifiant les caractéristiques locales et les conditions hydrauliques naturelles du cours d'eau, peut également constituer une éventuelle barrière physique ou comportementale aux déplacements des espèces aquatiques. Les principaux facteurs pouvant mener à la création d'une barrière physique sont des vitesses d'écoulement ou un degré de turbulence élevés (Castro-Santos and Nislow, 2010). La noirceur, la vitesse de l'écoulement et la turbulence peuvent aussi jouer un rôle dans la création d'une barrière comportementale. Dans ce cas, le poisson se refuse à tenter de traverser le ponceau bien qu'il soit probablement physiquement apte à le franchir. Ainsi, la présence de ponceaux peut entraver les déplacements des poissons vers l'amont de façon permanente ou temporaire, ce qui a pour conséquence

de fragmenter l'habitat disponible en réduisant l'accès aux portions de cours d'eau situées en amont du ponceau (Harper and Quigley, 2000; Langill and Zamora 2002, Chestnut 2002, Gibson et al., 2005, Park et al., 2008). Les principales causes connues de cette entrave sont une vitesse de l'eau élevée, de faibles profondeurs, l'absence de bassin de repos à l'aval du ponceau et une sortie surélevée créant une chute (Belfort and Gould 1989, Fitch 1995, Kahler and Quinn, 1998, Boubée et al., 1999, Larinier 2002, Zwirn 2002, Bates 2003). La présence d'obstructions à l'intérieur des ponceaux (accumulation de débris ligneux, effondrement du ponceau, etc.) peut constituer une source additionnelle d'entrave aux mouvements des poissons. La figure 2 présente un arbre de classification permettant d'attribuer à une traverse de cours d'eau un degré de franchissement (Magnan et al., 2012) en se basant sur le type de traverse, le substrat, la hauteur du seuil aval (présence ou non d'une sortie aval surélevée) et la pente de la traverse. Dans le cas d'un ponceau, l'absence de substrat, les pentes supérieurs à 3% ainsi que les seuils aval dont la hauteur excède 0,61 m sont associées avec à un niveau de franchissement faible.

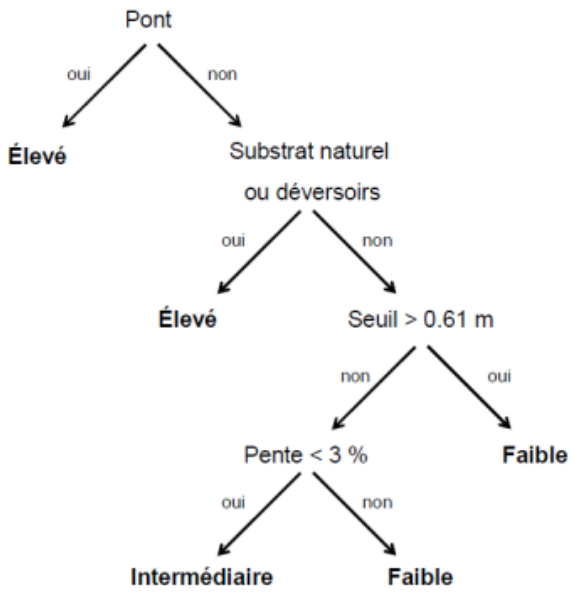


Figure 2: Arbre de classification des niveaux de franchissement des traverses

Source : Magnan et al., 2012, adapté de Love et Taylor, 2003 et Poplar-Jeffers et al., 2009

Des vitesses d'écoulement excédant la capacité de nage des poissons sont identifiées par certains auteurs (Castro-Santos 2005, Gibson et al., 2005, Cahoon et al., 2009) comme la cause d'entrave dominante. Le fait que le diamètre (D) du ponceau soit souvent inférieur à la largeur au débit plein-bord (w) du cours d'eau (ratio de constriction w/D < 1) a pour effet de restreindre l'aire d'écoulement et peut favoriser une augmentation des vitesses d'écoulement à l'intérieur du ponceau. L'augmentation des

vitesses d'écoulement à l'intérieur du ponceau, par rapport à celles ayant cours dans le cours d'eau est toutefois due à la combinaison de deux facteurs principaux : la largeur du ponceau est souvent plus faible que celle du chenal et le matériau dont est constitué le ponceau a un coefficient de rugosité inférieur à celui du lit naturel du cours d'eau.

La profondeur d'eau joue également un rôle dans le fait qu'un ponceau soit difficilement franchissable pour un individu donné. Celle-ci a un impact direct sur la capacité physique du poisson d'entrer et de se déplacer à l'intérieur d'un ponceau. Une profondeur d'eau insuffisante en relation avec la taille du poisson rendra en effet sa progression difficile. L'interaction de la profondeur avec la vitesse de l'écoulement peut également rendre les conditions de passage difficiles. Ainsi, deux ponceaux de mêmes dimensions possédant des vitesses moyennes d'écoulement similaires mais des profondeurs différentes pourraient ne pas avoir le même degré de perméabilité aux déplacements des poissons. Par exemple, pour un individu nageant près du fond et au milieu du tuyau, le gradient de vitesses d'écoulement sera beaucoup plus prononcé dans le ponceau avec une faible profondeur. La superficie des zones où les vitesses d'écoulement sont réduites sera moins importante dans ce tuyau que dans celui où l'épaisseur d'eau est plus grande.

La présence d'infrastructures routières peut avoir un impact sur la qualité et l'accessibilité de l'habitat des espèces aquatiques. Une des causes principales du phénomène réside dans les vitesses d'écoulement élevées ayant souvent cours dans les ponceaux. La restriction des mouvements dans le temps et dans l'espace peut avoir diverses conséquences sur les populations de salmonidés. Au niveau individuel, un ponceau agissant comme une barrière peut empêcher un individu d'accéder à des portions d'habitat de qualité ou induire un délai dans l'accès aux sites de reproduction (Belford and Gould, 1989, Gibson et al., 2005). Un modèle de dispersion, le modèle de Laplace, a été adapté afin d'intégrer le comportement d'un organisme en présence d'une barrière et de modéliser la dispersion d'une population en fonction d'un paramètre de perméabilité (k) (Rodriguez, 2010). Il permet de voir l'évolution des densités d'ombles en aval et en amont d'une barrière selon le niveau de franchissement de celle-ci. Plusieurs ponceaux difficilement franchissables situés dans un même bassin-versant peuvent par ailleurs avoir un effet cumulatif sur la réduction de la connectivité des habitats, isolant les populations les unes des autres et réduisant les échanges génétiques entre elles. Les effets de cet isolement varieront toutefois selon la quantité et la qualité de l'habitat disponible dans les différents segments fragmentés du cours d'eau (Wofford et al., 2005, Morita et Yamamoto, 2002).

PROBLÉMATIQUE

Le passage des poissons dans les ponceaux constitue un phénomène complexe, ayant cours autant à des échelles spatiales que temporelles et il est influencé par des facteurs physiques et biologiques. Bien que les obstacles naturels tels les seuils, les chutes et les zones avec des vitesses d'écoulement élevées contribuent également à fragmenter certaines portions de cours d'eau, les obstacles d'origine anthropique comme les ponceaux sont nombreux et largement distribués sur le territoire

Dans le contexte actuel des connaissances, il demeure difficile de modéliser la capacité d'un poisson d'une espèce et d'une taille donnée à franchir un ponceau. Cette modélisation doit nécessairement être constituée de deux composantes :

1) la détermination des conditions d'écoulement à l'intérieur et aux extrémités amont et aval du ponceau
2) la détermination du taux de succès d'un poisson (d'une espèce, d'un âge et d'une taille donnée) à franchir un ponceau d'une longueur donnée selon les conditions de vitesse et de profondeur d'eau observées à l'intérieur de celui-ci (Castro-Santos, 2004).

La capacité d'un poisson à franchir un ponceau est fonction de critères biologiques tels que sa capacité de nage et de saut, eux-mêmes influencés par d'autres variables comme sa motivation à se déplacer, l'attraction exercée par le ponceau, la température de l'eau, etc. (Boubée et al., 1999, Castro-Santos 2004, Burford et al., 2009). Il existe peu d'études qui fournissent des données quantitatives sur la performance de nage des poissons et cette lacune est problématique pour la conception des passes migratoires et des ponceaux (Haro et al., 2004). De plus, lorsque des données décrivant la capacité de nage globale d'une espèce existent, elles proviennent habituellement d'expériences menées dans des environnements contrôlées en laboratoire et elles sont difficilement applicables, sur le terrain, à la détermination de la capacité de passage du poisson dans un ponceau. La majorité des données de performance de nage existantes sont en effet issues d'expériences menées dans des tunnels de nage fermé et des respiromètres, qui restreignent l'aptitude du poisson à recruter différents type de muscles et à user de stratégies comportementales afin de maximiser sa performance (Castro-Santos et al., 2013, Tudorache et al., 2010).

Il existe donc un important besoin d'obtenir, dans des conditions plus proches de celles prévalant sur le terrain, les données permettant de modéliser la capacité biologique des poissons à franchir les ponceaux. Une meilleure compréhension de la capacité des espèces aquatiques à franchir les ponceaux est primordiale afin de concevoir et d'installer des structures perméables à leurs mouvements.

REVUE DE LA LITTÉRATURE EXISTANTE

Cette section a pour objectif de faire un survol des études s'étant intéressées à la question de la capacité de nage des salmonidés ainsi qu'à la modélisation de leur capacité à franchir des barrières de vitesses d'écoulement.

Capacité et comportement de nage

La capacité de nage est un élément crucial influençant l'aptitude des poissons à franchir les ponceaux. Celle-ci se subdivise en trois modes de nage : soutenu, prolongé et en sprint (Beamish, 1978). La nage soutenue implique l'utilisation des fibres musculaires à contraction lente qui sont alimentées en énergie par le métabolisme aérobie. Ce mode de nage permet au poisson de maintenir des vitesses de nage relativement faibles durant de longues périodes (au moins 200 minutes). La nage en sprint implique les fibres musculaires à contraction rapide utilisant l'énergie dérivée du métabolisme anaérobie. Elle permet à l'individu d'atteindre et de maintenir des vitesses élevées, mais seulement pour une période de 15 à 20 secondes, celui-ci étant ensuite épuisé. La nage prolongée couvre de son côté le spectre de vitesses et de temps à l'épuisement entre les modes soutenu et en sprint, ce mode de nage utilisant à la fois les métabolismes aérobie et anaérobie. Lors de la traversée d'un ponceau, un poisson fait généralement appel à deux types de nage : la nage prolongée et la nage en sprint (Plaut, 2001). La nage en sprint est souvent utilisée par les poissons afin de surmonter les fortes vitesses de courant situées à l'extrémité aval du ponceau, tandis que la nage prolongée est utilisée pour compléter la traversée du ponceau où des zones de vitesses plus faibles peuvent être observées (Behlke, 1991). Plusieurs études, majoritairement effectuées en laboratoire et répertoriées dans Katopodis et Gervais (2011), ont permis d'obtenir des données sur la capacité de nage des salmonidés. Parmi elles, l'étude de Peake et al., (1997) a déterminé, à partir d'équations de régression, des coefficients permettant d'estimer la vitesse de nage maximale en modes soutenu et prolongé pour plusieurs espèces en tenant compte de la taille des individus et de la température de l'eau. L'étendue des valeurs de température testées (14 à 20° Celsius) ne couvre toutefois pas toute la gamme possible des températures de l'eau.

La figure 3 illustre la relation entre la capacité de nage soutenue et la taille des individus pour deux espèces : l'omble de fontaine et le saumon atlantique (stade juvénile). Cette capacité augmente avec la taille des poissons. Toutefois, lorsque des processus anaérobiques sont impliqués (mode prolongé et sprint), cette relation avec la taille des individus n'est plus aussi claire.

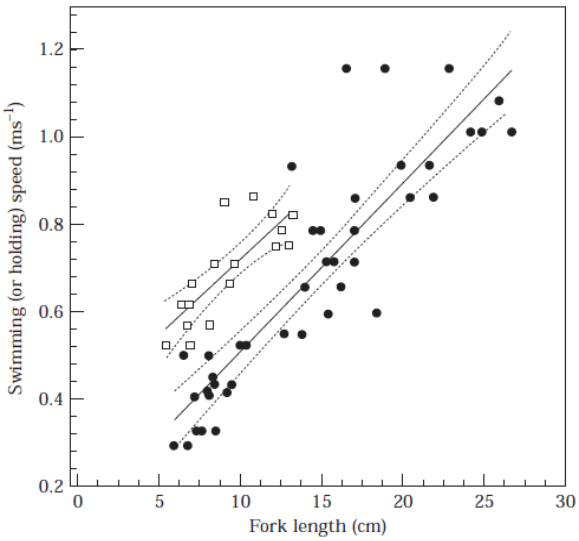


Figure 3 : Relation entre la capacité de nage en mode soutenu et la taille pour l'omble de fontaine (•) et les tacons de saumon atlantique (▫). Les lignes pointillées indiquent les intervalles de confiance de 95%.
Source : Peake et al., 1997

D'autres éléments sont toutefois à prendre en considération, notamment le fait que l'écoulement est rarement uniforme dans un ponceau et que les gradients latéraux et verticaux des vitesses d'écoulement peuvent être prononcés (Clark and Kehler 2011, Neary 2011, Richmond et al., 2007). La vitesse moyenne déterminée pour un segment ou l'ensemble d'un ponceau peut ainsi ne pas correspondre à la vitesse réelle affrontée par l'individu lors de sa progression dans le ponceau. House et al., (2005) ont développé une approche afin de déterminer, pour une coupe transversale dans un ponceau, le pourcentage de l'aire d'écoulement où la vitesse est égale ou inférieure à une vitesse d'écoulement seuil en regard de la capacité de nage de saumons juvéniles. La turbulence de l'écoulement constitue un autre aspect à prendre en considération au moment de comparer les vitesses moyennes d'écoulement avec la capacité de nage des poissons. L'étude récente de Clark and Kehler (2011) a mis en évidence l'existence de circulations secondaires de l'écoulement dans les ponceaux de tôle ondulée. Celles-ci consistent en une cellule de circulation de chaque côté de la coupe transversale du ponceau, ces cellules n'étant toutefois pas symétriques. Le long de l'axe central, l'eau se déplace verticalement vers le fond du ponceau, puis en direction des côtés pour ensuite remonter vers la surface, transportant les masses d'eau à faible *momentum* vers le centre, près de la surface et vice-versa (figure 4b). Les profils de vitesses montraient une diminution près de la surface, l'endroit où se trouvait les vitesses maximales étant situé approximativement à mi-profondeur, au centre de la coupe transversale. À l'entrée amont du ponceau, le profil était légèrement différent, montrant un noyau presque rectangulaire de vitesses élevées, centré au milieu de la coupe transversale et s'étendant sur toute la hauteur de la colonne d'eau (figure 4a).

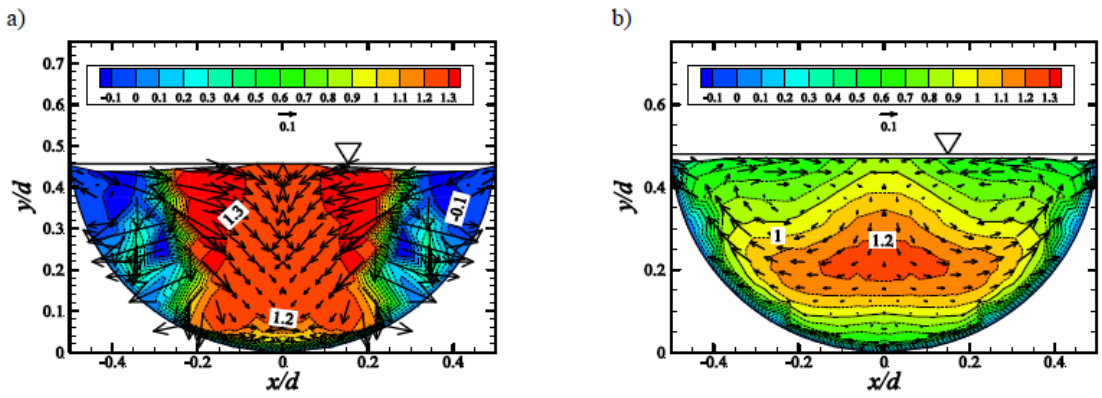


Figure 4: Isovels normalisés avec vecteurs de circulation secondaire pour des stations de mesure localisées à une distance correspondant à 0.25 x le diamètre à l'aval de l'entrée amont du ponceau et b) 2 x le diamètre à l'aval de l'entrée amont

Source : Clark et Kehler, 2011.

Les caractéristiques de l'écoulement peuvent toutefois varier selon le degré de rugosité du matériel dont est constitué le ponceau (tôle ondulée versus béton ou plastique).

L'existence, à l'intérieur du ponceau, de zones de vitesses d'écoulement réduites et leur contribution au passage des poissons a fait l'objet de plusieurs études (Richmond et al., 2007, Behlke. 1991, Barber and Down, 1996). Dans les ponceaux de métal, la présence d'ondulations entraîne une asymétrie dans la distribution des vitesses d'écoulement et de la turbulence, créant des zones où les vitesses d'écoulement sont réduites (Richmond et al., 2007). Dans cette étude, l'asymétrie dans la distribution latérale des vitesses d'écoulement et de la turbulence tendait à s'accroître lors de l'augmentation du débit. L'utilisation de zones de vitesses d'écoulement réduites peut être d'une importance primordiale pour le succès de passage des poissons. Ces ondulations dans les ponceaux de tôle ondulée peuvent également offrir, dans certains cas, des zones de repos aux poissons (Powers, 1997), particulièrement aux petits individus dont la taille réduite permet de profiter des faibles vitesses d'écoulement présentes au creux des ondulations (Belford and Gould, 1989) (figure 5). Enfin, il a été mentionné (Liao et al., 2003, Taguchi and Liao, 2011) que les poissons peuvent tirer avantage des vortex dans un écoulement turbulent afin de réduire l'énergie déployée pour se déplacer vers l'amont. Le poisson capture pour ainsi dire l'énergie du vortex, ce qui lui permet d'améliorer sa force propulsive et de se mouvoir vers l'amont. Ce phénomène a été démontré sous des conditions contrôlées avec des nombres de Reynolds[2] bas pour l'étendue de valeurs possibles dans un écoulement turbulent. Dans des écoulements avec des nombres de Reynolds élevés, la turbulence est chaotique et il est alors probable que le poisson ne puisse tirer avantage des composantes de celle-ci. La

[2] Le nombre de Reynolds donne le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses et permet de caractériser l'écoulement selon qu'il est laminaire (Re < 2000), transitoire (Re 2000-3000) ou turbulent (> 3000) Robert, A. (2003). River Processes; an introduction to fluvial dynamics. London, Hodder Arnold.

turbulence pourrait même alors affecter négativement sa performance de nage (Enders et al.,2003, Tritico et Cotel, 2010).

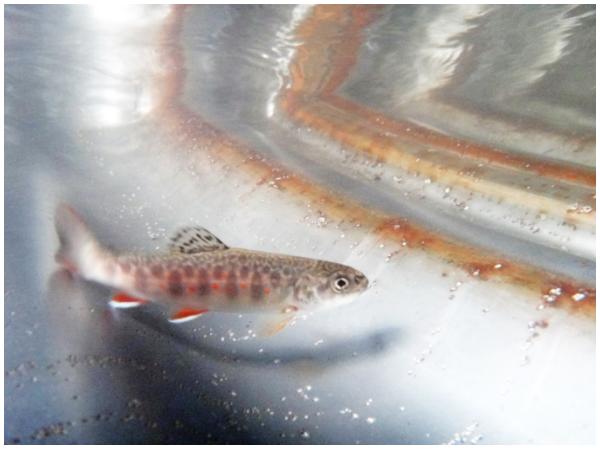


Figure 5: Omble de fontaine dans l'ondulation d'un ponceau
Source : Elsa Goerig (INRS), 2011

L'aptitude des poissons à tirer parti des zones où la vitesse de l'écoulement est réduite joue certainement un rôle dans leur capacité à franchir les ponceaux (Castro-Santos 2005, Powers and al. 1997). Le comportement de nage des poissons constitue donc une variable d'importance, au même titre que leur capacité de nage proprement dite (Hinch and Bratty 2000). Une étude a combiné des techniques de modélisation en trois dimensions de l'écoulement et des observations visuelles des trajectoires empruntées par des truites fardées lors de tentatives de remontée d'un ponceau (Blank et al., 2009). Les auteurs concluent que les trajectoires préférentielles empruntées par les individus ayant complété la remontée du ponceau correspondent aux zones de vitesses d'écoulement réduites présentes dans celui-ci. Ces zones permettent une dépense énergétique moindre pour les individus et leur utilisation augmente la probabilité de passage. La détermination des vitesses et des profondeurs préférentielles sélectionnées par les individus en fonction de celles disponibles lors de leurs tentatives de passage constitue un aspect du comportement de nage à considérer lors de l'évaluation de la capacité d'une espèce à franchir les ponceaux. Cela pourrait permettre, en comparant ces vitesses avec la vitesse moyenne déterminée pour l'ensemble du ponceau, d'élaborer et d'appliquer des facteurs de correction aux paramètres de vitesse d'écoulement utilisés dans les modèles de passage. Des facteurs de correction allant de 0,4 à 0,8 ont été développés pour les juvéniles de salmonidés par observations directe du comportement de nage et par calculs hydrauliques (Behlke, 1991) et peuvent être utilisés dans des modèles de simulation de passage.

La motivation des poissons à franchir un ponceau demeure par ailleurs un aspect comportemental incontournable, un ponceau ne pouvant en effet être franchi que si le poisson décide de faire une tentative. La motivation est tributaire de facteurs internes à l'individu (condition physiologique, réponse à des stimuli tels que la direction de l'écoulement ou des indices olfactifs) et externes (stimuli eux-mêmes comme les odeurs, l'écoulement, la température) (Castro-Santos et al., 2013). Une étude de Castro-Santos

(2004) a mis en évidence l'importance de la fréquence des tentatives sur le succès de passage des meuniers et des dorés, la probabilité de succès étant plus élevée avec un nombre grandissant de tentatives. Dans cette étude, les tentatives étaient plus fréquentes lorsque les vitesses d'écoulement étaient élevées à l'extrémité aval du ponceau. Le même auteur a observé, dans une étude subséquente, que la fréquence des tentatives chez la truite brune et l'omble de fontaine augmentait lorsque la vitesse de l'écoulement s'élevait (Castro-Santos et al., 2013). Ces deux études mettent en lumière l'importance de l'attraction exercée par les conditions hydrauliques en aval du ponceau en ce qui a trait à l'occurrence des tentatives et au succès de passage.

La capacité de saut, utile quant à elle pour entrer dans un ponceau dont l'extrémité aval est surélevée par rapport au cours d'eau, a fait l'objet d'une étude en laboratoire de Kondratieff et Myrick (2006). Ces auteurs ont déterminé que la capacité de l'omble de fontaine à franchir un obstacle vertical est influencée par la hauteur dudit obstacle, la profondeur du bassin situé immédiatement en aval ainsi que par la longueur et la condition physique du poisson. Cette dernière est définie dans l'étude par un score indiquant la présence ou l'absence de blessures aux nageoires, aux yeux, à l'opercule ou à la mâchoire de l'individu. Le modèle se définit comme suit :

$$P(succès) = \frac{e^{\beta 0} + \beta 1\ H1 + \beta 2\ H2 + \beta 3\ TL + \beta 4\ C + \beta 5\ D + \beta 6\ H1 * H2 + \beta 7\ H2 * TL + \beta 0\ EBV}{1 + e^{\beta 0} + \beta 1\ H1 + \beta 2\ H2 + \beta 3\ TL + \beta 4\ C + \beta 5\ D + \beta 6\ H1 * H2 + \beta 7\ H2 * TL + \beta 0\ EBV}$$

H1 : hauteur de la chute;
H2 : profondeur de la fosse aval;
TL : longueur totale du poisson;
C : condition du poisson;
D : durée de l'essai;
H1*H2 : interaction;
H2*TL : interaction;
EBV : effet aléatoire;

- β 0 : 4,81
- β 1 : -0,17
- β 2 : -0,03
- β 3 : 0,089
- β 4 : -0,48
- β 5 : -0,0017
- β 6 :0,001
- β 7 :-0,0016
- β 8 : -1,12

Le modèle développé par les auteurs doit toutefois s'appliquer avec précaution sur le terrain, la morphologie des obstacles n'étant pas toujours identique à celle d'un mur vertical.

Modélisation de la capacité de passage

L'intérêt grandissant pour la question de la perméabilité des ponceaux aux déplacements des espèces aquatiques a mené à la conception de modèles de succès de passage afin de prédire si un poisson d'une espèce et d'une longueur donnée peut franchir un ponceau sous des conditions hydrauliques spécifiques. Deux types de modèles se retrouvent dans la littérature : le modèle de type «distance de remontée» ou *ascent distance* et celui de type «seuil d'épuisement» ou *exhaustion threshold* (Neary, 2011).

Modèle de type «distance de remontée»

Ce type de modèle estime une distance maximale de remontée sous des conditions hydrauliques données pour un individu nageant à une vitesse optimale. Castro-Santos (2005) a élaboré une approche permettant de déterminer la vitesse de nage optimale permettant à un poisson de maximiser la distance maximale parcourue contre une vitesse d'écoulement donnée. Cette distance est ensuite comparée à la longueur de la barrière de vitesse afin de prédire le succès ou l'échec d'une tentative. Deux modèles de type «distance de remontée» sont présentés ici. Des prédictions de succès de passage de ces deux modèles ont été comparées avec des observations de terrain du présent projet. La correspondance entre les deux approches sera discutée dans la section sur les résultats.

Peake et al., (1997) et Castro-Santos (2005)

Peake et al., (1997) ont évalué les performances de nage de différentes espèces lors d'expériences de laboratoire et ont proposé un modèle permettant d'estimer la vitesse de nage de ces espèces et ce, pour différents modes de nage (soutenu, prolongé ou en sprint). Ainsi, la vitesse de nage soutenue peut être estimée à l'aide de l'équation suivante :

$$S = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z \quad (1)$$

où S correspond à la vitesse de nage en m/s, a_0 correspond à l'ordonnée à l'origine, a_1 est le coefficient de longueur, X correspond à la longueur à la fourche en cm, a_2 est le coefficient de température, Y correspond à la température en degrés Celsius, a_3 est le coefficient de temps et Z représente le log du temps en minute. Ce modèle a été établi à partir de données obtenues pour des poissons dont la taille variait entre 6,3 et 25,9 cm et pour une température de l'eau variant entre 14,0 et 20,0 °C (Peake et al., 1997). Le temps à l'épuisement pour différentes vitesses de nage prolongée est estimé en isolant le terme Z dans l'équation 1. La relation entre le temps à l'épuisement et la vitesse de nage prolongée suit généralement un modèle log-linéaire tel que décrit à l'équation 2 (Brett, 1964).

$$\ln T = a + bU_s \quad (2)$$

où T représente le temps à l'épuisement en secondes, U_s correspond à la vitesse de nage prolongée (en longueurs de corps par seconde), et a et b sont respectivement l'ordonnée à l'origine et la pente (Castro-Santos 2005).

Lorsqu'un poisson doit franchir une barrière de vitesse aux limites spatiales définies (e.g. un ponceau), la distance maximale qu'un poisson peut nager avant de se fatiguer doit être exprimée en distance de progression au sol (D_g) et prendre en compte la vitesse de l'écoulement. Les coefficients a et b de la relation entre le temps à l'épuisement et la vitesse de nage prolongée ont par la suite été utilisés afin de déterminer la distance maximale qu'un poisson peut parcourir face à une vitesse moyenne d'écoulement (U_f) donnée. Selon Castro-Santos (2005), D_g peut être déterminée à l'aide de l'équation 3:

$$D_g = \left(U_s - U_f\right) \times e^{a+bU_s} \quad (3)$$

où les vitesses sont en longueur de corps par seconde et la distance obtenue est exprimée en longueur de corps.

Pour un type de nage donné, la vitesse de nage optimale (U_{opt}), c'est-à-dire la vitesse permettant de parcourir une distance au sol maximale pour une vitesse moyenne d'écoulement (U_f) donnée, est définie par l'équation 4 (les vitesses sont exprimées en longueur de corps/s) (Castro-Santos 2005). La vitesse de progression au sol optimale (U_{gopt}) corresponds, en d'autres mots, à l'inverse de la pente (-1/b) de la relation de temps à l'épuisement du poisson. La vitesse de l'écoulement (U_f) s'ajoute à la vitesse au sol afin d'obtenir une vitesse de nage optimale (U_{opt}).

$$U_{opt} = U_f - 1/b \quad (4)$$

Ainsi, il est possible de remplacer le terme U_S de l'équation 3 par la vitesse optimale U_{opt} définie à l'équation 4 afin de déterminer la distance maximale pouvant être parcourue par un poisson pour une vitesse moyenne d'écoulement donnée en utilisant l'équation suivante (Castro-Santos 2005) :

$$D_g = \left[\left(U_f - 1/b\right) - U_f\right] \times e^{a+b\left(U_f - 1/b\right)} \quad (5)$$

où tous les paramètres de vitesse sont exprimés en longueur de corps/s et la distance obtenue en longueur de corps.

Cette distance maximale est alors comparée avec la longueur de la barrière de vitesse donnée, en l'occurrence un ponceau, afin de prédire si le poisson a la capacité physique de franchir le ponceau.

Castro-Santos et al., (2013)

Cette étude quantifie les performances de nage en sprint de deux espèces de salmonidés : la truite brune et l'omble de fontaine, avec des méthodes tentant d'imiter les conditions rencontrées en milieu naturel. Les tentatives et les succès de passage d'individus marqués de transpondeurs passifs et nageant librement dans un canal expérimental ouvert (20 x 0,8 m) sont enregistrées par dix antennes PIT-tags fixes. Les vitesses de nage et les distances maximales de remontée des individus sont ensuite calculées pour chaque tentative. Les performances de nage observées dans cette étude sont supérieures à ce qui avait été mentionné auparavant dans la littérature, suggérant une préalable sous-estimation de la capacité de nage de ces espèces. Une nouvelle approche prédictive, basée sur les données de temps à l'épuisement provenant des tentatives et des succès de passage des individus, est proposée dans cette étude.

Cette approche assume, tout comme l'approche décrite précédemment (Peake et al., 1997, Castro-Santos 2005), que les poissons utilisent une stratégie de maximisation de la distance parcourue au sol en adoptant une vitesse de nage optimale (U_{opt}) (équation 4). Les auteurs identifient deux modes de nage en sprint (modes sprint 1 et 2). La vitesse d'écoulement critique (Uf*crit*) à laquelle la transition entre les deux modes devrait se faire afin maximiser la distance parcourue est de 13.69 *BL*/s.

Application du modèle

Pour un ponceau donné et un omble de fontaine dont la longueur se situe entre 110 et 190 mm,

- Lorsque la vitesse de l'écoulement ≤ 13,69 *BL*/s : mode sprint 1;
- Lorsque la vitesse de l'écoulement >13,69 *BL*/s : mode sprint 2.

Mode sprint 1

La vitesse de progression au sol optimale (U_{gopt}) à laquelle cet individu doit nager afin de maximiser la distance parcourue est de 4,90 *BL*/s. Il faut y ajouter la vitesse de l'écoulement (Uf) afin d'obtenir une vitesse de nage optimale (U_{opt}).

L'équation 6 permet ensuite de calculer la distance (en *BL*) qu'il parcourt contre une vitesse d'écoulement (U_f) donnée:

$$D_g = (Ugopt + Uf) \times e^{a+b\left(U_f - 1/b\right)} \quad (6)$$

où a = 6,171 et b= -0,204

Mode sprint 2

La vitesse de progression au sol optimale (U_{gopt}) à laquelle cet individu doit nager afin de maximiser la distance parcourue est de 9,26 *BL*/s. Il faut y ajouter la vitesse de l'écoulement (Uf) afin d'obtenir une vitesse de nage optimale (U_{opt}).

La distance maximale d'ascension (en *BL*) de cet individu est :

$$D_g = (Ugopt + Uf) \times e^{a+b\left(U_f - 1/b\right)} \quad (7)$$

où a = 4,238 et b= -0,108

Les équations 6 et 7 sont illustrées par la figure 6, sur laquelle il est possible d'observer que la distance maximale d'ascension prédite est maximisée à une certaine vitesse de nage. Cette vitesse de nage optimale permettant de maximiser la distance parcourue varie selon la vitesse de l'écoulement. Il est également possible d'observer que la taille des individus a un effet positif sur la performance.

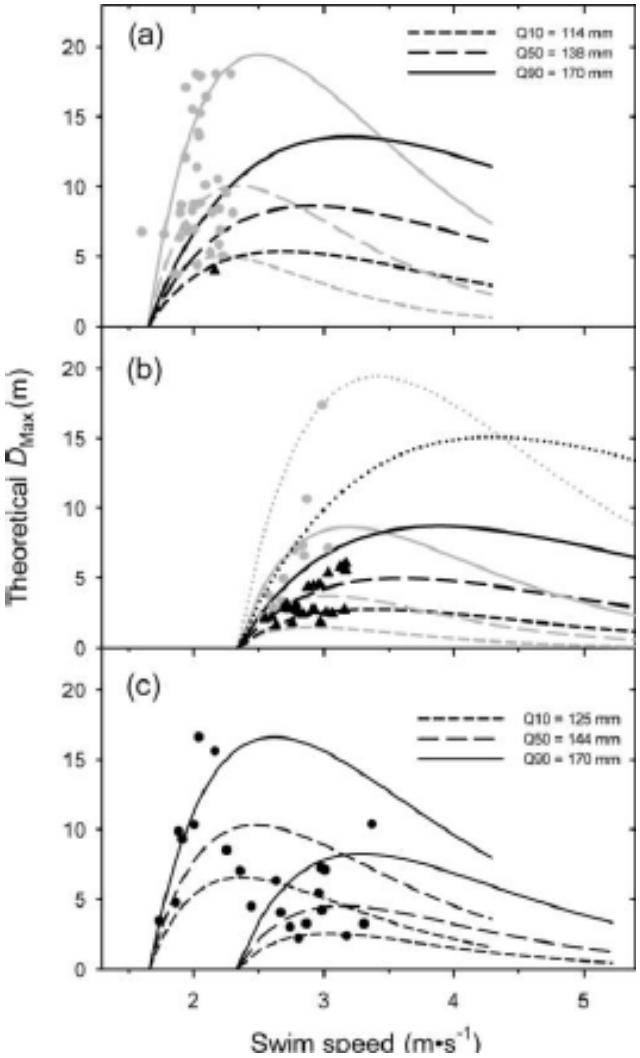


Figure 6: Distance maximale (en m) prédite par l'équation 6 en fonction de la vitesse de nage absolue (m/s) pour : (a) des ombles de fontaine testés à 1,6 m/s; (b) des ombles de fontaine testés à 2,5 m/s et (c) des truites brunes testées à 1,6 et 2,5 m/s. Les points gris indiquent des poissons nageant sous le mode sprint 1 et les triangles noirs ceux nageant sous le mode sprint 2. Les courbes illustrent les distances maximales de remontée calculées pour la gamme possible de vitesses de nage pour différentes longueurs de poissons de l'étude (10e, 50e et 90e percentiles).

Source : Castro-Santos et al., 2013

Modèle de type «seuil d'épuisement»

Le modèle de type seuil d'épuisement cherche à prédire le seuil de vitesse d'écoulement se traduisant par l'épuisement à une distance donnée de remontée dans le cas d'un individu progressant dans le ponceau à une vitesse optimale. Une vitesse d'écoulement égale ou supérieure au seuil se traduit par un échec de passage. Des exemples de courbes de seuil d'épuisement sont disponibles pour différentes espèces dans plusieurs études (Peake et al., 1997, Adams et al., 2000 and Benton 2006).

FishXing (Furniss et al., 2008), un logiciel permettant de simuler des tentatives de passage est basé sur un modèle de type «seuil d'épuisement». C'est actuellement le modèle le plus largement utilisé pour prédire la capacité d'un poisson d'une espèce donnée à franchir un ponceau sous des conditions hydrauliques variées. Il utilise, en premier lieu, des données de performance de nage par espèce et par gamme de taille afin de modéliser la capacité de passage. Ces données proviennent de diverses études majoritairement effectuées en laboratoire. En deuxième lieu, le modèle effectue des simulations hydrauliques afin de reconstituer, selon la gamme de débits envisagée et les caractéristiques du ponceau, la répartition des profondeurs et des vitesses moyennes d'écoulement à l'intérieur de celui-ci (pour des coupes transversales espacées d'un mètre). La capacité de nage en modes prolongé et sprint du poisson est mise en relation avec ces données hydrauliques pour chacune des coupes transversales du ponceau. Un algorithme de nage (annexe A) détermine le temps à l'épuisement du poisson sous les conditions d'écoulement en vigueur et la distance maximale parcourue au moment de l'épuisement. L'algorithme n'utilise pas la vitesse de nage optimale, mais plutôt la vitesse de nage prolongé que le poisson peut maintenir durant dix minutes ou autre délai choisi par l'utilisateur. Au terme des estimations, si la distance maximale atteinte au seuil d'épuisement en mode prolongé est inférieure à la longueur du ponceau, FishXing estime si le poisson peut franchir la distance restante en sprint. Dans la négative, il prédit un échec et permet de visualiser la distance de remontée du poisson.

Certains auteurs s'interrogent sur l'efficacité de FishXing à prédire adéquatement l'issue d'une tentative de passage pour certaines espèces. Solcz (2007) a observé pour la truite fardée une correspondance de 50% entre ses observations de terrain et les prédictions du modèle tandis que Burford et al., (2009) observe une correspondance de 17% et une tendance du modèle à surestimer le nombre de ponceaux infranchissables. Cahoon et al., (2007) ont observé, pour la truite fardée et l'omble de fontaine, une correspondance de 48% entre les prédictions de FishXing et des observations directes de passage effectuées sur le terrain. Selon cette étude, FishXing tend à être très conservateur dans son évaluation de la perméabilité des ponceaux aux mouvements des poissons. Il surestime donc le nombre de ponceaux infranchissables. Le fait que les données de nage utilisées par le modèle proviennent de travaux effectués en laboratoire rend difficile leur application sur le terrain, les conditions d'écoulement et la motivation des individus pouvant y être très différentes (Castro-Santos 2004, Gardner 2006). La correspondance

de FishXing avec les résultats des travaux de terrain sera discutée dans la section sur les résultats.

En résumé

Malgré le fait que plusieurs études se soient intéressées au passage des poissons dans les ponceaux, les divers critères régissant la capacité des poissons à franchir ces structures ne sont pas encore pleinement connus et compris. Certains aspects sont difficiles à quantifier, par exemple l'utilisation par les poissons de zones de vitesses d'écoulement réduites dans les ponceaux et le comportement de nage des individus (utilisation d'un ou de deux types de nage combinés, choix préférentiel de vitesse et de profondeur en fonction de celles disponibles lors de la remontée). La capacité de nage constitue un critère biologique d'importance pour déterminer le succès de passage. Malheureusement, il existe peu d'études qui fournissent des données quantitatives sur la performance de nage en sprint des poissons et cette lacune est problématique pour la conception des passes migratoires et des ponceaux (Haro et al., 2004). De plus, lorsque des données décrivant la capacité de nage globale d'une espèce de poisson existent, elles proviennent d'expériences menées en laboratoire sous des conditions contrôlées et elles sont difficilement applicables, sur le terrain, à la détermination de la capacité de passage du poisson dans un ponceau (Castro-Santos, 2004, Coffman 2005, Gardner 2006). Il existe donc un important besoin d'obtenir, en conditions naturelles, les données permettant de modéliser la capacité biologique des poissons à franchir les ponceaux. Ce besoin est particulièrement important, au Québec, pour l'omble de fontaine, espèce présente sur une grande proportion du territoire et donc susceptible d'être largement affectée par les ponceaux.

Il n'existait pas, jusqu'à récemment, de méthodes efficaces pour obtenir en conditions naturelles les données nécessaires à la modélisation de la capacité des poissons à franchir les ponceaux. Ces données devraient idéalement fournir des informations en continu sur les tentatives de passage de chacun des individus à l'étude, afin de suivre leur progression à l'intérieur d'un ponceau sous différentes conditions hydrauliques. Ceci afin de déterminer non seulement le succès de passage du poisson mais également sa vitesse de nage au sol, le moment où il se fatigue et l'endroit où il rebrousse chemin dans le cas d'un échec. Les techniques de marquage-recapture, par exemple celles utilisant des implants visibles d'élastomère (VIE-tag; Northwest Marine Technology) ou des marques sur les nageoires, permettent de déterminer si des individus ont franchi un ponceau, mais sans connaissance exacte du moment. La détermination des conditions hydrauliques dans le ponceau au moment où l'individu l'a franchi est donc difficile. Des développements récents dans la technologie des transpondeurs passifs intégrés (PIT-tags) permettent dorénavant d'obtenir des données en continu sur les tentatives de passage de poissons dans des ponceaux (Solcz 2007, Connolly et al., 2008). Couplée à des mesures directes des conditions hydrauliques ayant cours dans le ponceau au moment des tentatives de passage, une telle approche va permettre un nouveau regard

sur la façon dont les salmonidés se déplacent à l'intérieur des structures de franchissement des cours d'eau et sur les facteurs régissant leur capacité à les franchir.

MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le projet vise à donner suite aux engagements pris par le ministère des Transports dans le cadre de l'entente administrative MTQ-MRNF-MDDEP signée en 2009, soit d'effectuer une étude concernant le passage de l'omble de fontaine dans différents types de ponceaux et d'évaluer si les conceptions de ponceaux respectent la stratégie de développement durable dont s'est dotée le ministère.

En fonction des différents éléments qui limitent actuellement la modélisation de la capacité des ombles à franchir les ponceaux, les objectifs du projet étaient de :

1) développer et tester une nouvelle approche utilisant la technologie des transpondeurs passifs afin de déterminer, sur le terrain, la capacité des poissons à franchir les ponceaux.

2) réaliser des travaux de terrain permettant de déterminer les critères biologiques et les conditions hydrauliques qui régissent la capacité des ombles de fontaine à franchir les ponceaux.

3) réaliser des travaux de terrain permettant de comparer les caractéristiques d'écoulement et la capacité de passage des ombles de fontaine dans des ponceaux rugueux (en tôle ondulée) et lisse (en béton ou polyéthylène) afin d'évaluer les impacts réels de la réfection de ponceaux à l'aide de la technique d'insertion.

4) développer un modèle prédictif du succès de passage des ombles de fontaine dans les ponceaux intégrant des variables biologiques (e.g. espèce, âge, taille, facteur de condition), hydrauliques (e.g. vitesse du l'eau, profondeur d'eau, débit) et environnementales (e.g. luminosité, température de l'eau).

MÉTHODOLOGIE

Approche générale

L'approche générale pour atteindre les objectifs du projet consistait à utiliser la technologie des transpondeurs passifs intégrés (PIT-tags) afin d'étudier, sur le terrain, la capacité de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux. Au cours du projet, plusieurs ponceaux possédant des caractéristiques morphométriques variées (revêtement lisse ou rugueux, longueur, diamètre, pente) ont été instrumentés avec des systèmes PIT-tags fixes. De tels systèmes permettent, dans le cas d'un ponceau, d'observer en continu les mouvements des ombles sur toute la longueur de la structure. À chacun de ces ponceaux, la capacité d'ombles de différentes tailles à franchir le ponceau en fonction des caractéristiques morphométriques et hydrauliques de celui-ci ainsi que de variables environnementales telles que la luminosité et la température de l'eau a été étudiée.

Localisation des sites d'études

Les sites d'étude (tableau 1) utilisés sont situés dans deux régions du Québec : le Saguenay Lac-Saint-Jean et Chaudières-Appalaches. Les premiers ponceaux instrumentés en 2009 et 2010 étaient situés sur des tributaires de la rivière Sainte-Marguerite (Saguenay) : les ruisseaux Résimond, Allaire et Morin. Les ponceaux étaient de type circulaire en tôle ondulée (Résimond et Morin) et rectangulaire en béton armé (Allaire). En 2011, quatre nouveaux sites ont été instrumentés dans le secteur des Monts Valins (Saguenay). Ces quatre ponceaux, tous de type circulaire en tôle ondulée galvanisée, étaient situés sur les ruisseaux Saumons, des Femmes, Adolphe et Raquette, des tributaires de la rivière Saint-Louis. Durant la même période, deux ponceaux circulaires en béton armé ont été instrumentés en Chaudières-Appalaches, sur des tributaires des rivières Palmer et Bagot, elles-mêmes tributaires directs de la rivière Bécancour. En 2012, des travaux additionnels ont été effectués sur les ponceaux de béton de la région Chaudières-Appalaches.

Tableau 1: Localisation et caractéristiques des sites d'étude

Site	Région	Bassin-versant	Route	Latitude	Longitude	Type	Diamètre	Longueur
Resimond	Saguenay	Sainte-Marguerite	172	48°25'52"N	70°26'03"W	TTOG	1600	44,6
MorinA	Saguenay	Sainte-Marguerite	172	48°20'50"N	70°03'39"W	TTOG	1500	33,2
MorinB	Saguenay	Sainte-Marguerite	172	48°20'50"N	70°03'39"W	TTOG	2200	32,3
MorinC	Saguenay	Sainte-Marguerite	172	48°20'50"N	70°03'39"W	TTOG	2200	33
MorinD	Saguenay	Sainte-Marguerite	172	48°20'50"N	70°03'39"W	PE	2200	32,4
Allaire	Saguenay	Sainte-Marguerite	172	48°21'19"N	70°07'07"W	PBA	2000	18,4
Femmes	Saguenay	Saint-Louis	ch. ZEC Onatchiway	48°43'10"N	70°55'26"W	TTOG	2000	17,9
Adolphe	Saguenay	Saint-Louis	ch. ZEC Onatchiway	48°46'38"N	70°49'25"W	TTOG	2000	14,3
Raquette	Saguenay	Saint-Louis	?	48°38'59"N	70°55'22"W	TTOG	2700	8,6
Saumons	Saguenay	Saint-Louis	ch. ZEC Onatchiway	48°47'38"N	70°47'59"W	TTOG	1900	18,1
SA	Chaudière-App.	Bécancour	323	46°05'40"N	71°25'58"W	TBA	2100	17,5
SA2	Chaudière-App.	Bécancour	323	46°05'40"N	71°25'58"W	TBA	2200	18,2
SJ	Chaudière-App.	Bécancour	271	46°18'55"N	71°18'49"W	TBA	1500	19,2

* TTOG = rugueux; PE, PBA et TBA = lisse

TTOG = tuyau de tôle ondulée galvanisée; TBA: tuyau de béton armé; PBA: ponceau de béton armé; PE: tuyau de polyéthylène

Récolte des données

Passage des ombles dans les ponceaux

La capacité des ombles à franchir chacun des ponceaux a été déterminée à l'aide de la technologie des transpondeurs passifs intégrés. Il est important de souligner ici que la capacité de passage réfère à l'aptitude du poisson à franchir le ponceau en fonction des conditions hydrauliques en vigueur à l'intérieur de celui-ci. Tous les essais ont été effectués avec des hauteurs de chutes à l'extrémité aval des ponceaux inférieures à dix centimètres. À chaque ponceau, 24 ombles de fontaine répartis de façon égale en trois groupes de tailles (petits [85 à 119 mm], moyens [120 à 149 mm], grands [150 mm +]) ont été capturés par pêche électrique (figure 7), pesés, mesurés et marqués à l'aide de transpondeurs passifs d'une longueur de 23 mm et d'un poids de 0,6 grammes (TIRIS, Texas Instruments).

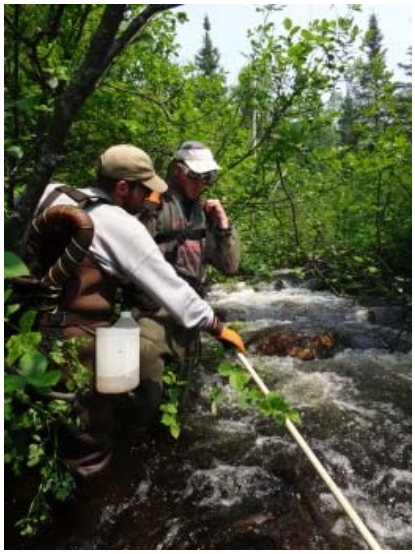


Figure 7: Pêche électrique
Source : Elsa Goerig (INRS), 2013

Le marquage se fait par chirurgie abdominale (figure 8) après immersion du poisson dans une solution anesthésiante composée d'une dilution d'huile essentielle de clous de girofle dans de l'éthanol à raison d'une part d'huile pour dix parts d'éthanol (Taylor and Roberts, 1999, Chanseau et al., 2002). La concentration de la solution anesthésiante est de 0,7 à 0,9 ml de solution pour 1420 ml d'eau, selon la température de l'eau. L'incision, d'une longueur de 5 à 8 mm, est refermée avec de la colle chirurgicale (Vetbond 3M).

Figure 8: À gauche : insertion d'un PIT-tag par chirurgie abdominale
Source : Christine Larouche (INRS), 2011

Les ombles sont ensuite relâchés dans une cage dont la seule ouverture donne sur l'extrémité aval du ponceau (figure 9).Quatre antennes PIT-tags fixes installées à intervalles réguliers à l'intérieur du ponceau (figure 10 et 11) permettent de détecter et d'enregistrer en continu le passage des poissons marqués dans un système d'acquisition des données alimenté en énergie par des batteries et un panneau solaire. Ce système, de type *half-duplex*, charge les quatre antennes successivement à une fréquence de 2,5 fois par seconde. Dans le cas où un poisson marqué d'un transpondeur est à proximité de l'antenne au moment où elle est chargée, celle-ci énergise le transpondeur qui, à son tour, retransmet son code unique à l'antenne. Ce

code est alors enregistré dans le système d'acquisition des données avec le numéro de l'antenne correspondante et le moment de la détection à la seconde près.

Figure 9:(à gauche): cage fixée à l'aval d'un ponceau
Figure 10: (à droite): antenne PIT-tag installée à l'aval d'un ponceau
Source : J.B. Torterotot (INRS), 2010

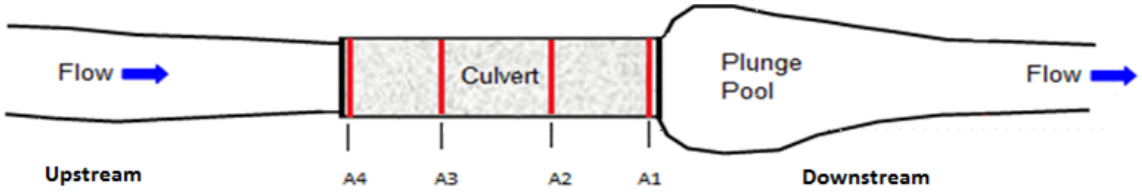


Figure 11: Schéma de la localisation des antennes PIT-tags dans un ponceau

Source : Elsa Goerig (INRS), 2012. Adapté d'un dessin de Cahoon et al., 2005

Chaque essai en conditions semi-expérimentales (avec cage) dure 48 heures, au terme desquelles les poissons n'ayant pas franchi le ponceau sont retirés de la cage et relâchés en aval du ponceau. Les données recueillies par le système d'antennes permettent de déterminer si les poissons marqués ont tenté d'entrer dans le ponceau, comment ils se sont déplacés à l'intérieur et s'ils ont réussi à le franchir. L'essai est répété pour diverses conditions de vitesse et de température de l'eau. Lors de certaines périodes où la variabilité naturelle n'était pas assez grande, les conditions hydrauliques ont été manipulées avec un système permettant de faire varier le débit entrant dans le ponceau (figure 12).

a) b)

Figure 12: Système permettant de faire varier le débit dans a) une section du ponceau; b) un ponceau à trois tuyaux.
Source : Elsa Goerig (INRS), 2009.

Après certains essais en conditions semi-expérimentales, un essai similaire a été réalisé sur le même ponceau, mais avec une approche dite «en conditions libres». Dans cette approche n'utilisant pas de cage, les ombles marqués avec un transpondeur passif sont simplement relâchés en aval du ponceau et le système d'antennes fixes est laissé en fonction pour une période de 72 heures afin d'enregistrer les tentatives et les passages des individus marqués. Cette approche permet d'observer les tentatives de passage d'ombles libres de leurs mouvements et de vérifier ainsi si l'utilisation d'une cage est susceptible d'avoir une incidence sur les tentatives et le succès de passage.

Capacité de nage

La capacité de nage des ombles de fontaine est un critère biologique régissant leur aptitude à franchir les ponceaux. La capacité de nage est composée de deux éléments interreliés : la vitesse de nage qu'un individu peut atteindre et son endurance, ou l'intervalle de temps pendant lequel il peut maintenir une certaine vitesse de nage. La vitesse de nage des ombles traversant le ponceau est déterminée en utilisant les informations suivantes : le temps écoulé entre la détection du poisson par deux antennes subséquentes et la distance entre ces deux antennes, mesurée au centimètre près. Pour un omble traversant avec succès un ponceau, quatre vitesses seront calculées à l'aide de l'équation 8 : trois vitesses dites de progression (entre chaque antenne) et une vitesse moyenne sur l'ensemble du ponceau.

Vitesse de nage entre deux antennes

U_g (ou vitesse de progression au sol (*groundspeed*)):

$$U_g = \frac{D}{T}(A2 - A1) \quad (8)$$

où *T* est le temps écoulé entre la détection de la première antenne (*A1)* et celle de la deuxième (*A2)* et *D* est la distance entre ces deux antennes. Cette vitesse est exprimée en mètre par seconde (m/s).

La vitesse démontrée sur l'ensemble de la distance parcourue dans le ponceau sera calculée en utilisant le temps et la distance entre l'antenne 1 (située à l'extrémité aval) et l'antenne maximale atteinte lors de la tentative de remontée.

Pour exprimer la vitesse au sol (U_g) en vitesse de nage (U_s), il est nécessaire d'y ajouter la vitesse de l'écoulement :

$$Us = Ug + Uf \quad (9)$$

Relation vitesse de nage-fatigue

La fatigue se définit ici comme un choix volontaire d'abandonner l'effort. Dans le cas où un poisson franchit avec succès le ponceau, il n'y a pas d'observation de fatigue. Il se peut également que le poisson ne traverse pas le ponceau d'un seul coup, mais s'arrête plutôt à l'intérieur de celui-ci pendant un certain temps, éventuellement pour se reposer. Cela doit être pris en compte dans l'analyse des vitesses de nage et des observations de fatigue.

Variables hydrauliques

Pendant la période d'étude, le niveau d'eau du ruisseau a été enregistré en continu à toutes les quinze minutes à l'aide d'une sonde à pression hydrostatique installée à proximité du ponceau et mis en relation avec des courbes niveau-débit (établies pour chaque site). Cette sonde, également munie d'un thermographe, permettra de reconstituer la variation dans le temps du débit et de la température de l'eau du ruisseau, et ce pendant toute la durée des travaux de terrain sur chacun des sites. Au début de chacun des essais de passage, des profils de profondeur et de vitesse d'écoulement sont mesurés à plusieurs stations de mesure à l'intérieur du ponceau (ainsi qu'aux extrémités aval et amont de celui-ci) à l'aide d'un courantomètre électromagnétique (Marsh-McBirney Flow-Mate 2000 model) ou à hélice (Swoffer 3000, 2011). Les stations de mesure sont espacées d'un mètre pour un ponceau d'une longueur inférieure à 15 mètres et de deux mètres pour un ponceau d'une longueur supérieure à 15 mètres et ce, afin de s'assurer un nombre adéquat (≥ 8) de stations de mesure à chacun des sites. À chacune de ces stations, trois mesures (au ¼, à la ½ et au ¾ de la coupe transversale) ont été effectuées de façon à décrire la distribution latérale des profondeurs et des vitesses moyennes d'écoulement dans la coupe transversale (figure 13). La vitesse d'écoulement moyenne a été mesurée comme la moyenne des vitesses instantanées sur un intervalle de trente secondes, à une localisation dans la colonne d'eau équivalente à 0,4 (40%) du fond du ponceau. Une mesure du débit a également été effectuée à chacun des essais de passage.

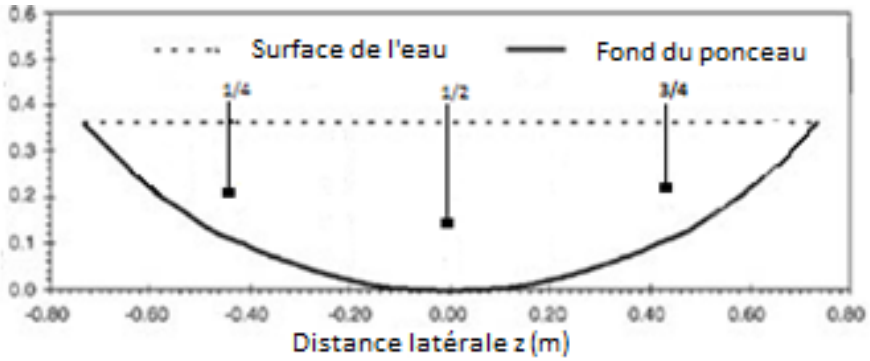


Figure 13: Localisation des mesures de vitesses et de profondeur de l'eau dans la coupe transversale d'un ponceau, effectuées à chaque station de mesure

Source : Elsa Goerig (INRS), 2012

RÉSUMÉ DES TRAVAUX EFFECTUÉS

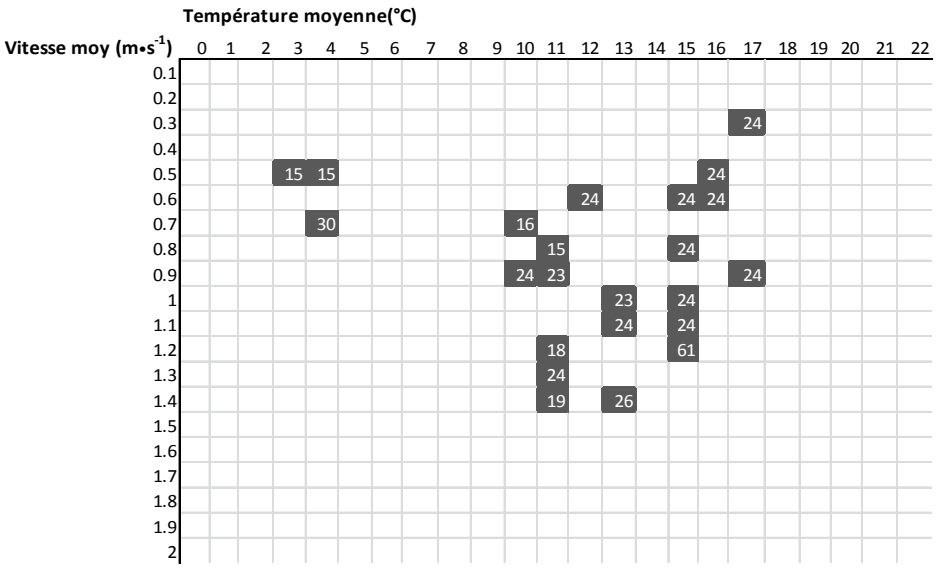
1090 individus ont été testés dans 50 essais de passage (tableau 2). Durant le projet de recherche, 25 essais ont été effectués dans des ponceaux rugueux et 25 dans des ponceaux lisses. Le tableau 3 illustre les conditions de température et de vitesse de l'eau présentes dans les essais ainsi que le nombre d'individus testés pour chaque condition. Des individus additionnels ont toutefois été utilisés afin de valider des aspects de la méthodologie ou dans des essais n'ayant pas généré de données en raison de problèmes d'ordre technique ou météorologique. Un récapitulatif de tous les essais (50) effectués est présenté au tableau 4.

Tableau 2: Nombre d'individus testés par type de ponceau et condition expérimentale

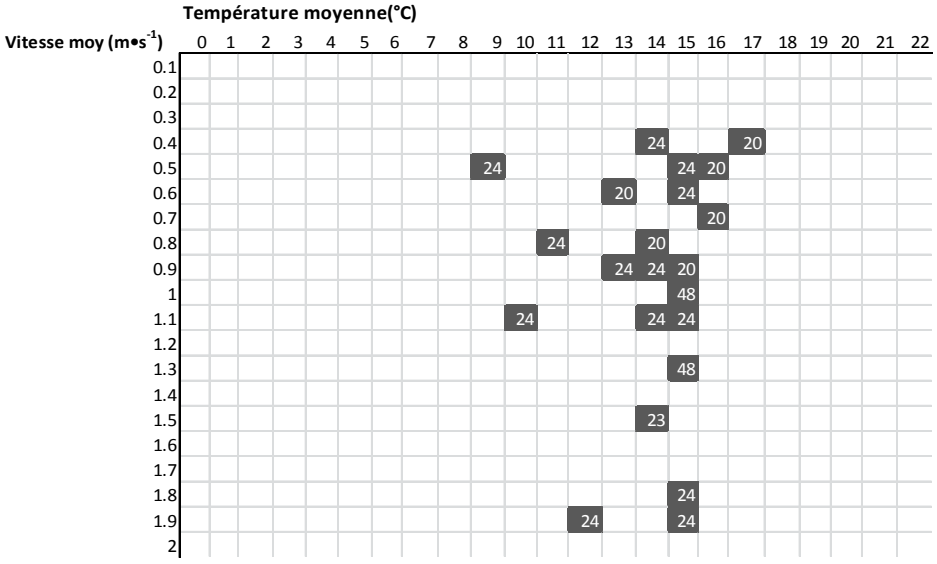
Type de ponceau	**Conditions**		
	Libre	**Semi-expérimentale**	**Total**
Lisse	131	433	564
Rugueux	114	412	526
Total	245	845	1090

Tableau 3: Matrice des conditions de température et vitesse de l'eau testées pour chaque type de ponceaux

RUGUEUX



LISSE



Les chiffres inscrits dans les cases correspondent au nombre d'individus testés pour chaque condition.

Tableau 4: Récapitulatif des caractéristiques des essais de passage, 2009 à 2012

Note:

- **Le terme «tentative» réfère au nombre d'individus ayant effectué une tentative sur le nombre total d'individus dans l'essai.**
- **Le terme «succès» réfère au nombre d'individu ayant réussi à franchir le ponceau sur le nombre total d'individus ayant fait au moins une tentative.**

Année	Essai	Date	Durée (h)	Individus (n)	Type ponceau	Approche	Débit ($m^{3/s}$)	Vitesse eau (m/s)	Profondeur (m)	Température eau (°C)	Pente (%)	Longueur (m)	Tentative (n)	Succès (n)	Succès (%)	Tentative (%)
2009	Resimond1	06/10/09	24	15	métal ondulé	semi-expérimentale	0,14	0,85	0,24	11,4	0,92	44,6	6	4	67	40
	Resimond2	08/10/09	24	16	métal ondulé	semi-expérimentale	0,13	0,79	0,25	10,7	0,92	44,6	4	2	50	25
	Morin A1	13/10/09	24	15	métal ondulé	semi-expérimentale	0,22	0,77	0,23	4,7	1,38	33,2	8	0	0	53
	Morin A2	14/10/09	24	15	métal ondulé	semi-expérimentale	0,22	0,77	0,23	4,5	1,38	33,2	6	0	0	40
	Morin B1	21/10/09	24	16	métal ondulé	semi-expérimentale	0,14	0,58	0,17	3,3	1,38	33,2	7	0	0	44
	Morin B2	22/10/09	24	15	métal ondulé	semi-expérimentale	0,14	0,58	0,17	4,5	1,38	33,2	6	0	0	40
2010	Morin 1	30/06/10	48	24	métal ondulé	semi-expérimentale	0,07	0,65	0,17	12,2	1,38	33,2	20	14	70	83
	Morin 2	07/07/10	48	24	métal ondulé	semi-expérimentale	0,2	0,92	0,22	17,3	1,38	33,2	13	11	85	54
	Morin 3	09/07/10	48	24	métal ondulé	semi-expérimentale	0,08	0,61	0,15	16,4	1,38	32,3	19	16	84	79
	Morin 4	12/07/10	48	24	métal ondulé	semi-expérimentale	0,11	0,82	0,17	15,1	1,38	32,3	17	15	88	71
	Allaire 5	22/07/10	48	24	béton armé	semi-expérimentale	0,06	0,39	0,11	17,2	0,28	18,4	10	7	70	42
	Allaire 6	07/08/10	48	24	béton armé	semi-expérimentale	0,08	0,58	0,11	15	0,28	18,4	16	15	94	67
	Morin 7	20/08/10	48	24	métal ondulé	semi-expérimentale	0,05	0,67	0,09	15,6	1,38	32,3	10	9	90	42
	Morin 8	25/08/10	48	24	polyéthylène	semi-expérimentale	0,05	1,34	0,06	15,7	1,38	33,2	2	0	0	8
	Morin 9	31/08/10	48	24	métal ondulé	semi-expérimentale	0,04	0,58	0,07	16,2	1,38	32,4	14	10	71	58
	Allaire 11	09/09/10	48	25	béton armé	semi-expérimentale	0,37	0,81	0,23	11,8	0,28	18,4	23	22	96	92
	Morin 10	06/09/10	48	24	polyéthylène	semi-expérimentale	0,11	1,81	0,1	15,1	1,38	32,4	7	0	0	29
	Morin 12	17/09/10	48	26	métal ondulé	semi-expérimentale	0,28	1,34	0,23	11,3	1,38	33,2	18	4	22	69
	Allaire 13	21/09/10	27	24	béton armé	semi-expérimentale	0,19	0,57	0,19	9,8	0,28	18,4	18	11	61	75

2011	SA_1b	17/06/11	72	24	béton armé	libre	n/a	1,96*	0,06	13,4	4,51	17,5	9	0	0	38
	SJ_2a	28/06/11	48	24	béton armé	semi-expérimentale	0,02	0,48	0,08	14,9	1,15	19,2	13	12	92	54
	SJ_2b	01/07/11	72	24	béton armé	libre	0,01	0,6	0,06	15,2	1,15	19,2	5	3	60	21
	SA_3a	06/07/11	48	24	béton armé	semi-expérimentale	n/a	1,08*	0,03	14,2	4,51	17,5	21	2	10	88
	SA_3b	08/07/11	72	24	béton armé	libre	n/a	1,3*	0,04	15	4,51	17,5	5	0	0	21
	SJ_4b	05/08/11	70	24	béton armé	libre	0,03	0,98	0,05	13,4	1,15	19,2	1	1	100	4
	SA_5a	09/08/11	48	24	béton armé	semi-expérimentale	0,008	1,07	0,03	15,4	4,51	17,5	17	1	6	71
	SA_5b	11/08/11	72	23	béton armé	libre	0,03	1,5	0,04	14,5	4,51	17,5	1	0	0	4
	SA_6b	19/08/11	72	24	béton armé	libre	0,01	1,17	0,03	15,4	4,51	17,5	7	0	0	29
	effetpittag1a	23/08/11	48	24	béton armé	semi-expérimentale	0,04	1,18	0,08	14	1,15	19,2	15	14	93	63
	effetpittag1b	25/08/11	48	24	béton armé	semi-expérimentale	0,03	0,9	0,06	14	1,15	19,2	12	11	92	50
	SA7a	09/09/11	48	24	béton armé	semi-expérimentale	0,04	1,99	0,06	11,8	4,51	18,2	11	0	0	46
	effetpittag2a	21/09/11	24	24	béton armé	semi-expérimentale	0,04	1,1	0,09	10,7	1,15	19,2	19	2	11	79
	Sau1b	05/07/11	71	19	métal ondulé	libre	0,12	1,42	0,17	11,3	3,9	18,1	1	1	100	5
	Sau1a	08/07/11	48	18	métal ondulé	semi-expérimentale	0,14	1,26	0,17	11	3,9	18,1	7	2	29	39
	Fem2a	11/07/11	44	24	métal ondulé	semi-expérimentale	0,23	1,26	0,23	15,2	2,4	17,9	3	1	33	13
	Fem3a	13/07/11	42	14	métal ondulé	semi-expérimentale	0,23	1,26	0,22	15,5	2,4	17,9	6	4	67	43
	Fem3b	15/07/11	71	23	métal ondulé	libre	n/a	1,23	0,2	15,6	2,4	17,9	3	3	100	13
	Raq4b	21/07/11	42	24	métal ondulé	libre	0,37	0,98	0,28	10,4	1,8	8,6	0	0	0	0
	Fem5a	23/07/11	48	24	métal ondulé	semi-expérimentale	0,33	1,13	0,26	15,6	2,4	17,9	15	11	73	63
	Raq4a	25/07/11	48	23	métal ondulé	semi-expérimentale	0,25	0,96	0,23	11,2	1,8	8,6	14	0	0	61
	Ado6a	03/08/11	48	23	métal ondulé	semi-expérimentale	0,33	1,03	0,28	13,5	1,6	14,3	10	0	0	43
	Ado6b	05/08/11	72	24	métal ondulé	libre	0,22	1,01	0,23	15,7	1,6	14,3	1	1	100	4
	Fem7a	09/08/11	48	26	métal ondulé	semi-expérimentale	0,85	1,43	0,42	13,7	2,4	17,9	3	1	33	12
	Fem7b	11/08/11	48	24	métal ondulé	libre	0,9	1,14	0,46	13,2	2,4	17,9	1	0	0	4
2012	effetpittag3a	04/07/12	46	20	béton armé	semi-expérimentale	0,039	0,99	0,07	15	1,15	19,2	4	1	25	20
	effetpittag3b	06/07/12	46	20	béton armé	semi-expérimentale	0,023	0,88	0,07	14,2	1,15	19,2	8	7	88	40
	effetpittag4a	16/07/12	46	20	béton armé	semi-expérimentale	0,018	0,79	0,05	16	1,15	19,2	10	10	100	50
	effetpittag4b	18/07/12	46	20	béton armé	semi-expérimentale	0,011	0,66	0,05	13,5	1,15	19,2	5	5	100	25
	effetpittag5a	28/07/12	46	20	béton armé	semi-expérimentale	0,008	0,53	0,03	16,7	1,15	19,2	9	8	89	45
	effetpittag5b	30/07/12	46	20	béton armé	semi-expérimentale	0,005	0,49	0,04	17,6	1,15	19,2	12	11	92	60

* vitesses de surface avec facteur de correction de 0,9

RÉSULTATS

Les principaux résultats obtenus à ce jour seront présentés dans les pages qui suivent, selon chacun des objectifs du projet.

Objectif 1

Développer et tester une nouvelle approche utilisant la technologie des transpondeurs passifs afin de déterminer, sur le terrain, la capacité des poissons à franchir les ponceaux.

La méthode développée comporte de nombreux avantages pour étudier la capacité des poissons à franchir les ponceaux. Elle permet non seulement de déterminer le succès ou l'échec de tentatives de passage, mais également la vitesse de progression des ombles et la distance maximale qu'ils ont parcourue à chacune de leurs tentatives.

La distance maximale de remontée calculée pour nos individus comporte toutefois deux imprécisions. La première est liée à la résolution spatiale des mesures de distances maximales mesurées par les quatre antennes PIT. Un omble peut ainsi avoir largement dépassé l'antenne 1, mais ne pas avoir été détecté à l'antenne 2. Sa distance maximale de remontée sera alors la distance de l'antenne 1. Deuxièmement, les ombles ayant été détectés à l'antenne 4 ont possiblement nagé plus loin, mais il est impossible de le savoir. La distance maximale de remontée n'est donc pas synonyme de distance absolue jusqu'à laquelle le poisson peut nager avant de se fatiguer. En résumé, la distance maximale calculée tend globalement à sous-estimer la distance de remontée réelle du poisson dû au faible degré de résolution spatiale du système d'antennes. Elle constitue toutefois une indication de la performance de nage des ombles sous les conditions hydrauliques en vigueur au moment de la tentative de passage. Obtenir une résolution spatiale plus fine est possible en augmentant le nombre d'antennes dans le ponceau. Cela permettrait de déterminer avec plus de précision la distance maximale de remontée des ombles ainsi que l'endroit où ils se fatiguent dans le cas de l'abandon d'une tentative. Le calcul des vitesses de progression serait également plus précis. Le coût d'un tel système est par contre beaucoup plus élevé et sa composante technologique plus lourde. Un système comportant 20 antennes a été testé dans un ponceau de 63 mètres en 2012 durant la période de reproduction de l'omble de fontaine et a remarquablement bien fonctionné (figure 14).

Figure 14: Système PIT à haute résolution spatiale

Source : Elsa Goerig (INRS), 2012.

Efficacité des systèmes PIT-tag

L'étendue et l'efficacité de détection des systèmes PIT half-duplex a été testée avant chaque essai de passage afin de s'assurer que le système fonctionnait de façon optimale. Il est en effet possible qu'un poisson ne soit pas détecté par une ou plusieurs antennes et ce, pour de multiples raisons. Par exemple, dans le cas où un poisson se déplace à une vitesse très élevée (souvent lors d'un mouvement vers l'aval) ou dans celui où plusieurs individus sont détectés simultanément sur une même antenne, il est possible que des détections soient manquées. Une étude récente (Burnett et al., 2012) a observé une efficacité de détection de 91% (±1,8%) pour des systèmes PIT-tags half-duplex et des transponders 23 mm. Une observation attentive des données de détection semble démontrer une efficacité de détection élevée dans le présent projet. Toutefois, une analyse détaillée de l'efficacité des systèmes utilisés dans cette étude sera effectuée dans le cadre de la thèse de doctorat.

Utilisation d'une cage

La majorité des ombles (845/1090) ont été testés dans une cage fixée à l'aval du ponceau. La proportion restante (245/1090) a simplement été relâchée en aval du ponceau (dite «free-range»). L'utilisation de la cage permettait de conserver des individus disponibles pour faire des tentatives de passage et ce, pendant une période de temps déterminée (48h dans la plupart des cas). Le fait d'être confinés dans une cage peut avoir un effet sur la propension des ombles à effectuer des tentatives et sur le succès de celles-ci, malgré qu'ils soient libres de leurs mouvements et non forcés à nager. La figure 15 illustre le fait que la cage tend à augmenter la proportion d'individus d'un essai qui effectuent au moins une tentative (50%). Le nombre médian de tentative par individu ne change pas selon que ceux-ci aient été testés dans une cage ou librement dans le ruisseau (figure 16). La distribution du nombre de tentatives par

individu montre cependant beaucoup de valeurs extrêmes, ce qui signifie que, chez certains ombles, le fait d'être confinés dans une cage stimule leur propension à effectuer de multiples tentatives. Enfin, il ne semble pas y avoir de différence entre la proportion moyenne d'individus par essai effectuant au moins un passage selon l'utilisation ou non de la cage (figure 17).

Les ombles ayant effectué au moins une tentative (n = 532) sont utilisés dans les analyses portant sur l'effet des différentes variables étudiées sur le succès de passage.

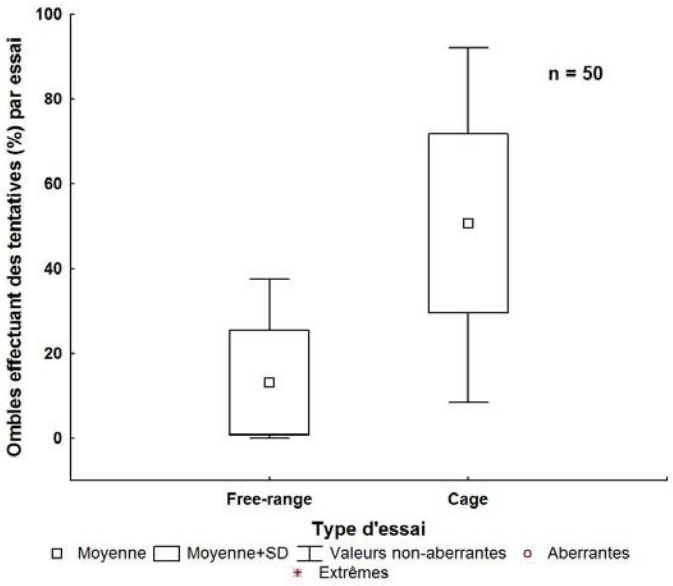


Figure 15: Effet de la cage sur la proportion d'individus d'un essai ayant effectué au moins une tentative

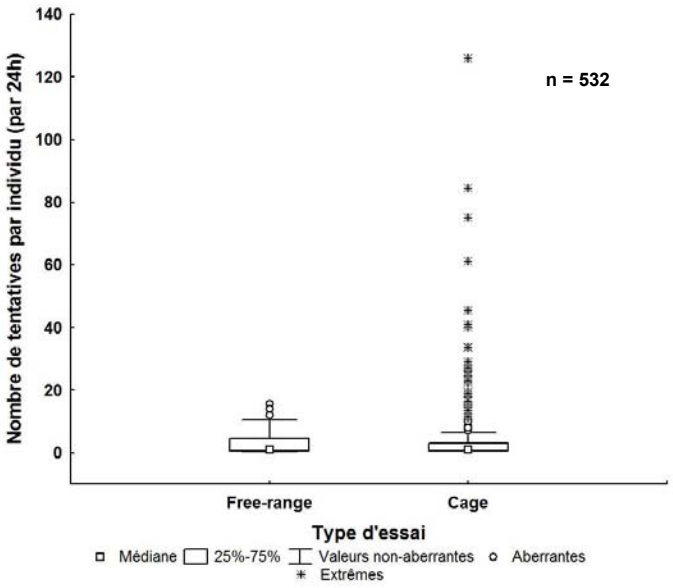


Figure 16: Effet de la cage sur le nombre de tentatives par individu selon le type d'essai.

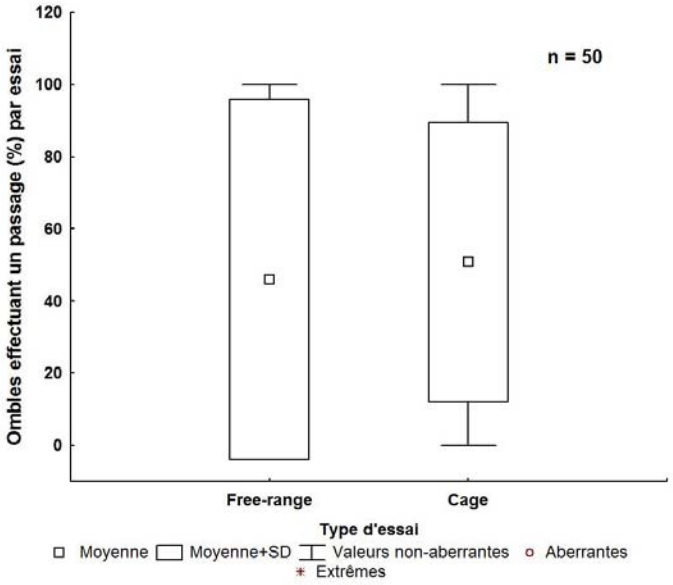


Figure 17: Effet de la cage sur la proportion moyenne d'individus par essai ayant effectué au moins un passage.

Objectif 2

Réaliser des travaux de terrain permettant de déterminer les critères biologiques et les conditions hydrauliques qui régissent la capacité des ombles de fontaine à franchir les ponceaux.

Différents critères biologiques peuvent influencer la capacité des ombles à franchir les ponceaux : âge, taille, maturité sexuelle, morphologie et historique de vie. L'emphase a été mise sur la taille des individus dans le présent projet car c'est une variable simple à mesurer et qui peut être reliée à d'autres telles l'âge ou la maturité sexuelle. De plus, il est connu dans la littérature que la taille des individus influence positivement leur capacité de nage (Peake et al., 1997, Castro-Santos et al., 2013). Un des objectifs de la cueillette de données était donc de tester des ombles de fontaine de longueurs variées, représentatives de la gamme de longueur qu'il est possible de retrouver dans de petits cours d'eau. Les ombles testés dans l'étude avaient une taille variant de 85 à 240 mm et la figure 18 présente la distribution des longueurs à la fourche selon les sites d'étude. La longueur moyenne des individus est de 132 mm et est relativement stable selon les sites. Aucun des sites ne montre une longueur moyenne significativement plus élevée (Kruskal-Wallis et F <0,05). Deux sites, Allaire et Résimond, se démarquent toutefois par des moyennes légèrement plus élevées. Il est intéressant de noter que ces sites correspondent à des ruisseaux où l'on trouve à la fois des ombles de fontaine résidents et des ombles anadromes, généralement de taille supérieure. Quelques individus anadromes pourraient donc expliquer ces moyennes plus élevées.

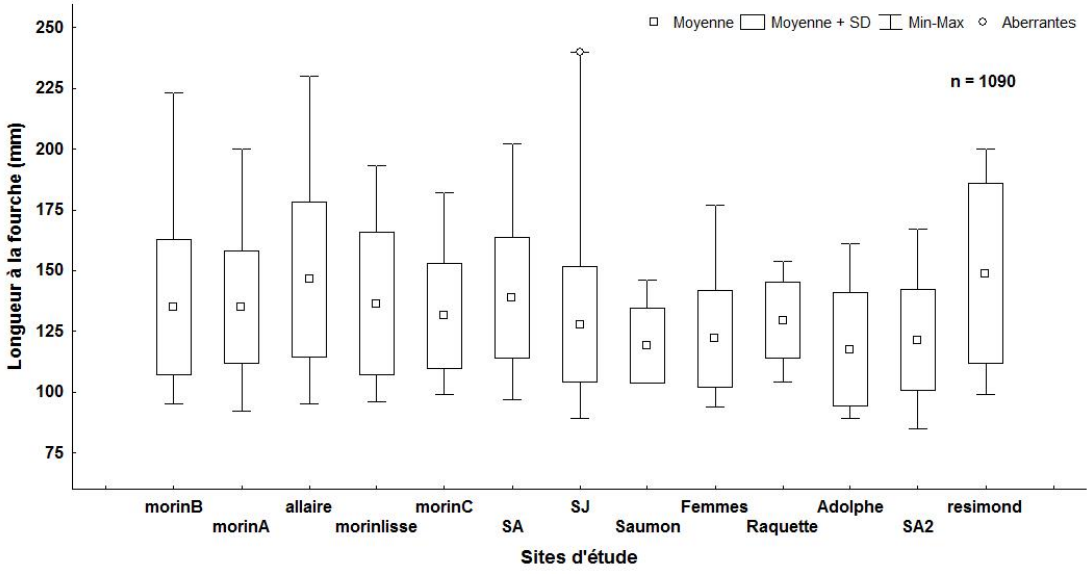


Figure 18: Longueurs des individus selon les sites d'étude

À la lumière de la figure 19, il est possible de constater que la longueur ne semble pas influencer le nombre de tentatives effectuées par individu donné pour une période de 24h. Du côté du succès de passage, les figures 20 et 21 montrent que la distribution des longueurs, de même que celle des facteurs de condition (k), sont semblables entre les individus ayant échoué à franchir le ponceau et ceux ayant réussi. La plupart des grands individus (> 200 mm) ont toutefois échoué dans leurs tentatives de franchir le ponceau. Il est probable que, pour la gamme de longueurs de ponceau (8-45 m) et de conditions hydrauliques (0,39-2 m/s) testées, la longueur des ombles ne soit pas une variable influençant significativement la capacité de passage.

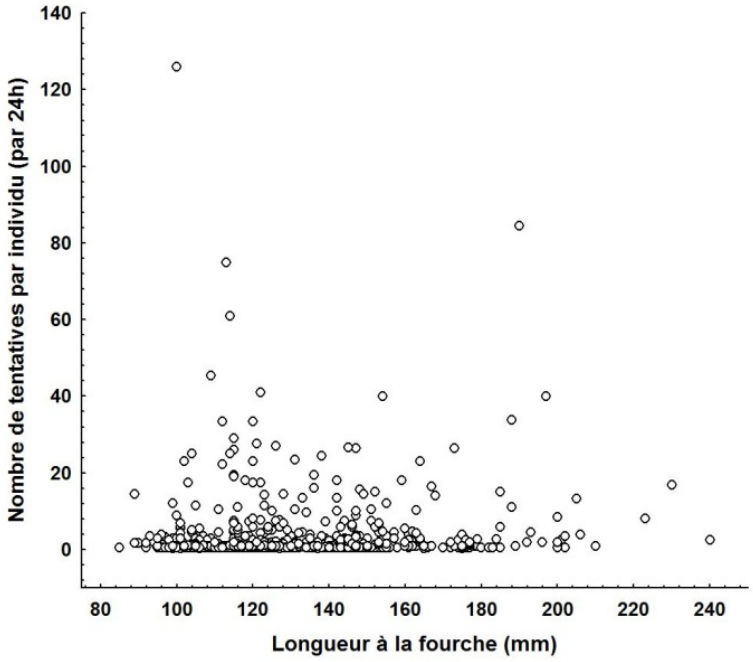


Figure 19: Nombre de tentatives effectuées en fonction de la longueur des individus

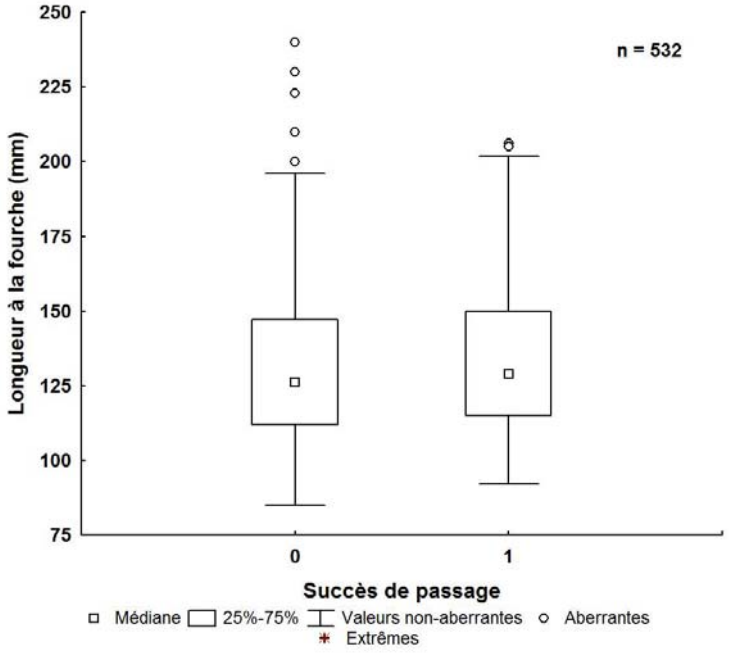


Figure 20: Distribution de la longueur des ombles en fonction du succès de passage.

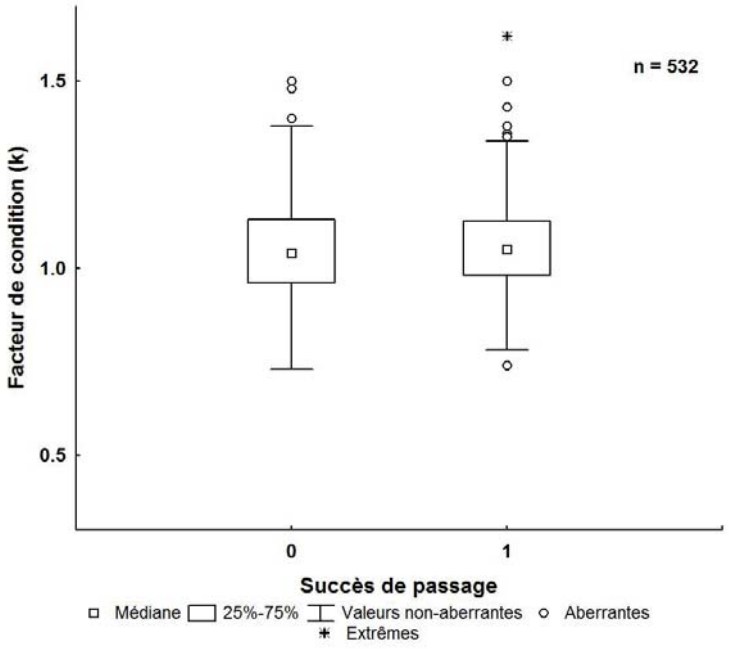


Figure 21: Distribution du facteur de condition (k) des ombles en fonction du succès de passage

Température de l'eau

La figure 22 présente les fréquences des valeurs de température de l'eau pour l'ensemble des essais de 2009 à 2012. La température moyenne varie de 3 à 18 degrés Celsius. La majorité des essais de passage a été effectuée à des températures situées entre 9 et 18°C. Quelques essais ont été tenus à des températures situées entre 8 et 12°C pouvant correspondre à la période de reproduction de l'omble de fontaine.

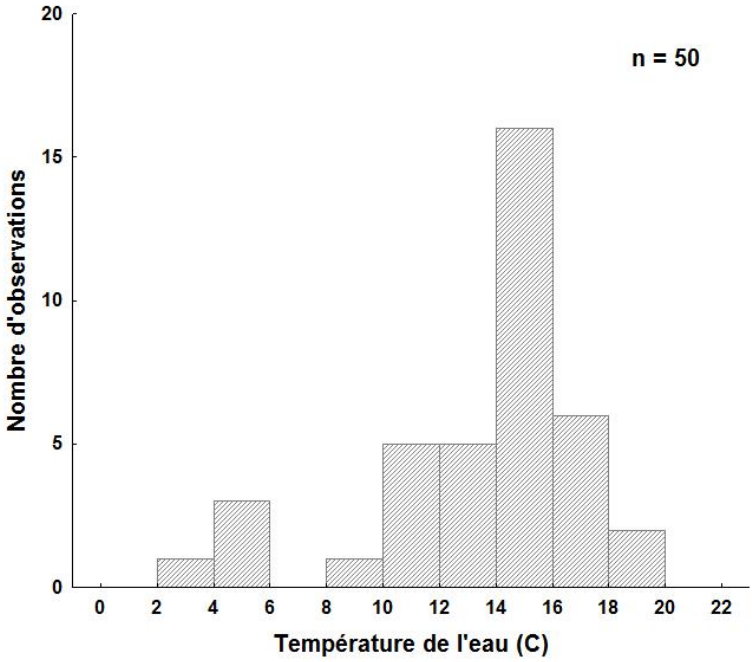


Figure 22: Températures moyennes de l'eau pour les essais de 2009-2012

L'observation de la figure 23 nous indique qu'il n'y a pas de relation visible entre la température de l'eau durant un essai et la proportion d'ombles effectuant des tentatives de passage. Cette proportion augmente pour les essais effectués à l'approche de la période de reproduction (figure 24), soit dans une fenêtre d'environ 10 jours avant ou après la période habituelle de reproduction pour la région concernée. Le nombre de tentative par individu demeure toutefois similaire (figure 25). Une expérience effectuée durant la période de reproduction et dont les données ne sont pas analysées en date de ce rapport, permettra de voir si la motivation et la performance se trouvent effectivement accrues durant cette période. Quant à la proportion d'ombles traversant le ponceau durant un essai, elle ne semble pas non plus liée à l'évolution de la température de l'eau (figure 26). Il est toutefois possible de noter que les trois essais effectués à très basse température (3–5 °C) ont eu des taux de succès nuls, malgré le fait qu'environ 50% des individus effectuaient au moins une tentative. Il est possible que la basse température

de l'eau ait affecté leur capacité de nage et donc leur aptitude à franchir le ponceau. Une température inférieure à 5° est représentative d'une période où les déplacements des ombles sont moins fréquents et où leur métabolisme ralentit en prévision de la période hivernale. Il est donc possible que leur degré de motivation ait été faible, malgré le fait que près de la moitié des individus ait effectué des tentatives. Ces ombles ont en effet été testés en utilisant une cage et la totalité des tentatives ont eu lieu à la première antenne. Elles peuvent donc représenter des comportements d'exploration de l'entrée du ponceau plutôt qu'un réel désir de franchir celui-ci.

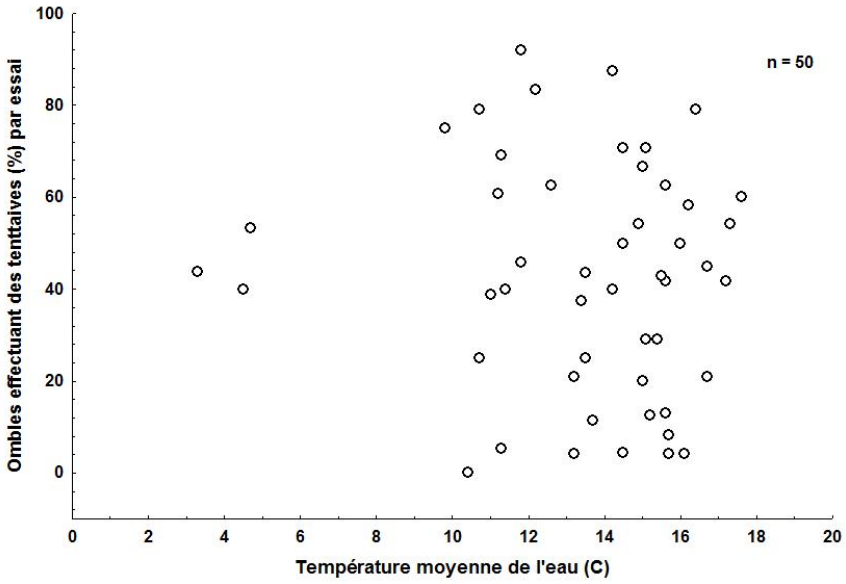


Figure 23: Effet de la température de l'eau sur la proportion d'individus par essai effectuant des tentatives

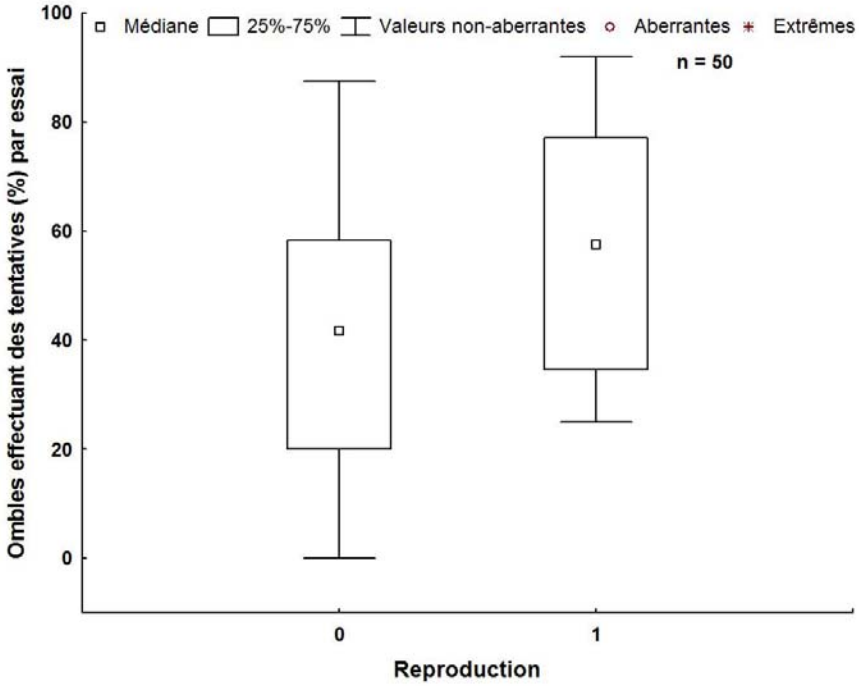


Figure 24: Proportion d'omble effectuant des tentatives en fonction de l'approche de la période de reproduction

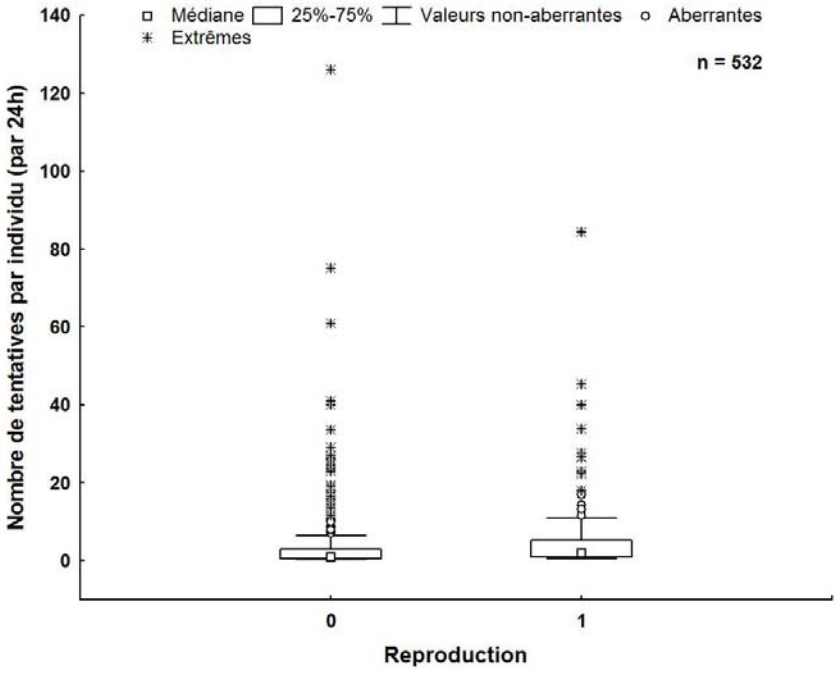


Figure 25: Nombre de tentatives par individu par période de 24h en fonction de l'approche de la période de reproduction

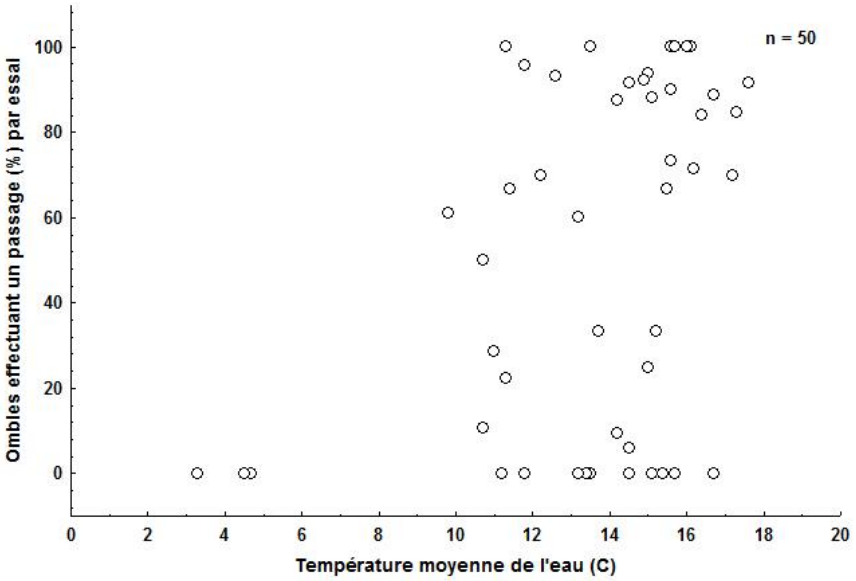


Figure 26: Effet de la température de l'eau sur la proportion d'individus par essai effectuant au moins un passage

Longueur du ponceau

Les essais de passage ont été conduits dans des ponceaux dont la longueur variait de 8 à 45 mètres. Un grand nombre d'essai a été conduit dans des ponceaux de 17, 19 et 33 mètres (sites SJ, SA, SA2, Femmes et Morin A, B et C). Dans le présent projet, la longueur du ponceau seule ne semble pas influencer le succès de passage (figure 27). Cependant, lorsque la longueur est mise en relation avec la vitesse de l'écoulement, il est attendu que le niveau de franchissement d'un ponceau long soit inférieure à celui d'un ponceau court si la vitesse d'écoulement est élevée. C'est la base même des modèles utilisant le concept de distance maximale de remontée pour prédire le succès de passage. Les données recueillies dans le projet ne permettent cependant pas d'observer de façon empirique une longueur problématique de ponceaux pour laquelle le succès de passage serait difficile et ce, même sous des conditions hydrauliques favorables. Il est cependant possible qu'un tel seuil existe dans des ponceaux dont la longueur est supérieure à 45 mètres. Si tel est le cas, le passage des poissons ne serait assuré que pour des vitesses d'écoulement très faibles.

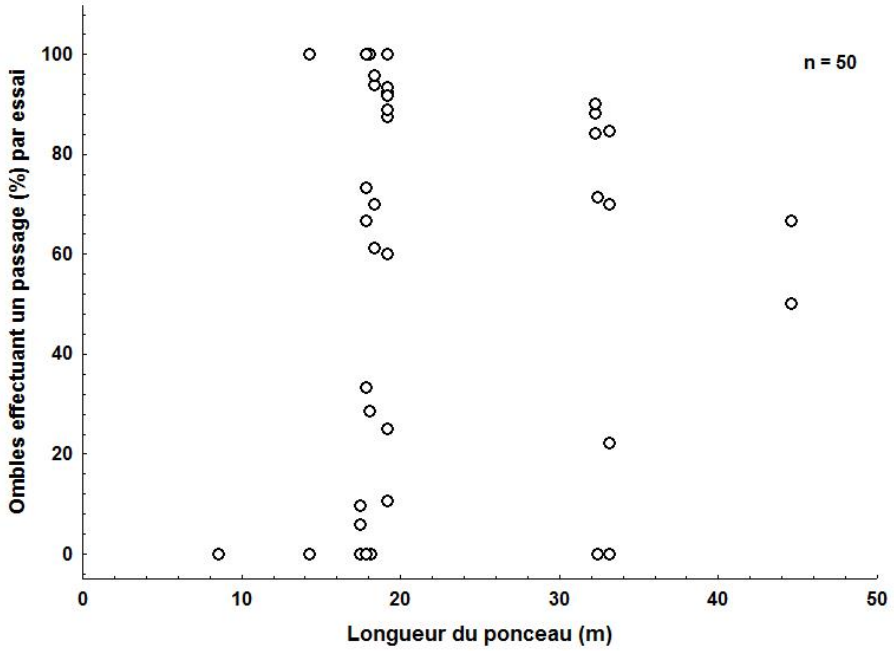


Figure 27: Effet de la longueur du ponceau sur la proportion d'individus traversant le ponceau

Profondeur et vitesse de l'écoulement

Les variables hydrauliques ont le potentiel de grandement influencer la capacité de passage des poissons car elles sont directement reliées aux capacités de ceux-ci de se mouvoir dans la colonne d'eau et de se déplacer vers l'amont en faisant face à un certain courant. La figure 28 montre que, malgré de très faibles profondeurs dans certains essais (< 10 cm), la proportion d'ombles traversant le ponceau demeurait élevée. Bien que ne constituant probablement pas une limitation physique absolue, la profondeur est toutefois susceptible d'interagir avec la vitesse d'écoulement et d'influencer le comportement de nage des ombles.

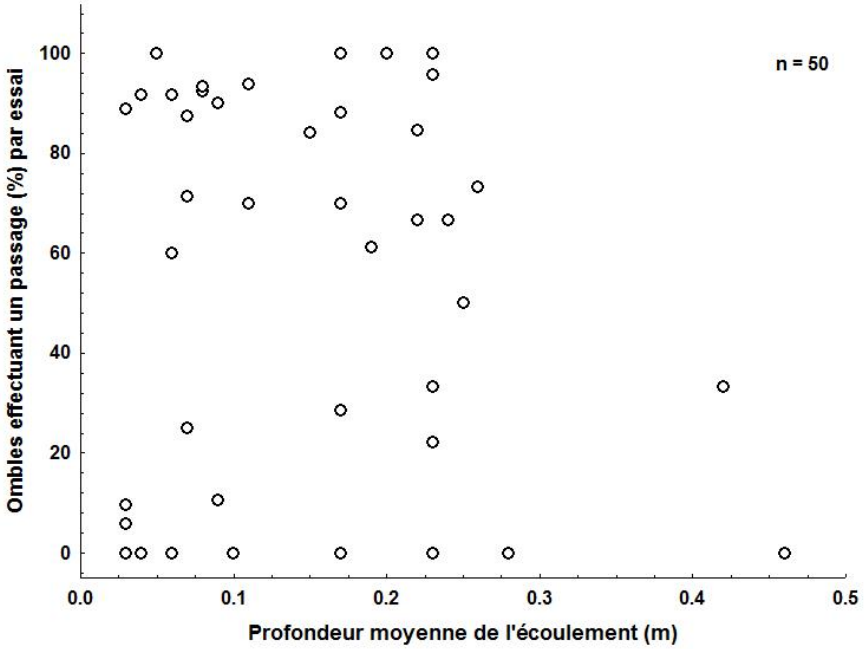


Figure 28: Effet de la profondeur de l'écoulement sur la proportion d'individus traversant le ponceau

Il a été mentionné dans la littérature que des vitesses d'écoulement élevées à l'aval d'un ponceau augmentaient son degré d'attractivité et stimulaient le nombre de tentatives chez les salmonidés (Castro-Santos et al., 2004), cela étant dû au phénomène de rhéotaxie positive[3] (Frankel et Gunn, 1961). La figure 29, qui met en relation les vitesses moyennes d'écoulement dans les essais de passage et le pourcentage d'individus effectuant des tentatives pour chaque essai, ne confirme pas cette hypothèse. La proportion d'ombles effectuant des tentatives est distribuée de façon assez aléatoire

[3] Phénomène par lequel le poisson réagit à un stimulus (l'écoulement) en s'orientant face à celui-ci.

selon les différentes valeurs de vitesses d'écoulement. Ces valeurs sont toutefois des moyennes intégrées sur la durée de l'essai, soit 48 heures dans la plupart des cas. L'observation, sur une période de temps donnée, de la fréquence des tentatives en fonction de l'évolution des vitesses d'écoulement (ou du débit) pourrait mener à des résultats différents. Ce type d'analyse sera effectué dans le cadre de la thèse.

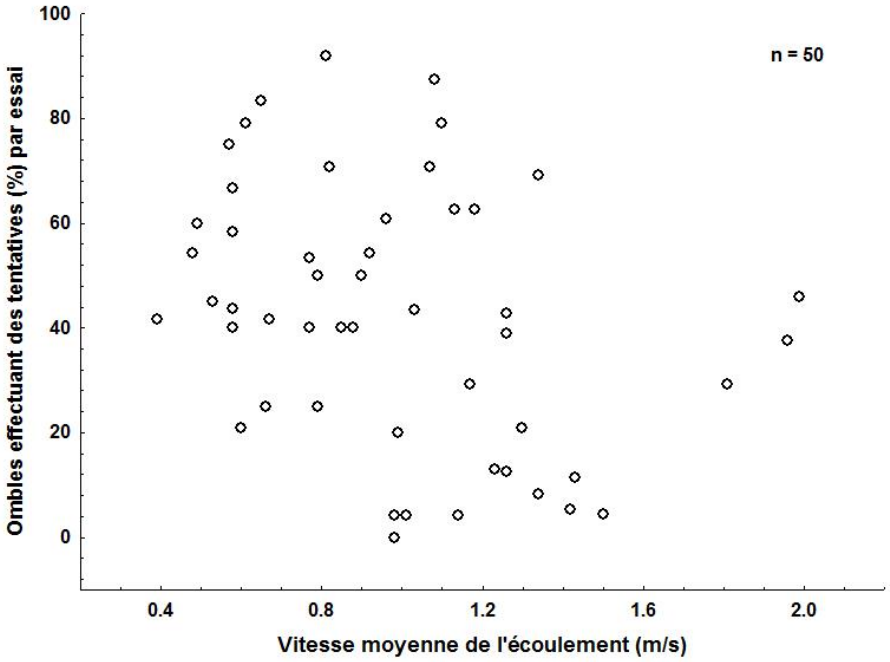


Figure 29: Effet de la vitesse de l'écoulement sur la proportion d'individus effectuant des tentatives

La figure 30 montre quant à elle que la distance maximale d'ascension médiane des ombles décroît avec l'augmentation de la vitesse de l'écoulement. Il est intéressant de noter par ailleurs les quelques individus performant bien dans la classe de vitesses élevées (1,3 à 2 m/s), représentés par les valeurs extrêmes. Au fur et à mesure que la vitesse de l'eau augmente, les ombles nagent moins loin lors de leurs tentatives de passage. Dans quelle mesure cela affecte-t-il leur succès de passage? La figure 31 représente les proportions d'ombles ayant réussi à franchir un ponceau selon différentes classes de vitesses d'écoulement. Une relation très claire est observée entre le succès de passage et la vitesse de l'écoulement.

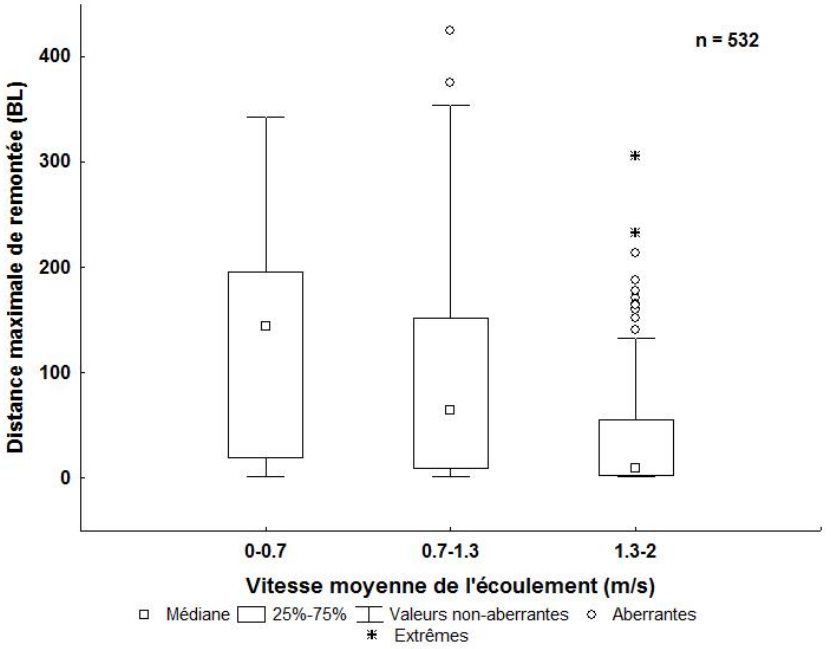


Figure 30: Effet de la vitesse de l'écoulement sur la distance maximale de remontée

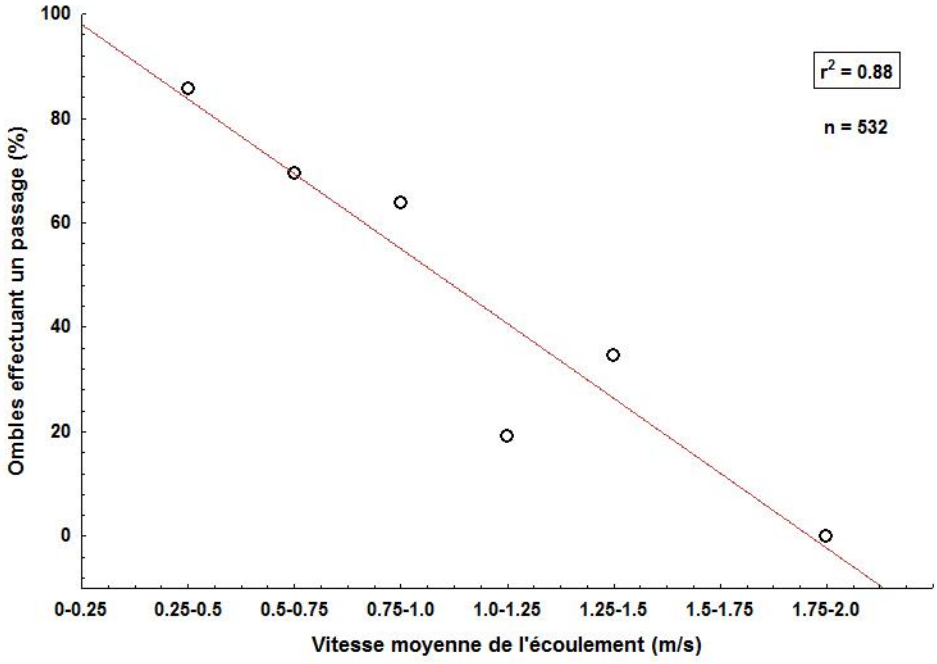


Figure 31: Proportion d'individu traversant le ponceau en fonction de classes de vitesse d'écoulement.

La vitesse de l'écoulement n'est toutefois pas une variable toujours disponible ou facile d'acquisition pour les concepteurs de ponceaux ou les intervenants chargés d'évaluer si le libre-passage du poisson est respecté. Elle évolue en effet constamment dans le temps, avec de grandes amplitudes dans le cas des petits cours d'eau dont le débit varie facilement. Dans un ponceau, la vitesse peut être reconstituée à l'aide du débit et des caractéristiques de la structure. Toutefois, c'est souvent la valeur même du débit qui fait défaut, celui-ci étant connu pour ses valeurs de pointe, mais pas pour les niveaux d'eau intermédiaires ou d'étiage. Une autre variable, beaucoup plus statique, est toutefois fortement corrélée à la vitesse de l'écoulement : la pente du ponceau. Sans surprise, une relation claire est également observée (figure 32) entre la pente du ponceau et la proportion d'ombles franchissant le ponceau. Il pourrait donc être possible de prédire la capacité de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux à l'aide de la pente.

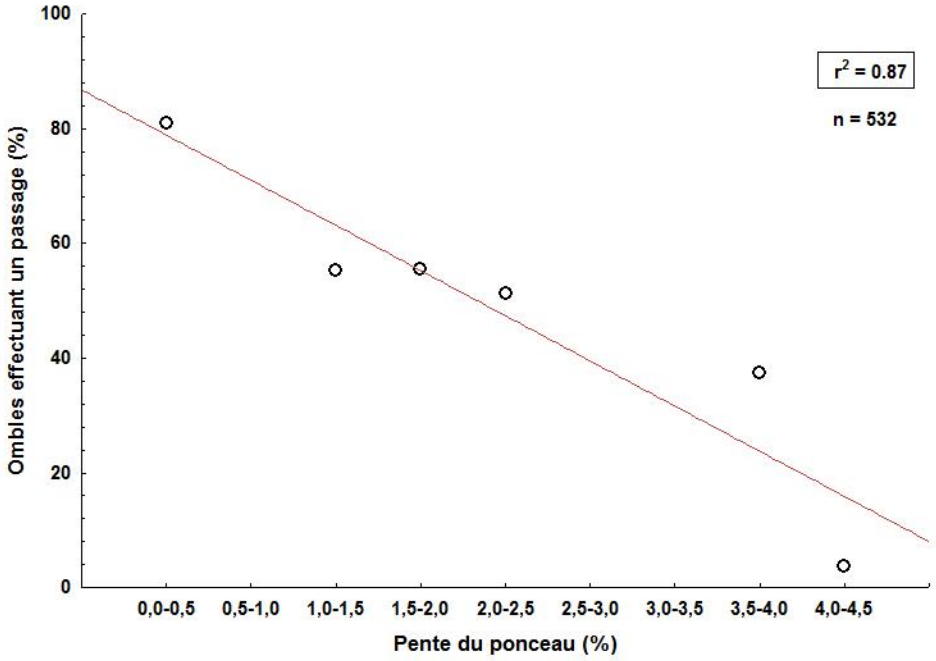


Figure 32: Proportion d'individu traversant le ponceau en fonction de la pente du ponceau

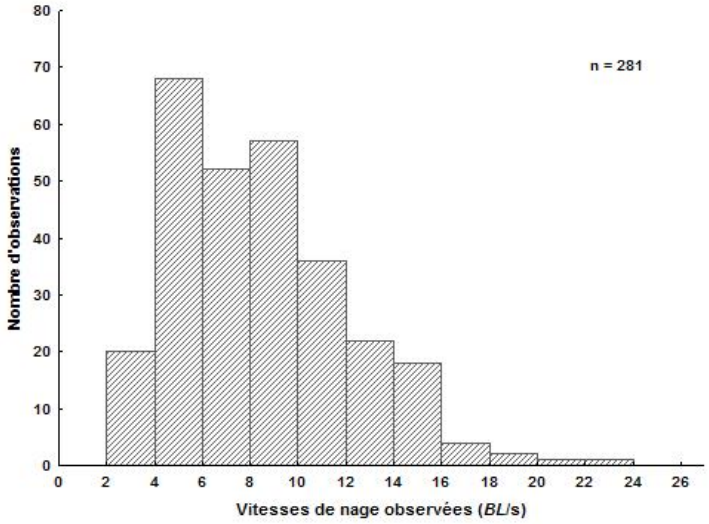
Vitesses de nage observées

Figure 33: Omble en progression dans un ponceau

Source : Elsa Goerig (INRS), 2011

Des vitesses de nage moyennes ont pu être calculées pour 281 ombles ayant fait des tentatives durant les essais de 2009 à 2012, en utilisant la méthode décrite dans la section «méthodologie». La figure 34 illustre la distribution des vitesses de nage observées, en mètres par seconde (a) et en longueurs de corps par seconde (b). La majorité des individus nageaient à des vitesses allant de 0,4 à 1,8 mètres par seconde, avec une vitesse moyenne de 1,09 m/s. Lorsque la vitesse est exprimée en longueurs de corps (*Body Length*) par seconde, la majorité des individus nageaient entre 2 et 16 *BL*/s. En observant ces valeurs, il est possible de conclure qu'une partie des individus nageaient en mode prolongé tandis qu'une autre avait effectué la transition vers le mode sprint. La valeur à laquelle se fait cette transition varie selon l'individu, mais se situe aux alentours de 10 *BL*/s pour l'omble de fontaine et plusieurs autres espèces (Castro-Santos, 2005). Quelques ombles ont toutefois démontré des vitesses beaucoup plus élevées, jusqu'à 24 *BL*/s, 25 étant considéré comme la limite physiologique de l'omble de fontaine (Castro-Santos et al., 2013). Il est intéressant de noter ici que cette étude a documenté une capacité de nage pour l'omble de fontaine nettement supérieure à ce qui avait jusqu'alors été mentionné dans la littérature ainsi qu'une transition vers un deuxième mode sprint, aux alentours de 19 *BL*/s. Les vitesses de nage observées sur le terrain dans le présent projet semblent confirmer, à ce stade-ci des analyses, les observations de cette étude.

a)



b)

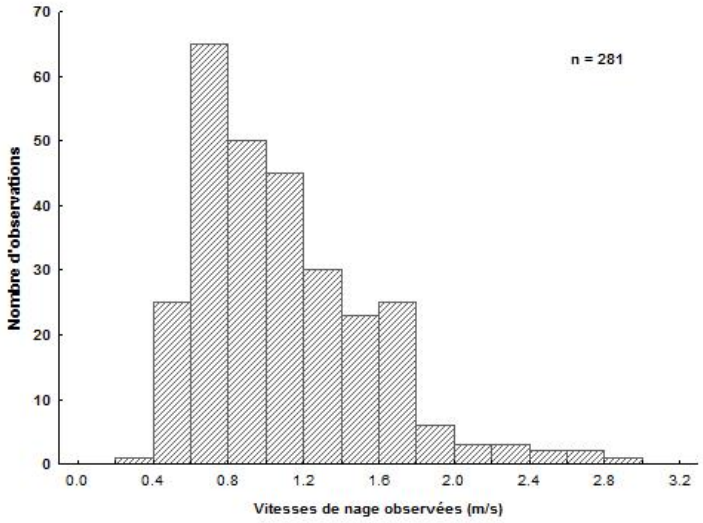


Figure 34:`Vitesses de nage observées dans les essais de 2009 à 2012 en a) mètres par seconde et b) longueurs de corps(*BL*) par secondes.

La vitesse de nage intègre la composante de l'écoulement à laquelle le poisson fait face lors de sa remontée du ponceau. C'est la vitesse à laquelle il nage réellement. En soustrayant la vitesse de l'écoulement de sa vitesse de nage, il est possible d'obtenir sa vitesse de progression au sol («groundspeed»), qui nous permet de comparer la performance d'individus nageant contre des vitesses d'écoulement différentes. La figure 35 présente la distribution des vitesses de progression au sol des 281 ombles selon qu'ils aient complété ou non la remontée du ponceau. La vitesse médiane de ceux ayant

échoué à franchir le ponceau est plus élevée que celle de ceux ayant réussi. La variabilité est également plus grande pour les ombles ayant échoué. Dans le cas des ombles ayant franchi le ponceau, la distribution des vitesses de progression est plus réduite, excepté pour quelques individus ayant nagé à des vitesses élevées. En général, les ombles ayant réussi le passage ont nagé à des vitesses entre 0.5 et 2 *BL*/s.

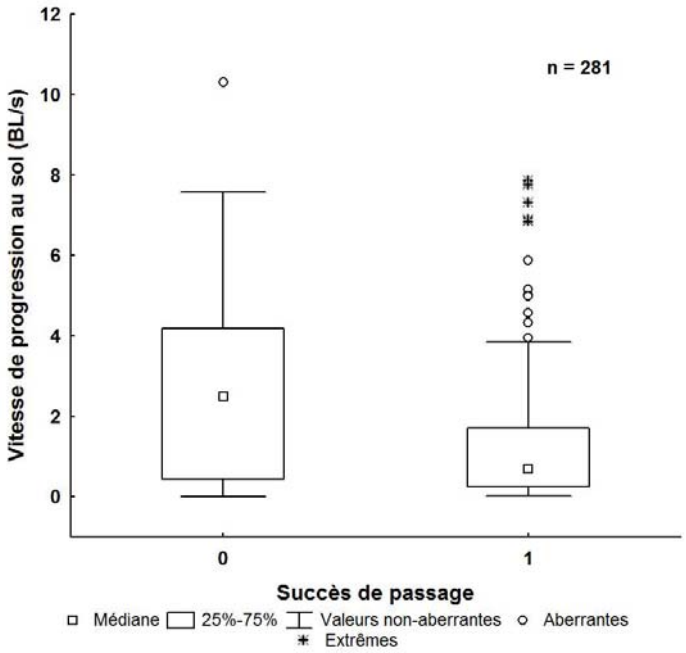


Figure 35: Distribution de la vitesse de progression au sol (en longueurs de corps (BL) par seconde) selon l'échec ou le succès de passage

Il est possible que ces observations démontrent une stratégie d'optimisation chez certains individus. Certains ombles pourraient ainsi choisir d'ajuster leur vitesse de progression au sol afin de maximiser la distance parcourue avant de s'épuiser et optimiser leurs chances de franchir l'obstacle. Cette vitesse optimale a été définie par Castro-Santos (2005) comme l'inverse de la pente de la relation du temps à l'épuisement pour un individu. Comme c'est une vitesse de progression au sol, elle est indépendante de la vitesse de l'écoulement. Toutefois, si la vitesse de l'écoulement atteint un seuil critique (variant selon les espèces), le poisson peut alors changer de mode de nage, passant du mode prolongé au mode sprint et sa relation de temps à l'épuisement ainsi que la vitesse optimale vont s'en trouver modifiées. Le choix d'effectuer une transition de mode de nage, tout comme celui d'adopter ou non une stratégie d'optimisation relève plus de l'aspect comportemental que physiologique. Il est ainsi possible que certains ombles échouent à choisir la vitesse de progression au sol adéquate pour franchir un obstacle, bien qu'ils possèdent la capacité physique de réussir. Dans la figure 35, certains individus ont progressé à des vitesses élevées, sans pour autant réussir la remontée du ponceau. Ces individus ont peut-être nagé trop vite et se sont épuisés rapidement, avant d'avoir atteint la fin du ponceau. Des analyses

détaillées seront effectuées avec les données de capacité de nage et intégrées à la thèse de doctorat découlant de ce projet.

Objectif 3

Réaliser des travaux de terrain permettant de comparer les caractéristiques d'écoulement et la capacité de passage des ombles de fontaine dans des ponceaux rugueux (en tôle ondulée) et lisse (en béton ou polyéthylène) afin d'évaluer les impacts réels de la réfection de ponceaux à l'aide de la technique d'insertion.

Dans le cadre du projet de recherche, 25 essais de passage ont été effectués dans des ponceaux rugueux (tôle ondulée) et 25 dans des ponceaux lisses (béton armé ou polyéthylène). La figure 36 illustre la distribution des vitesses d'écoulement moyennes dans les deux types de ponceaux lors des essais. Bien que les médianes soient assez proches entre les ponceaux rugueux et les ponceaux lisses, la distribution est plus étendue dans ces derniers, indiquant qu'une gamme plus grande de vitesse d'écoulement y a été testée. La figure 37 illustre quant à elle la distribution des profondeurs d'écoulement dans les deux types de ponceaux durant les essais de passage. Les profondeurs sont en général beaucoup plus faibles dans les ponceaux lisses.

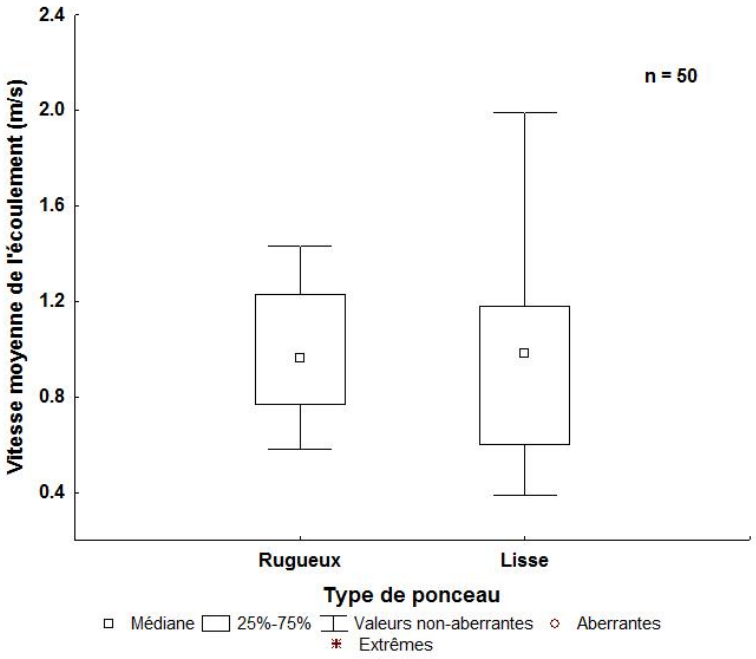


Figure 36: Distribution de la vitesse moyenne de l'écoulement selon le type de ponceau

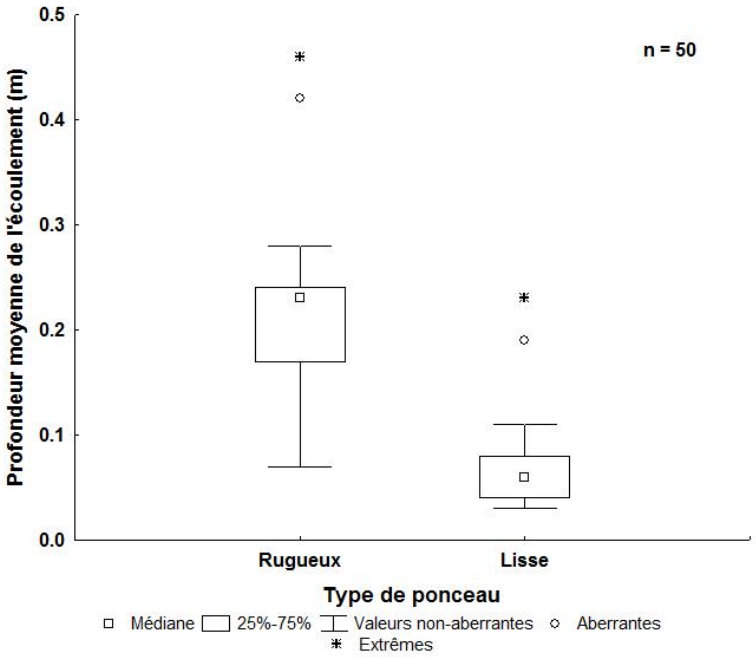


Figure 37: Distribution de la profondeur moyenne de l'écoulement dans les essais selon le type de ponceau

Enfin, la figure 38 montre la distribution des valeurs du nombre de Reynolds (Re) pour les ponceaux rugueux et lisses. Le nombre de Reynolds donne le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses et permet de caractériser l'écoulement selon qu'il est laminaire (Re < 2000), transitoire (Re 2000-3000) ou turbulent (> 3000) (Robert 2003). Il est calculé avec l'équation 10 :

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (10)$$

Où :

V : vitesse caractéristique du fluide (m/s)

L : dimension caractéristique (m)

ν : viscosité cinématique du fluide

Il est possible de constater que les ponceaux rugueux se caractérisent par des nombres de Reynolds plus élevés. Bien que le 75e percentile pour les ponceaux rugueux se situe sous 2000, certains des essais ont des nombres supérieurs à 2000 et même à 3000, indiquant des régimes d'écoulement turbulents. L'implication des caractéristiques de

l'écoulement sur le succès de passage des ombles sera discutée dans la section dédiée à l'objectif 4 du projet, soit la modélisation de la capacité de passage.

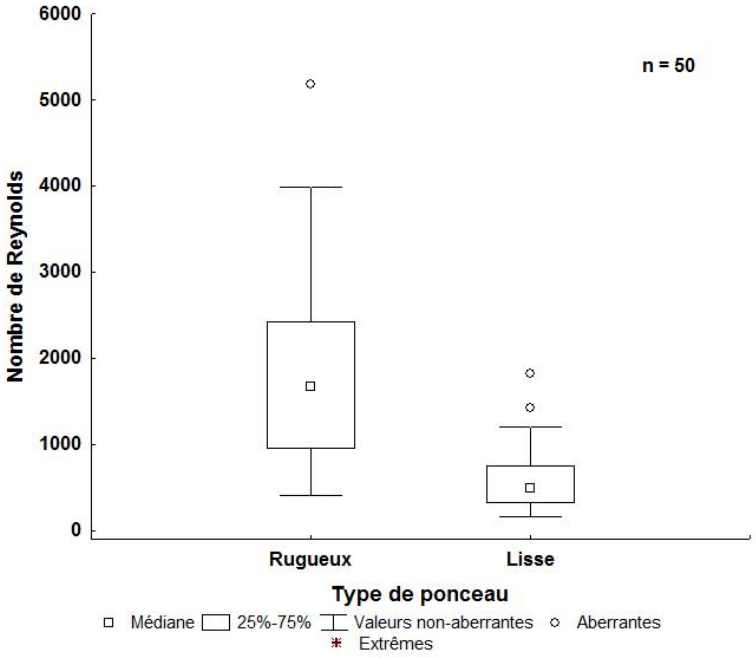


Figure 38: Distribution du nombre de Reynolds dans les essais selon le type de ponceau

Lorsque les dimensions du ponceau et le débit sont identiques, l'écoulement est plus rapide dans un ponceau lisse dû à la rugosité inférieure des parois du tuyau. La technique d'insertion, qui consiste à effectuer la réfection d'un ponceau (généralement en métal ondulé) en y insérant une gaine de polyéthylène à haute densité, peut avoir d'importantes implications sur les profondeurs et les vitesses d'écoulement à l'intérieur du ponceau. Cette technique a comme effet de réduire les profondeurs et d'accroître la vitesse de l'écoulement pour deux principales raisons :

1) Elle entraîne une réduction du diamètre du ponceau
2) La rugosité des parois est diminuée.

Des calculs hydrauliques ont été effectués afin de comparer les caractéristiques d'écoulement (profondeur et vitesse moyennes) dans un ponceau d'un diamètre de 750 mm en tôle ondulée ayant fait l'objet d'une réfection par insertion d'un ponceau de calibre inférieur (Duguay, J. et J. Lacey, département de génie civil, Université de Sherbrooke, communication personnelle). Ces calculs ont été effectués pour différentes valeurs de :

- Pente
- Ratio de profondeur et diamètre (y/D) du ponceau original
- Rugosité de l'insertion (n de Manning),
- Réduction de diamètre engendrée par l'insertion

Dans tous les cas, la réfection du ponceau par insertion provoquait une réduction de la profondeur de l'écoulement variant entre 31 et 43% et une augmentation de la vitesse variant entre 88 et 126%.Ces conclusions prévalent également pour des diamètres de ponceau supérieurs. Si la réduction du diamètre engendrée par l'insertion se situe entre 10 et 20% du ponceau original et que le ratio profondeur/diamètre (y/D) dans le ponceau original est supérieur à 10%, il est possible d'affirmer que :

- La profondeur va décroître en moyenne de 35% (+- 6%)
- La vitesse va augmenter en moyenne de 100% (+- 20%)

Le remplacement de ponceaux rugueux (tôle ondulée) par des ponceaux lisses (béton armé ou polyéthylène) a un effet direct sur les profondeurs et les vitesses d'écoulement et ce de façon encore plus marquée lors d'une réfection par insertion car le diamètre du ponceau original se trouve réduit. Ces diminutions des profondeurs et augmentations des vitesses d'écoulement peuvent à leur tour avoir d'importantes répercussions sur le succès de passage des poissons dans les ponceaux. En conséquence, bien que les ponceaux en béton soit plus durables que ceux en métal et que la technique d'insertion soit économiquement et logistiquement avantageuse, une attention particulière devra être portée aux endroits où le libre-passage des poissons est requis.

Objectif 4

Développer un modèle prédictif du succès de passage des ombles de fontaine dans les ponceaux intégrant des variables biologiques (e.g. espèce, âge, taille, facteur de condition), hydrauliques (e.g. vitesse du l'eau, profondeur d'eau, débit) et environnementales (e.g. luminosité, température de l'eau).

À l'échelle individuelle, il est possible de modéliser l'issue d'une tentative (succès ou échec) ou l'évolution de la probabilité de succès en fonction de différents paramètres. Le succès de passage n'est cependant pas purement binaire. Même dans le cas d'une tentative de passage infructueuse, le poisson aura parcouru une certaine distance vers l'amont à l'intérieur du ponceau. Cette distance de remontée est fonction des conditions hydrauliques en vigueur dans le ponceau, de la capacité de nage de l'individu et éventuellement de facteurs environnementaux. À l'échelle d'une population composée d'individus de différentes tailles effectuant de multiples tentatives, un ponceau peut avoir un certain degré de perméabilité évoluant selon les conditions hydrauliques et environnementales. Il peut ainsi être intéressant d'aborder le succès de passage en termes de distance maximale de remontée par individu ou de proportion d'une population apte à traverser un ponceau sous une gamme de conditions hydrauliques donnée.

La conception expérimentale adoptée dans le présent projet rend possible la détermination non seulement du succès ou de l'échec d'une tentative de passage, mais également de la distance de remontée du poisson. Celle-ci, exprimée en mètres ou en longueurs de corps, correspond à la distance de l'antenne la plus éloignée vers l'amont

atteinte par un individu lors de sa tentative. En guise d'exemple, si un omble atteint l'antenne 4, qui est située à 32 mètres vers l'amont, 32 mètres constitue sa distance maximale de remontée. Cette distance peut ensuite être comparée à la longueur du ponceau en faisant le ratio D_{max}/longueur (m). Si celui-ci est inférieur à 1, la tentative de passage se solde par un échec. À l'inverse, s'il est supérieur à 1, la tentative est fructueuse et l'individu franchit le ponceau. La distance maximale de remontée a l'avantage de fournir, en plus de l'information succès/échec, un estimé de la distance qu'un individu donné peut parcourir sous les conditions en vigueur.

Dans le cas où il est nécessaire de prédire la capacité de passage dans un ponceau possédant une chute à son extrémité aval, il faut tout d'abord déterminer si celle-ci est franchissable pour les individus visés. Pour ce faire, le modèle de Kondratieff et Myrick (2006) décrit dans la section sur la littérature existante peut être appliqué.

Performance des modèles de passage existants

Des modèles de passage ont été développés afin de prédire, pour un poisson d'une taille donnée, la distance de remontée ainsi que l'issue de la tentative (succès /échec) sous des conditions spécifiques de vitesse d'écoulement. Les trois approches décrites dans la section «revue de la littérature existante» ont été utilisées pour modéliser la capacité de passage des individus de la présente étude. Des matrices de confusion ont été élaborées afin de comparer les résultats de chacune des approches prédictives aux observations recueillies sur le terrain. La matrice de confusion permet d'analyser tous les cas de figure possibles lors de la comparaison entre les données prédites et observées et permet de déterminer la qualité du système de classification (tableau 5) :

Tableau 5: Exemple d'une matrice de confusion

	Observations	
Prédictions	**+**	**-**
+	a	b
-	c	d

a) **Vrai positif** : un succès a été prédit et effectivement observé;
b) **Faux positif** : un succès a été prédit, mais l'individu a échoué à traverser le ponceau;
c) **Faux négatif** : un échec a été prédit, mais l'individu a réussi à traverser le ponceau.

d) **Vrai négatif** : un échec a été prédit et effectivement observé;

Différent indices peuvent également être calculés à partir de la matrice de confusion. Ces indices permettent de quantifier la performance d'un modèle, mais également de comparer différents modèles entre eux. Voici la définition de certains indices:

Prévalence : (a+c)/N

Proportion de succès observés sur le nombre total d'événements (N). Influence certains des indices comme le taux de classification correcte, les valeurs prédictives et Kappa.

Taux de classification correcte et incorrecte : (a+d)/N; (b+c)/N

Proportion de cas correctement et incorrectement prédits sur le nombre total d'événements.

Sensibilité : a/(a+c)

Proportion de succès correctement prédits sur le nombre total de succès observés. Probabilité que le modèle prédise un succès pour un individu passant avec succès le ponceau. Un modèle très sensible serait utilisé pour prédire que la condition (succès) n'est pas présente car il produit peu de cas «faux négatifs».

Spécificité : d/(b+d)

Proportion d'échec correctement prédits sur le nombre total d'échecs observés ou la probabilité que le modèle prédise un échec pour un individu ayant échoué à traverser le ponceau. Un modèle très spécifique est utilisé pour prédire que la condition (succès de passage) est présente car il produit peu de cas «faux positifs».

Validité (valeur) prédictive positive : a/(a+b)

Proportion de succès correctement prédits sur le nombre total de succès prédits. Une valeur élevée signifie que les prédictions de succès du modèle sont plus fiables que ses prédictions d'échecs.

Validité (valeur) prédictive négative : d/(c+d)

Proportion d'échec correctement prédit sur le nombre total d'échecs prédits. Une valeur élevée signifie que les prédictions d'échecs du modèle sont plus fiables que ses prédictions de succès.

Kappa (k) : $\frac{(a + d) - (((a + c)(a + b) + (b + d)(c + d))/N)}{N - (((a + c)(a + b) + (b + d)(c + d))/N)}$

Proportion de correspondance spécifique. Il est souvent utilisé pour évaluer l'amélioration de la correspondance lorsque des modèles différents sont comparés. Une valeur <0.4 est considérée comme une faible correspondance.

Dans les pages qui suivent, la performance de trois approches prédictives sera discutée. Pour chacune des approches, les prédictions seront comparées avec les observations recueillies sur le terrain dans des matrices de confusion. Trois matrices seront présentées dans chaque cas : une matrice comptant tous les individus testés ayant fait au moins une tentative de passage, une matrice comptant les individus testés dans des ponceaux rugueux et une comptant ceux testés dans des ponceaux lisses.

Approche de Peake et al., (1997) et Castro-Santos (2005)

Cette approche utilisant la vitesse de nage optimale déterminée à partir de relations de temps à l'épuisement et la distance maximale de remontée a été appliquée pour chaque individu testé sur le terrain ayant effectué au moins une tentative de traversée du ponceau. La taille de l'individu, la température et la vitesse moyenne de l'eau dans les essais de terrain ont été utilisées pour modéliser la capacité de passage de cet individu. Le tableau 6 illustre la correspondance entre les résultats de l'approche prédictive et les observations sur le terrain. Chaque cas correspond à un événement (meilleure tentative d'un individu). Un même individu n'est présent qu'une seule fois dans la matrice et ceux n'ayant pas effectué de tentative en sont absents.

Tableau 6 : Matrice de confusion pour tous les individus testés.
Approche de Peake et al., (1997) et Castro-Santos (2005).

PONCEAUX RUGUEUX ET LISSES

N = 532

	Observations		
Prédictions	Succès	Échec	Total
Succès	94	54	148
Échec	159	225	384
Total	253	279	532

Prédictions correctes:		60%		
Prédictions incorrectes:		40%	(sur-estimations):	25%
			(sous-estimations):	75%
Prévalence:	0.48			
Sensibilité:	0.37			
Spécificité:	0.81			
Validité préd. + :	0.64			
Validité pred. - :	0.59			
Kappa:	0.18			

Le taux de prédiction correcte y est de 60%. Sur les 40% de cas où le modèle a échoué à prédire l'issue d'une tentative de passage, 25% des cas sont des surestimations de la capacité de passage et 75% des sous-estimations. La prévalence est de 48%, ce qui signifie que, parmi les observations effectuées sur le terrain, la moitié des événements sont des succès. Le modèle a une spécificité plus élevée (0,81) que sa sensibilité (0,37), ce qui signifie, dans le contexte de l'étude, que la proportion de cas négatifs correctement prédits est plus élevée que la proportion de cas positifs bien prédits. Il produit donc peu de cas «faux positifs», mais peut produire beaucoup de «faux négatifs» comme nous indique la forte propension du modèle à sous-estimer le succès dans le cas des erreurs de prédiction. Les valeurs prédictives positive et négative sont relativement semblables. Les prédictions de succès sont valides dans 64% des cas et celles d'échecs dans 59% des cas.

Le tableau 7 illustre la correspondance du modèle lorsque seuls les individus testés dans des ponceaux rugueux sont considérés.

Tableau 7: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux rugueux. Approche de Peake et al., (1997) et Castro-Santos (2005).

PONCEAUX RUGUEUX

N=	242		
	Observations		
Prédictions	Succes	Echec	Total
Succes	33	34	67
Echec	87	88	175
TOTAL	120	122	242

Prédictions correctes:	50%		
Prédictions incorrectes:	50%	(sur-estimations):	28%
		(sous-estimations)	72%

Prévalence:	0.50
Sensibilité:	0.28
Spécificité:	0.72
Validité préd. + :	0.49
Validité pred. - :	0.50
Kappa:	0.00

Dans le cas des ponceaux rugueux, le modèle a un taux de classification correcte moindre (50%) et les erreurs de prédiction du modèle sont en grande partie des sous-estimations (72%) de la capacité de passage. 50% des événements observés sont des

succès. Sa spécificité est plus élevée (72%) que sa sensibilité (28%).Le fait que la somme de ces deux indices est égale à 100 indique que le modèle a peu de correspondance avec la réalité, il prédit en effet à peine mieux que le hasard. Sa validité prédictive positive égale celle négative, ses prédictions de succès sont valides à 49% et celle d'échecs à 50% Les indices associés à ce modèle montrent que sa performance globale est faible.

Tableau 8: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux lisses. Approche de Peake et al., (1997) et Castro-Santos (2005).

PONCEAUX LISSES

N=	290		
	Observations		
Prédictions	Succès	Échec	Total
Succès	61	20	81
Échec	72	137	209
Total	133	157	290

Prédictions correctes:	68%		
Prédictions incorrectes:	32%	(sur-estimations):	22%
		(sous-estimations):	78%
Prévalence:	0.46		
Sensibilité:	0.46		
Spécificité:	0.87		
Validité préd. + :	0.75		
Validité pred. - :	0.66		
Kappa:	0.34		

Dans le cas des ponceaux lisses (tableau 8), le modèle a un taux de classification correcte plus élevé (68%) et les erreurs de prédiction du modèle sont à 78% des sous-estimations. Encore là, la spécificité est élevée (0,87) en comparaison de la sensibilité (0,46) ce qui signifie que, dans le contexte de l'étude, la proportion de cas négatifs correctement prédits est élevée, mais que le modèle a le potentiel de produire plus de cas «faux négatifs» et donc de sous-estimer la capacité de passage. Du point de vue de sa validité, lorsqu'il prédit l'issue d'une tentative, sa validité prédictive positive est de 75% alors que celle négative est de 66%.

En résumé, l'approche de Peake et al., (1997) est plutôt spécifique et peut être utilisée pour déterminer si un ponceau est passable ou non. Elle est toutefois conservatrice, ce qui signifie qu'elle prédit un succès seulement sur la base d'une évidence très forte. Elle a donc tendance à sous-estimer la capacité de passage dans plusieurs cas. Le taux de classification correcte dans les ponceaux rugueux étant toutefois équivalent au hasard, son application dans ce type de ponceaux n'est pas recommandée.

Castro-Santos et al., (2013)

Cette approche a été appliquée pour chaque omble ayant effectué une tentative de traversée d'un ponceau en utilisant la vitesse moyenne de l'écoulement observée dans le ponceau lors des essais de passage.

Le tableau 9 présente la matrice de confusion issue de la comparaison entre les résultats de l'approche prédictive de Castro-Santos et al., (2013) et les observations de terrain.

Tableau 9: Matrice de confusion et indices associés pour l'ensemble des individus testés. Approche de Castro-Santos et al., 2013.

PONCEAUX RUGUEUX ET LISSES

N =	**532**		
	Observations		
Prédictions	Succès	Échec	Total
Succès	190	127	317
Échec	71	144	215
Total	261	271	532

Prédictions correctes:	63%		
Prédictions incorrectes:	37%	(sur-estimations):	64%
		(sous-estimations):	36%
Prévalence:	0.49		
Sensibilité:	0.73		
Spécificité:	0.53		
Validité préd. + :	0.60		
Validité pred. - :	0.67		
Kappa:	0.26		

Le taux de classification correcte du modèle est de 63%. Sur les 37% de cas où le modèle a échoué à prédire l'issue d'une tentative de passage, 64% des cas sont des surestimations de la capacité de passage et 36% des sous-estimations. La prévalence est de 49%, ce qui signifie que, parmi les observations effectuées sur le terrain, la moitié des événements sont des succès. Le modèle a une sensibilité plus élevée (0,73) que sa spécificité (0,53), ce qui signifie, dans le contexte de l'étude, que la proportion de cas positifs correctement prédits est plus élevée que la proportion de cas négatifs bien prédits. Il produit donc peu de cas «faux négatifs», mais peut produire des «faux

positifs» comme nous l'indique sa propension à surestimer le succès dans le cas des erreurs de prédiction. Ses valeurs prédictives positive et négative sont relativement semblables. Ses prédictions de succès sont valides dans 60% des cas et celles d'échecs dans 67% des cas.

Tableau 10: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux rugueux. Approche de Castro-Santos et al., 2013

PONCEAUX RUGUEUX

N =	**242**		
	Observations		
Prédictions	Succès	Échec	Total
Succès	70	57	127
Échec	51	64	115
Total	121	121	242

Prédictions correctes:	55%		
Prédictions incorrectes:	45%	(sur-estimations):	53%
		(sous-estimations):	47%
Prévalence:	0.5		
Sensibilité:	0.58		
Spécificité:	0.53		
Validité préd. + :	0.55		
Validité pred. - :	0.56		
Kappa:	0.11		

Dans le cas des ponceaux rugueux (tableau 10), le modèle a un taux de classification correcte moindre (55%) et les erreurs de prédiction du modèle se partagent presque également entre sur et sous-estimations. Une proportion de 50% des événements observés sont des succès. Sa sensibilité est équivalente à sa spécificité, de même que sa validité prédictive positive égale celle négative. En résumé, le modèle appliqués aux ponceaux rugueux prédit correctement dans 55% des cas et n'est pas plus performant à prédire les succès que les échecs. Les indices associés à ce modèle montrent que sa performance globale est plutôt faible.

Tableau 11: Matrice de confusion pour les individus testés dans des ponceaux lisses. Approche de Castro-Santos et al., 2013

PONCEAUX LISSES

N =	**290**		
	Observations		
Prédictions	Succès	Échec	Total
Succès	120	70	190
Échec	20	80	100
Total	140	150	290

Prédictions correctes		69%		
Prédictions incorrectes		31%	(sur-estimations):	78%
			(sous-estimations):	22%
Prévalence:	0.48			
Sensibilité:	0.86			
Spécificité:	0.53			
Validité préd. + :	0.63			
Validité pred. - :	0.80			
Kappa:	0.39			

Dans le cas des ponceaux lisses (tableau 11), le modèle a un taux de classification correcte plus élevé (69%) et les erreurs de prédiction du modèle sont à 78% des surestimations. La sensibilité s'est accrue en comparaison avec le modèle global (0,86 vs 0,73) ce qui signifie, dans le contexte de l'étude, que la proportion de cas positifs correctement prédits est plus élevée que la proportion de cas négatifs bien prédits. Ce modèle produit peu de cas «faux négatifs», mais peut produire des «faux positifs» comme l'indique sa propension à surestimer le succès dans le cas des erreurs de prédiction (78%). Lorsqu'il prédit l'issue d'une tentative, sa validité prédictive négative est plus élevée, 80% de ces prédictions d'échecs étant fiables comparativement à 63% pour celles de succès.

En conclusion, l'approche de Castro-Santos est plutôt sensible, ce qui signifie qu'elle prédit bien les succès, mais à tendance à surestimer la capacité de passage. La surestimation de la capacité de nage fait partie intégrante de ce modèle qui vise à définir la limite supérieure de la performance pour un omble d'une taille donnée. Dans la réalité, certains ombles n'atteindront pas la limite supérieure de leur capacité et ce, pour des raisons comportementales. Leur succès de passage peut donc être surestimé.

FishXing (Furniss et al., 2003)

Le logiciel FishXing a également été utilisé pour modéliser la capacité de passage d'une portion des individus de l'étude. La modélisation a été faite avec les individus testés dans les travaux de terrain de 2009, 2010 et 2011. Par ailleurs, dû à un phénomène de refoulement vers l'amont de l'écoulement dans un des ponceaux lisses à l'étude (sites SA et SA2), FishXing ne pouvait modéliser les conditions d'écoulement de façon adéquate pour les essais effectués sur ces sites.

Les tableaux 12, 13 et 14 illustrent la comparaison entre les prédictions de FishXing et les observations de terrain.

Tableau 12: Matrice de confusion pour tous les individus testés. Approche de FishXing

.

PONCEAUX RUGUEUX ET LISSES

N = 344

	Observations		
Prédictions	Succès	Échec	Total
Succès	3	0	3
Échec	208	133	341
Total	211	133	344

Prédictions correctes:	40%		
Prédictions incorrectes:	60%	(sur-estimations):	0%
		(sous-estimations):	100%
Prévalence:	0.61		
Sensibilité:	0.01		
Spécificité:	1.00		
Validité préd. + :	1.00		
Validité pred. - :	0.39		
Kappa:	0.01		

Le taux de classification correcte du modèle global est de 40%, avec une propension absolue à sous-estimer la capacité de passage (tableau 12). Sur les 344 événements (tentatives) modélisés, seulement 3 ont été prédits fructueux. La prévalence est de 61%, il y a donc plus de la moitié des cas observés qui sont positifs (succès). Le modèle est à 100% spécifique, ce qui veut dire que sa proportion à prédire correctement les échecs est élevée et qu'il a le potentiel de grandement sous-estimer le succès de passage. Sa

validité prédictive positive est de 1. En effet, ses prédictions positives se sont avérées exactes dans les trois cas.

Tableau 13: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux rugueux. Approche de FishXing.

PONCEAUX RUGUEUX

N =	**188**		
	Observations		
Prédictions	Succès	Échec	Total
Succès	1	0	1
Échec	116	71	187
Total	117	71	188

Prédictions correctes:		38%		
Prédictions incorrectes:		62%	(sur-estimations):	0%
			(sous-estimations):	100%
Prévalence:	0.62			
Sensibilité:	0.01			
Spécificité:	1.00			
Validité préd. + :	1.00			
Validité pred. - :	0.38			
Kappa:	0.01			

Le modèle appliqué aux tentatives dans les ponceaux rugueux (tableau 13) est similaire au modèle global. Le taux de classification correcte est de 38%, avec une prévalence de 62%, une spécificité totale (1) et une validité prédictive positive de 100%. Les mêmes conclusions s'appliquent dans les ponceaux lisses (tableau 14). FishXing n'est pas sensible au type de ponceau, contrairement aux autres approches décrites précédemment. Cela est principalement dû à sa grande spécificité. Il prédit en effet presque toujours un échec, peu importe les caractéristiques du ponceau ou les conditions hydrauliques en vigueur.

Tableau 14: Matrice de confusion pour les individus testés dans les ponceaux lisses. Approche de FishXing.

PONCEAUX LISSES

N =	**156**		
	Observations		
Prédictions	Succès	Échec	Total
Succès	2	0	2
Échec	92	62	154
Total	94	62	156

Prédictions correctes	41%		
Prédictions incorrectes	59%	(sur-estimations):	0%
		(sous-estimations):	100%

Prévalence:	0.60
Sensibilité:	0.02
Spécificité:	1.00
Validité préd. +	1.00
Validité pred. -	0.40
Kappa:	0.00

Discussion

Les deux approches utilisant le concept de la distance maximale de remontée ont une performance globale plus élevée que le modèle FishXing, ainsi que nous le montrent leurs taux de classification correcte et leurs indices Kappa respectifs (tableau 15). Leur performance dans les ponceaux rugueux est toutefois très limitée, étant à peine mieux que le hasard.

Tableau 15: Indices Kappa des approches prédictives

Approche	**Global**	**Rugueux**	**Lisse**
Peake et al.	0.18	0	0.34
Castro-Santos et al.	0.26	0.11	0.39
FishXing	0.01	0.01	0

Le fait que les deux approches performent mieux dans les ponceaux lisses peut être dû à différents facteurs. Il est possible d'émettre l'hypothèse que les conditions hydrauliques dans les ponceaux lisses se rapprochent plus des conditions présentes en laboratoire, où les relations de temps à l'épuisement à la base de ces modèles ont été développées. L'écoulement est en général moins turbulent dans les ponceaux lisses et la répartition latérale des vitesses dans la coupe transversale est plus uniforme. Le modèle utilisant une valeur de vitesse d'écoulement (communément la vitesse moyenne) afin de prédire la capacité de passage, la présence d'une grande variabilité des vitesses d'écoulement dans la coupe transversale pourrait affecter la puissance prédictive du modèle. Les individus pourraient en effet faire face à des vitesses différentes de la vitesse moyenne utilisée dans le modèle et démontrer une capacité de passage moindre ou plus élevée que celle prédite, leur permettant de nager plus loin que la distance prédite. Par ailleurs, la présence d'ondulations dans les ponceaux rugueux peut créer des zones de recirculation où la vitesse d'écoulement est plus faible, ce qui pourrait permettre aux ombles de prendre du repos, venant ainsi affecter la puissance prédictive des modèles.

FishXing simule quant à lui les conditions hydrauliques tout au long du ponceau à partir des caractéristiques morphométriques de celui-ci et du débit, comparativement à l'utilisation d'une simple valeur de vitesse moyenne pour tout le ponceau. En comparant les conditions hydrauliques (vitesses et profondeurs de l'eau) simulées et mesurées pour chaque segment du ponceau, nous observons dans bien des cas des différences, les valeurs mesurées sur le terrain étant beaucoup plus hétérogènes. FishXing simule les conditions hydrauliques en utilisant une valeur de pente constante. Or, dans la réalité, la pente entre les différents segments d'un ponceau peut subir des variations longitudinales et induire une plus grande variabilité dans les vitesses d'écoulement. Par ailleurs, les sections de tuyau constituant un ponceau ne sont pas toujours parfaitement jointes, entraînant des perturbations dans l'écoulement (déviations, contre-courants) et de petites zones d'écoulement presque stagnant.

Il est possible d'appliquer, au mieux de ses connaissances, des facteurs de correction de la vitesse moyenne calculée par le logiciel afin de tenir compte du fait que la vitesse focale à laquelle fait face le poisson n'est pas toujours aussi élevée que la vitesse moyenne. Cela dépend en effet de la localisation, dans la colonne d'eau, de la trajectoire du poisson. Très peu de connaissances sont actuellement disponibles sur cette question. Les prédictions précédentes ont donc été faites en excluant l'application de tels facteurs de correction. Il est également possible de faire varier, dans le logiciel, le temps à l'épuisement qui est utilisé pour simuler la capacité de passage du poisson. Cela demande une bonne connaissance de la capacité de nage de l'espèce visée. Dans le cas de l'omble de fontaine, l'équation utilisée par FishXing pour l'omble de fontaine provient des travaux de Peake et al., 1997 et le temps à l'épuisement donné par défaut est de 10 minutes en mode prolongé et 10 secondes en mode sprint. Une équation différente, définie par l'utilisateur, pourrait toutefois être utilisée.

De plus, FishXing prédit dans tous les cas une brusque accélération de la vitesse de l'écoulement à l'extrémité amont du ponceau. À cet endroit, l'écoulement se contracte dû à la réduction de la largeur mouillée provoquée par la transition entre le cours d'eau et le ponceau. Ce phénomène n'est pas visible dans tous les cas sur le terrain, cela dépend de la configuration à l'extrémité amont du ponceau et de la présence ou non de substrat grossier à cet endroit. Dans quelques cas de prédiction du logiciel FishXing, c'est cette accélération de la vitesse à l'amont qui est la cause de l'échec de la tentative de passage.

La forte sous-estimation de la capacité de passage dans les approches de Peake et al. et de FishXing peut être due à des estimés conservateurs de la capacité de nage des ombles. Les conditions dans lesquelles les relations de temps à l'épuisement ont été élaborées étaient très différentes de celles prévalant en milieu naturel. FishXing utilise les estimés provenant des travaux de Peake et al., mais ne tient pas compte de la température de l'eau, ni d'une quelconque stratégie d'optimisation de la part des individus (utilisation d'une vitesse de nage optimale afin de maximiser la distance parcourue) pour faire ses prédictions. La distance de remontée simulée pour le poisson dans FishXing n'est donc pas, mathématiquement parlant, une distance «maximale». En résumé, il est possible de conclure que FishXing sous-estime la capacité de passage pour 2 principales raisons : des estimés conservateurs de la capacité de nage et des conditions hydrauliques peu représentatives de la réalité dans certains cas.

Les relations sur lesquelles repose l'approche de Castro-Santos et al. ont quant à elles été élaborées à partir de données de nage provenant d'expériences effectuées dans un laboratoire imitant davantage le milieu naturel. De plus, ces expériences ont été menées pendant la période de reproduction de l'omble de fontaine, à un moment où la motivation des poissons est élevée. Ces relations montrent une capacité de nage beaucoup plus élevée pour cette espèce que ce qui était connu jusqu'alors. Le fait que le modèle associé surestime la capacité de passage des ombles de l'étude suggère qu'une proportion des poissons testés avait la capacité physiologique de traverser le ponceau sous les conditions d'écoulement en vigueur, mais ne l'a pas fait. Ces individus ont rebroussé chemin pour des raisons inconnues. Il est possible qu'ils n'aient pas réussi à adopter une stratégie adéquate de maximisation de la distance (choix d'une vitesse de nage optimale) et qu'ils se soient épuisés avant d'atteindre l'amont du ponceau. Il est également possible que ces individus n'aient pas expérimenté la fatigue proprement dite, mais que des raisons d'ordre comportemental associées à des facteurs internes (degré de motivation, traits de personnalités) ou externes (prédation, degré d'attractivité faible du ponceau) les aient incités à rebrousser chemin lors de leur tentative de remontée. Par ailleurs, le fait que le modèle puisse sous-estimer la distance parcourue par certains ombles, et donc leur succès de passage, indique que même la nouvelle relation de temps à l'épuisement sur laquelle est basé le modèle ne décrit pas parfaitement la capacité de nage observée sur le terrain. Certains ombles ont nagé plus loin que ce dont ils étaient physiologiquement capables selon le modèle de Castro-Santos et al (2013).

Choix d'un modèle

Sur les trois approches évaluées, deux sont spécifiques et une est sensible.

D'entrée de jeu, FishXing est très peu performant et sa présentation sous forme de logiciel peut rendre son utilisation difficile car l'utilisateur ne dispose pas de contrôle sur toutes les étapes de la modélisation. Il a toutefois l'avantage de permettre la modélisation des conditions hydrauliques lorsque le débit et les caractéristiques du ponceau sont disponibles. À la lumière des résultats précédents, son utilisation pour prédire la capacité de passage de l'omble de fontaine dans les ponceaux est discutable.

Les approches de Peake et al., et Castro-Santos et al., peuvent être utilisées, de préférence dans les ponceaux lisses, en gardant en mémoire leur propension respective à sous-estimer et surestimer la capacité de passage. Tout dépend de ce que l'on cherche à prédire et du coût associé aux erreurs de prédiction. Ainsi, si l'objectif est de déterminer si une structure est impassable (par exemple afin de bloquer une espèce envahissante), le modèle de Castro-Santos et al., est préférable car il produit peu de cas «faux négatifs». Dans le cas où l'objectif est de déterminer si un ponceau est passable sous une gamme de conditions hydrauliques, les deux modèles sont acceptables. L'approche de Castro-Santos et al., offre l'avantage de se baser sur des estimés de la capacité de nage provenant de conditions plus semblables aux conditions naturelles. Il est également beaucoup plus simple d'utilisation et ne nécessite pas de données sur la température de l'eau. Dans les deux cas, il est possible de modéliser, pour une gamme de longueurs d'omble, des longueurs de ponceaux acceptables pour différentes vitesses d'écoulement.

Dans tous les cas, tous ces modèles estiment la capacité physiologique de l'omble de fontaine à franchir une barrière de vitesse d'écoulement. Les approches utilisant la vitesse de nage optimale établissent le seuil supérieur de performance pour l'omble de fontaine. Certaines barrières sont d'ordre physique, mais également comportemental. Il y aura donc toujours une proportion d'individus qui, bien qu'ayant la capacité physique de franchir le ponceau, ne le feront pas dans la réalité. Cette proportion peut varier selon les populations, mais aussi en fonction de différents facteurs reliés au ponceau ou aux conditions environnementales. Les données recueillies dans le cadre du projet de recherche pourront être utilisées pour élaborer des relations de temps à l'épuisement pour les ombles à l'étude. Il est donc possible qu'un modèle différent puisse être développé à partir de ces relations. Il faudra toutefois tester ensuite son efficacité de prédiction sur de nouvelles données de passage.

Modélisation de la probabilité de succès pour un omble donné

Une approche logistique a par ailleurs été utilisée avec les données recueillies en conditions semi-expérimentales (méthode utilisant une cage fixée à l'aval du ponceau) pour déterminer la probabilité qu'un omble d'une taille donnée franchisse un ponceau sous différentes conditions d'écoulement et de température de l'eau. Seuls les ombles ayant effectué au moins une tentative (n = 496) ont été utilisés. Les variables prédictives prises en compte sont : le débit, la vitesse d'écoulement, le rayon hydraulique, la profondeur de la fosse aval, la pente du ponceau, la longueur du ponceau, le type de ponceau (lisse ou rugueux), la longueur à la fourche du poisson, son nombre de tentative par période de 24 heures, la température de l'eau, la durée de l'essai ainsi que les interactions correspondantes. Suite à des tests pour vérifier la présence de multicollinéarité entre les variables, la variable «débit» a été retirée. Un ensemble de modèles candidats a été constitué et la sélection du ou des meilleurs modèles effectuée en utilisant une méthode basée sur la minimisation du critère d'information d'Akaike (AIC).

Le modèle logistique a en premier lieu tenu compte du fait que plusieurs observations pouvaient appartenir au même individu dans le cas de tentatives multiples et que plusieurs individus avaient été testés au même site et durant le même essai. Une sélection de modèles à plusieurs niveaux hiérarchiques (site; essai; individu) et comportant des effets aléatoires a d'abord été effectuée dans SAS (version 9.3) avec la procédure Glimmix. Toutefois, les effets aléatoires ajoutés sur le site et sur l'essai ont eu pour conséquence d'absorber une partie de la variabilité liée aux variables mesurées sur ces niveaux, ce qui a rendu la sélection de modèle difficile. Après réflexion, les effets aléatoires ont été retirés et la sélection de modèle a été effectuée sur deux bases de données : une première comportant les variables non-transformées et une deuxième où certaines variables (vitesse, rayon hydraulique, profondeur de la fosse aval, longueur du ponceau) ont été standardisées en longueurs de corps. La standardisation des variables atténue le fait que plusieurs individus aient été testés dans les mêmes conditions car la valeur de ces variables n'est désormais plus unique pour un site ou un essai donné, mais variable selon la taille de chaque individu. Le fait que plusieurs individus aient été testés simultanément peut toutefois avoir un effet sur leur comportement individuel.

Le nombre de succès versus le nombre de tentatives par individu a d'abord été considéré en tant que variable à expliquer. Cette variable est toutefois sensible au fait qu'une proportion des tentatives effectuées par les ombles peut correspondre à des comportements exploratoires, venant du même coup sous-estimer la probabilité de succès. Nous avons donc choisi de ne retenir que le succès ou l'échec pour un même individu et ce, peu importe son nombre de tentatives. Le nombre de tentative par période de 24h (afin de pallier au fait que les essais n'avaient pas tous la même durée) a toutefois été considéré en tant que variable prédictive dans certains modèles candidats. Ces analyses ont été effectuées dans SAS 9.3 avec la procédure Logistic.

Résultats

Par souci de simplicité, les résultats sont présentés dans le tableau 16 pour les données standardisées en longueurs de corps. Ils ne diffèrent cependant que très peu de ceux obtenus avec les variables non-standardisées et, dans les deux cas, le modèle retenu est le même.

Le modèle présentant le plus petit AIC est considéré comme le meilleur modèle car il procure un bon ajustement aux données tout en minimisant le nombre de paramètres (principe de parcimonie). La règle empirique proposée par Burham et Anderson (2002) est celle-ci : Δ AIC entre 0 et 2 (modèles peu différents), Δ AIC entre 4 et 7 (modèles assez différents) et Δ AIC >10 (modèles très différents sans équivoque). Les poids d'Akaike (*w*), dont la somme est égale à 1, constituent aussi une indication de la force d'évidence d'un modèle en tant que meilleur modèle.

Tableau 16 : Ce tableau contient les trois modèles recevant le support le plus élevé des données. Il présente aussi les valeurs d'AIC pour chacun des modèles, le nombre de paramètres (K), les différences d'AIC entre le meilleur modèle et ses concurrents (Δ AIC) ainsi qu'entre le modèle nul (Δ AIC nul) et le poids d'Akaike (*w*), correspondant à une approximation de la fréquence de sélection d'un modèle en tant que meilleur modèle

Modèle	K	AIC	Δ AIC	*w*	Δ AIC nul
T°eau + type de ponceau + Uflow+ Rh + profondeur fosse aval + Lf + durée essai + type ponceau*Lf	**10**	**455.0**	**0.0**	**0.990**	**235.8**
T°eau+ Lp + type de ponceau + S + Lf+ Rh + profondeur fosse aval+S*Rh+Rh*type ponceau	11	462.0	6.4	0.045	229.5
T°eau +Uflow + Rh + Lf + profondeur fosse aval + reproduction + T°eau*reproduction	9	467.3	11.7	0.003	224.2

Uflow = vitesse de l'eau; S = pente du ponceau; Rh= rayon hydraulique; Lf= longueur du poisson Lp = longueur ponceau

Dans notre cas particulier, un seul modèle reçoit un support élevé des données, avec un Δ AIC de 6.4 entre celui-ci et le modèle suivant et un poids d'Akaike de 0.990. Ce modèle comprend les paramètres suivants :

- Température de l'eau (°C)
- Type de ponceau (rugueux v/s lisse)
- Vitesse moyenne de l'écoulement (*BL*/s)
- Rayon hydraulique (*BL*)[4]
- Profondeur de la fosse aval (*BL*)
- Longueur à la fourche du poisson (mm)

[4] Équivalent au ratio de l'aire d'écoulement (A) et du périmètre mouillé (P).

Pour des ponceaux circulaires, A = $r^2(\theta - \cos\theta \sin\theta)$ et P = $2r(\theta)$ où r est le rayon du ponceau, y la profondeur moyenne de l'écoulement et θ est estimé par : $\theta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{y}{r}\right)$.

- Durée de l'essai (h)
- Interaction entre le type de ponceau et la longueur du poisson.

Le modèle s'exprime comme suit :

$$P(succès = 1) = \frac{e^{\beta 0 + \beta 1x1 + \beta 2x2 + \beta 3x3 + \beta 4x4 + \beta 5x5 + \beta 6x6 + \beta 7x7 + \beta 8x8}}{1 + e^{\beta 0 + \beta 1x1 + \beta 2x2 + \beta 3x3 + \beta 4x4 + \beta 5x5 + \beta 6x6 + \beta 7x7 + \beta 8x8}}$$

Où :

Tableau 17 : Estimés standardisés des paramètres du modèle logistique avec les variables standardisées en longueurs de corps et les variables en unités standards. Le coefficient β2 est multiplié par 1 dans le cas d'un ponceau rugueux et par 0 dans celui d'un ponceau lisse.

	Paramètres	**Estimés**	**SE**	***P****
β0	Ordonnée à l'origine	3.8200	1.5221	0.005
β1	Température de l'eau	0.1739	0.0618	0.003
β2	Type de ponceau (rugueux v/s lisse)	5.2300	1.5032	0.001
β3	Longueur du poisson	-0.0200	0.0064	< 0.001
β4	Type ponceau * longueur poisson	-0.0288	0.0101	0.004
β5	Vitesse moyenne d'écoulement	-0.5097	0.0623	< 0.001
β6	Rayon hydraulique	0.9989	0.3771	0.001
β7	Profondeur de la fosse aval	-0.9589	0.1291	< 0.001
β8	Durée de l'essai	0.0820	0.0208	< 0.001

** chi-square p-values*

Le tableau 17 présente les estimés des paramètres pour le modèle retenu. Ces estimés sont présentés ici sous leur forme non-standardisée et sont donc dépendants des unités dans lesquelles les variables explicatives ont été mesurées ainsi que de l'étendue des valeurs de ces variables. La probabilité de succès est influencée de façon positive par la température de l'eau (coefficient β1), un ponceau de type rugueux (coefficient β2), le rayon hydraulique (coefficient β6) et la durée de l'essai (coefficient β8), une augmentation des valeurs de ces paramètres faisant augmenter la probabilité de succès. La longueur du poisson (coefficient β3), la vitesse d'écoulement (coefficient β5), la profondeur de la fosse aval (coefficient β7) ainsi que l'interaction entre le type de ponceau et la longueur du poisson (coefficient β4) ont au contraire un effet négatif sur le succès, celui-ci diminuant avec l'augmentation des valeurs de ces paramètres.

L'effet de la température de l'eau peut s'expliquer par l'influence de celle-ci sur la capacité aérobie du poisson, et, par le fait même, sur sa capacité à franchir un obstacle. Son influence sur la motivation du poisson, par exemple à l'approche de la période de reproduction, peut également être une piste d'explication. Un effet linéaire de la

température de l'eau sur la performance de nage n'est toutefois pas anticipé, une diminution de la performance étant attendue au-delà d'une certaine température. Cette question sera abordée dans la poursuite de la thèse afin de voir si les données recueillies permettent d'identifier une température de l'eau optimale en termes de probabilité de succès de passage.

Il est surprenant de constater un coefficient négatif relié à la longueur du poisson dans un modèle où les variables sont standardisées en longueurs de corps, cela signifiant que les plus grands individus performent moins bien que les plus petits. Ce résultat est cependant consistant avec les résultats issus de la comparaison entre les modèles prédictifs existants et les observations de terrain, où le succès de passage des petits ombles était sous-estimé par les modèles. Les petits ombles démontraient une performance de nage relative plus élevée que ce que les relations de temps à l'épuisement existantes laissaient présager. Les travaux précédents n'ont toutefois pas testé des ombles dont la longueur à la fourche était inférieure à 110 mm et il est fort possible qu'une certaine allométrie existe dans la relation entre la taille des poissons et leur capacité de nage en mode prolongé ou sprint, les plus petits ayant une capacité de nage relative plus élevée que les grands.

Un ponceau de type rugueux (tôle ondulée) influence positivement la capacité de passage comparativement à un ponceau lisse (béton ou plastique). Cela peut être lié au fait que les ponceaux rugueux sont habituellement associées à une hétérogénéité plus importante des conditions d'écoulement et à la présence, dans la coupe transversale, de zones de vitesses d'écoulement réduites. Ce paramètre interagit par ailleurs avec la longueur du poisson, un produit élevé de ces deux variables faisant diminuer la probabilité de succès. En d'autres mots, les ombles tirent avantage d'un ponceau rugueux, mais seulement jusqu'à une certaine longueur d'individu (~ 160 mm), au-delà de laquelle le type de ponceau n'a plus d'importance sur la capacité de succès. Nous émettons donc l'hypothèse que les petits ombles sont plus à même de tirer profit de la complexité hydraulique présente dans les ponceaux rugueux, ce qui peut expliquer en partie leur performance relative supérieure. Cette hypothèse sera élaborée plus en détail dans la thèse de doctorat.

Une vitesse d'écoulement élevée limite la capacité physique du poisson à franchir le ponceau tandis qu'un rayon hydraulique élevé l'augmente. Un rayon hydraulique élevé est indicateur d'une profondeur d'écoulement plus importante. À vitesse d'écoulement égale, l'augmentation de la profondeur de l'eau aura un effet positif sur la probabilité de passage. Le gradient de vitesses d'écoulement sera en effet beaucoup moins prononcé dans le ponceau avec une grande profondeur. Le pourcentage de l'aire d'écoulement où les vitesses sont inférieures à la vitesse moyenne sera plus important dans ce tuyau que dans celui où l'épaisseur d'eau est inférieure, ce qui peut avoir un effet positif sur l'aptitude du poisson à le franchir. Le rayon hydraulique, équivalent au ratio de l'aire d'écoulement et du périmètre mouillé (points de contact entre le fond du ponceau et l'eau) est également un indicateur de l'efficacité du ponceau à évacuer sa charge hydraulique. Un rayon élevé signifie que la surface de contact avec le fond du ponceau

est réduite en comparaison avec l'aire d'écoulement, ce qui diminue les forces de cisaillement et accroît l'efficacité d'évacuation de la charge hydraulique. Il est fort possible que l'effet de cette variable soit donc relié à des questions de perception de l'environnement, de motivation et de comportement de nage.

La profondeur de la fosse aval a un effet négatif sur le succès de passage, celui-ci diminuant lorsque la profondeur de la fosse augmente. Nous émettons l'hypothèse qu'une profondeur plus élevée diminue la perception, par le poisson, de l'écoulement entrant dans la fosse en provenance de l'amont. Un écoulement possédant une énergie élevée peut en effet stimuler la motivation des ombles par le phénomène de rhéotaxie positive et favoriser le degré d'attractivité du ponceau. Il est à noter qu'aucune profondeur très faible de la fosse aval n'a été testée dans nos essais de passage. Une certaine profondeur à l'aval du ponceau est toutefois nécessaire pour que le poisson puisse approcher le ponceau, se reposer dans le cas de multiples tentatives et prendre son élan dans celui où un saut est nécessaire pour entrer dans le ponceau (Kondratieff and Myrick 2005). Une profondeur de fosse élevée peut également être associée à un environnement plus confortable pour les ombles, entraînant une éventuelle diminution de leur motivation à se déplacer vers l'amont.

Enfin, la durée de l'essai a une influence positive sur la probabilité de succès dans le modèle, probablement dû au fait qu'un essai plus long augmentait la probabilité qu'un omble donné complète avec succès une tentative de passage (le système PIT était arrêté au terme de l'essai et ce même si certains individus étaient en train de franchir le ponceau), mais également au fait que les opportunités de récupération entre des tentatives subséquentes étaient accrues dans le cas d'un essai plus long. D'un point de vue d'applicabilité du modèle, il est intéressant de s'interroger sur la durée acceptable du délai aux déplacements induit par la présence d'un ponceau. Cette valeur peut changer selon la période de l'année (ex : période de reproduction) ou les circonstances (ex : ponceau situé sur un tributaire utilisé comme refuge thermique). Ainsi, si 24 h semble un délai acceptable en période de reproduction, cette valeur peut être utilisée dans le modèle pour prédire la probabilité de succès.

Il est intéressant de constater que la longueur du ponceau ne constitue pas un paramètre présent dans le modèle retenu alors que son impact sur la fatigue d'un individu peut paraître évident. Il est toutefois probable que certains ombles testés dans la présente étude n'aient pas expérimenté la fatigue physique proprement dite, mais aient plutôt abandonné leurs tentatives de passage pour des raisons comportementales liées à la motivation et à l'attraction exercée par le ponceau, diminuant ainsi l'influence de la longueur du ponceau sur la probabilité de passage.

Application et validation du modèle

Pour un ponceau circulaire en tôle ondulée avec une température de l'eau de 15°C, une vitesse moyenne d'écoulement de 1.5 m/s, un rayon hydraulique de 0.14 m, et une profondeur de fosse aval de 0.5 m, la probabilité de succès d'un individu de 100 mm effectuant au moins une tentative en 48h est de :

$$P\,(succès) = \frac{e^{3.2200+(0.1739\times 15)+(5.2300\times 1)+(-0.0200\times 100)+(-0.5097\times 15)+(-0.0222\times(1\times 100))+(0.9929\times 1.4)+(-0.9529\times 5)+(0.0220\times 42)}}{1+e^{3.2200+(0.1739\times 15)+(5.2300\times 1)+(-0.0200\times 100)+(-0.5097\times 15)+(-0.0222\times(1\times 100))+(0.9929\times 1.4)+(-0.9529\times 5)+(0.0220\times 42)}}$$

$$P\,(succès) = 0.42$$

Note : Excepté pour la température et la durée de l'essai, les variables sont standardisées en longueurs de corps. Ainsi, pour un omble de 100 mm, une vitesse d'écoulement de 1.5 m/s est égale à 15 BL/s.

Dans ce cas spécifique, le simple fait de réduire la vitesse de l'écoulement à 1 m/s fait passer la probabilité de succès de 0.42 à 0.90. Le fait de passer d'un ponceau rugueux à un ponceau lisse fait toutefois chuter la probabilité de succès à 0.06 dans le cas d'une vitesse d'écoulement de 1.5 m/s et à 0.47 pour une vitesse de 1 m/s.

Le modèle décrit précédemment a été développé avec des ombles de fontaine dont la longueur se situe entre 85 et 230 mm, sous des températures de l'eau entre 1.5 et 18 degrés Celsius et dans des ponceaux dont la longueur se situe entre 8 et 45 mètres. Il doit maintenant être testé afin de mieux évaluer son taux de classification correcte et ainsi confirmer sa validité. Il est possible de le faire en utilisant le jeu de données même qui a servi à le développer, avec cependant une tendance à surestimer la probabilité de bien prédire. Une validation croisée a donc été utilisée afin de déterminer la valeur prédictive globale du modèle. L'aire sous la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic,* Allison, 2013), une approche mesurant le degré d'association entre les observations et les probabilités prédites, a été utilisée. Cette aire, d'une valeur maximale de 1, est obtenue en illustrant graphiquement la sensibilité (proportion de succès correctement prédits) et la spécificité (proportion d'échecs correctement prédits) et ce, pour tous les niveaux de probabilité. Dans le cas présent, nous avons obtenu une aire sous la courbe ROC de 0.88, ce qui est l'indication d'une valeur prédictive élevée pour le modèle retenu. Le même exercice a été effectué en utilisant les 36 individus relâchés librement en aval des ponceaux et ayant effectué des tentatives de passage. L'aire sous la courbe ROC obtenue est de 0.85. Ce résultat est intéressant dans le sens où ce modèle est susceptible d'être utilisé afin de prédire la probabilité de succès pour des

ombles libres. Par ailleurs, la pente et la vitesse de l'écoulement n'ont jamais été utilisées ensemble dans un modèle candidat car ces deux variables sont étroitement corrélées entre elles. Toutes choses étant égales par ailleurs, des pentes fortes augmentent les chances d'expérimenter des vitesses d'écoulement élevées dans les ponceaux. Il est légitime de se demander si la probabilité de succès pourrait être prédite en substituant la pente à la vitesse de l'écoulement dans le modèle prédictif. La figure illustre la courbe ROC pour deux modèles : un incluant la vitesse de l'écoulement et l'autre la pente du ponceau. La puissance prédictive de ces deux modèles est sensiblement la même, avec des valeurs d'aires sous la courbes ROC respectives de 0.89 et 0.90.

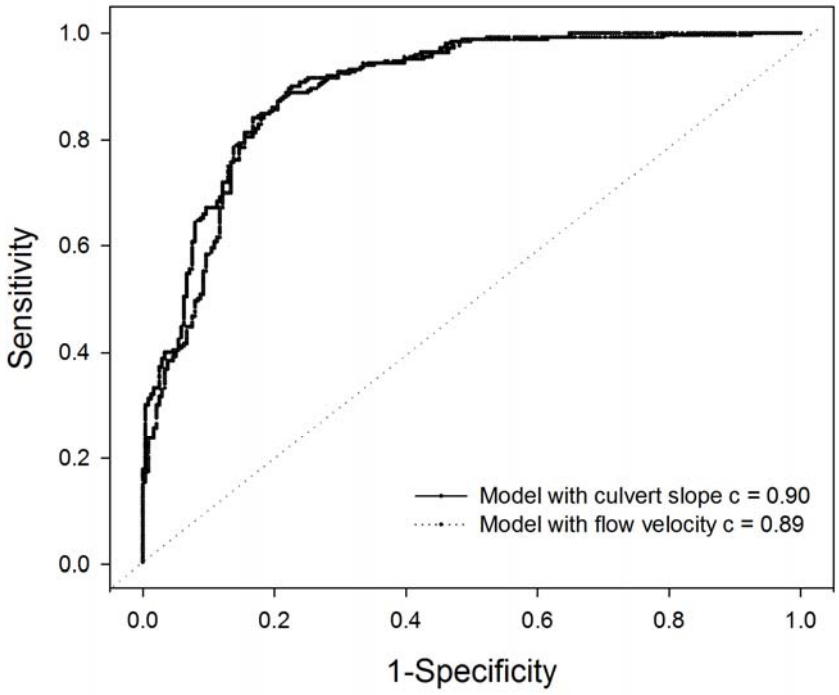


Figure 39: Aire sous la courbe ROC pour deux modèles prédictifs de passage : l'un incluant la vitesse de l'écoulement et l'autre la pente du ponceau.

L'utilisation de la pente du ponceau comme variable explicative du succès de passage sera donc explorée lors de la poursuite de la thèse. Toutefois, lorsqu'un poisson effectue une tentative de remontée d'un ponceau, il fait face à la vitesse de l'écoulement plutôt qu'à la pente. Il est en effet à même, de par ses organes sensoriels, de ressentir les variations de l'écoulement et, éventuellement, d'en tirer profit. Pour cette raison, nous croyons que l'utilisation de la vitesse de l'écoulement est préférable pour prédire le succès de passage, bien que la pente, de par sa nature statique, possède d'indéniables avantages pratiques.

DISCUSSION ET AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

Le libre passage des poissons dans les ponceaux est un phénomène complexe impliquant de multiples variables et susceptible d'avoir une composante temporelle importante. Un même ponceau peut constituer une barrière complète ou partielle à une certaine période de l'année et être relativement perméable aux mouvements des poissons à une autre. D'autres ponceaux auront un degré de perméabilité faible peu importe le moment considéré.

Les travaux effectués dans le cadre du présent projet ont permis de mieux comprendre les relations entre certaines variables biologiques, hydrauliques ou morphométriques et la probabilité de succès lorsqu'un individu effectue une tentative. Sans surprise, la vitesse de l'écoulement et la pente se sont avérées influencer le succès de passage. Le type de ponceau également, le fait de diminuer la rugosité du ponceau faisant décroître la probabilité de passage. Ainsi, le fait d'effectuer la réfection de ponceau à l'aide de la technique d'insertion aura un effet négatif sur la probabilité de passage car cela aura pour conséquence d'augmenter les vitesses d'écoulement, de diminuer les profondeurs, mais également de faire disparaître les éléments de rugosité du ponceau, soit les ondulations. Cette technique doit donc être utilisée avec précaution dans les endroits où le passage du poisson est requis et peut nécessiter la mise en place d'ouvrages complémentaires afin de recréer des éléments de rugosité dans le ponceau. De tels aménagements ont toutefois un coût pouvant devenir prohibitif s'ils sont effectués sur une grande échelle, d'où l'importance de raffiner les méthodes de prédiction de la capacité de passage de l'omble de fontaine afin de pouvoir identifier le degré de perméabilité des traverses de cours d'eau situés sur le territoire québécois. Pour ce faire, il faut toutefois pouvoir identifier les conditions hydrauliques, ayant cours dans les ponceaux. Ainsi, le développement de méthodes permettant d'estimer les débits ayant cours en période d'étiage ou de niveaux d'eau intermédiaires semble primordial car il est ensuite possible d'estimer la vitesse et la profondeur de l'écoulement pour un ponceau donné. Ces données peuvent être mises en relation avec la capacité de nage du poisson afin de prédire si celui-ci peut franchir le ponceau.

Les modèles de passage mécanistes utilisant le concept de distance maximale de remontée ont permis de comprendre comment la capacité de nage et le franchissement d'un ponceau sont reliés et de prédire, dans une certaine mesure, l'issue d'une tentative de passage. Ces modèles assument que chaque individu qui effectue une tentative est hautement motivé, ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité et peut mener à des surestimations de la capacité de passage. En milieu naturel, d'autres facteurs peuvent entrer en ligne de compte et la capacité de nage des ombles peut également être différente de celle d'individus testés en captivité, d'où l'origine des sous-estimations des modèles. Les données recueillies durant le projet de recherche permettent de mettre en lumière ces nuances et d'apporter de nouveaux éléments sur la capacité de nage et le

succès de passage d'ombles testés directement sur le terrain. Le fait que plusieurs populations d'ombles de fontaine provenant d'environnements avec des régimes hydrauliques et de température différents aient été testées contribue par ailleurs à la robustesse des modèles en cours de développement.

Près de la moitié des individus testés dans l'étude n'effectuaient toutefois aucune tentative de passage. Dans la réalité, une proportion des ombles susceptibles de tenter de franchir un ponceau ne le font pas et ce, même si celui-ci est facilement franchissable. Les ponceaux peuvent donc constituer non pas seulement des barrières physiques, mais également comportementales, le ponceau idéal étant celui offrant un degré d'attractivité élevé tout en présentant des conditions hydrauliques acceptables en regard de la capacité de nage du poisson. Les connaissances sur ce qui peut influencer la motivation de l'omble de fontaine ou de d'autres espèces à franchir les ponceaux sont encore fragmentaires et il serait intéressant de modéliser non pas la probabilité de succès d'une tentative, mais sa probabilité d'occurrence en fonction de l'évolution de différentes variables. La fréquence à laquelle les ombles effectuent des tentatives sur une période donnée est également un bon indice de leur niveau global de motivation. La motivation peut être influencée par des facteurs externes ou internes à l'individu. Parmi ceux-ci, ceux associés à la reproduction poussent les salmonidés à se déplacer (souvent vers l'amont) afin de trouver des sites de fraie adéquats. Un individu sexuellement mature en période de reproduction est donc susceptible de déployer beaucoup d'énergie et d'efforts pour franchir un ponceau. Cette hausse de la motivation va se traduire dans la capacité de nage du poisson ainsi que dans son succès de passage. Dans le cadre du présent projet, une expérience a été effectuée dans un ponceau long pendant la période de reproduction. La conception expérimentale de cette expérience permettait une résolution spatiale beaucoup plus fine des mouvements avec la présence non pas de quatre, mais de vingt antennes PIT. Les données recueillies durant ces travaux seront présentées dans la thèse de doctorat et permettront de bonifier les résultats mentionnés dans ce rapport

Les conditions hydrauliques aux extrémités ainsi qu'à l'intérieur du ponceau sont au cœur du processus de franchissement de celui-ci. Une fois le poisson à l'intérieur, ce sont ces variables qui déterminent sa capacité à le franchir. La façon dont un poisson fait face aux conditions hydrauliques en vigueur (et en tire profit pour optimiser sa distance parcourue) est liée à son comportement de nage. Là encore, l'acquisition de nouvelles connaissances est nécessaire, notamment en ce qui a trait au comportement des ombles sous différentes conditions hydrauliques, mais également selon la personnalité des individus. Afin de mieux comprendre les mécanismes à la base du processus de franchissement des barrières de vitesses, l'observation en continu de la progression du poisson et la détermination des trajectoires empruntées par celui-ci à l'intérieur du ponceau sont nécessaires pour ensuite relier ces données avec la distribution spatiale des vitesses et des profondeurs d'écoulement. Le comportement de nage du poisson, la façon dont il exploite les conditions hydrauliques, les composantes

de la turbulence ou les éléments de rugosité présents dans le ponceau (ondulations, substrat) sont des avenues de recherche à privilégier dans le futur.

CONCLUSION

De façon générale, les résultats de ce projet ainsi que ceux de la thèse de doctorat dont il fait partie intégrante permettent de mieux comprendre les facteurs qui régissent la capacité de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux. Les données de tentatives et de passage recueillies sur le terrain pour l'omble de fontaine sont d'un intérêt certain pour la modélisation de la capacité de cette espèce à franchir les ponceaux et ce, autant pour l'amélioration des modèles de passage existants que pour le développement de nouvelles approches. Les données sur la capacité de nage des individus testés apporteront par ailleurs une contribution importante aux connaissances actuelles sur la performance de nage de l'omble de fontaine, encore peu nombreuses. Le fait que les ombles étudiés dans le cadre de la thèse soient libres de nager dans leur environnement habituel, sans y être forcés, sera intéressant du point de vue de la contribution des résultats aux données existantes. Plusieurs aspects demeurent cependant à étudier, notamment :

- Estimation des débits en période d'étiage ou de niveaux d'eau intermédiaires.
- Facteurs influençant la motivation de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux
- Impact de la baisse de luminosité reliée à la présence d'un ponceau sur la motivation et le succès de passage des poissons
- Comportement de nage de l'omble de fontaine
- Développement de facteurs de correction des conditions hydrauliques afin d'améliorer les modèles de prédiction du succès de passage

De façon plus appliquée, les résultats du présent projet pourront ensuite être utilisés afin d'optimiser les normes de conception et d'installation des ponceaux, favorisant ainsi une meilleure conciliation du développement du réseau routier et de la conservation des écosystèmes fluviaux. Pouvoir mieux prédire la capacité d'un individu donné à franchir un ponceau permettra d'identifier, dès la conception, les structures pouvant être problématiques quant au libre-passage et d'y apporter les correctifs nécessaires. Les résultats pourront être intégrés dans les guides d'aide à la décision pour l'évaluation des impacts des ponceaux sur l'habitat du poisson (Pêches et Océans Canada, 2012), destinés aux intervenants œuvrant avec la problématique du libre-passage des poissons dans les structures routières. La tenue d'un atelier de transfert de connaissances en avril 2013 a permis de souligner à quel point la concertation entre les intervenants concernés est primordiale pour définir ce qui est souhaitable et réalisable en termes de libre passage du poisson : seuils acceptables de passage, classes de tailles visées, périodes critiques où la mobilité doit être assurée. Afin de préserver l'intégrité

écologique et génétique des populations, il est souhaitable que les ponceaux soient perméables à des ombles de fontaine de tailles variées et ce, durant une période de temps prolongée de l'année. Les impératifs sociaux-économiques doivent également être pris en compte, d'où l'importance de bien concevoir les futurs ouvrages de traversée de cours d'eau et de pouvoir identifier les ouvrages existants posant un problème en ce qui a trait au passage du poisson. Tout cela permet globalement de réduire les coûts, autant économiques qu'environnementaux, pour la société. À ce stade-ci des analyses, il est encore tôt pour émettre des conclusions définitives en ce qui a trait à l'influence des différentes variables étudiées sur le succès de passage. Au terme de ce projet de recherche, beaucoup de questions demeurent sans réponse. La poursuite des travaux dans le cadre de la thèse de doctorat vont permettre de faire avancer le processus d'acquisition de connaissances. En fonction des connaissances actuelles et des résultats disponibles au terme de ce projet, il est possible d'émettre certaines recommandations en ce qui a trait au libre passage de l'omble de fontaine dans les ponceaux. Les valeurs seuils énoncées dans ces recommandations sont issues des résultats propres au présent projet en date de ce rapport ainsi que de d'autres travaux recherches déjà publiés. Les valeurs seuils ainsi que les connaissances sur le sujet sont toutefois susceptibles d'évoluer avec l'avancement des travaux de recherche en cours.

En premier lieu, il n'est actuellement pas recommandé d'utiliser le logiciel FishXing pour déterminer la capacité de passage de l'omble de fontaine dans un ponceau donné. Les données de performance de nage qu'utilise le logiciel pour faire les simulations de passage sont conservatrices du point de vue de la capacité de nage de cette espèce. Une refonte du logiciel serait nécessaire afin de rendre son utilisation plus facile et transparente, notamment en ce qui a trait au choix des paramètres biologiques (temps à l'épuisement de l'espèce visée) et du choix des données de performance de nage (intégration de données issues d'études récentes). Dans le cas où FishXing est remis à jour, son utilisation pourrait devenir intéressante. Les relations de temps à l'épuisement de Castro-Santos et al. (2013) peuvent être utilisées pour prédire si un omble de fontaine d'une taille donnée peut franchir un ponceau sous différentes conditions hydrauliques. En fonction des modèles existants actuels, c'est celui offrant les résultats optimaux quant aux données terrain obtenus dans le présent projet, soit pour prédire correctement le succès de passage du poisson sous diverses conditions hydrauliques. Cette approche est détaillée à la section portant sur les modèles de type «distance de remontée» et illustrée à l'annexe B pour des ombles de différentes tailles. Par contre, avec la finalisation des modèles en développement dans le cadre du présent projet, il est possible d'espérer comprendre encore plus finement les variables prépondérantes au succès de passage du poisson.

Bien que la construction d'un pont comportant des unités de fondation situées à l'extérieur du cours d'eau demeure l'option qui maximise la perméabilité d'une infrastructure routière traversant un habitat du poisson, il est évident que les coûts et les autres contraintes associées à ce type d'ouvrage font que l'aménagement de ponceaux

sera souvent l'option privilégiée. Afin d'assurer un niveau de franchissement élevé dans ce type de traverses de cours d'eau, il est recommandé que les ponceaux possèdent les caractéristiques suivantes :

- **Pente**

  Idéalement, maintenir une pente suivant le profil naturel du cours d'eau dans le cas où la pente de celui-ci est inférieure à 2 %. À une pente supérieure, les vitesses d'écoulement sont accrues significativement, résultant dans le présent projet en 50% d'échec dans les tentatives de passage. Il est également recommandé, dans le cas de la conception d'une nouvelle route, de sélectionner dans la mesure du possible un tracé où les pentes des traverses de cours d'eau seront inférieures à 2%.

- **Largeur du cours d'eau.**

  Réduire au minimum la largeur du cours d'eau. Le fait de réduire celle-ci favorise une contraction de l'écoulement à l'extrémité amont du ponceau et une élévation des vitesses d'écoulement dans celui-ci, ce qui peut limiter la capacité de passage du poisson.

- **Extrémité aval du ponceau:**

  L'extrémité aval du ponceau ne doit idéalement pas être surélevée, bien qu'une chute inférieure à 10 cm par rapport à la surface du cours d'eau peut permettre à des ombles de longueurs variées d'entrer dans le ponceau (Kondratieff and Myrick, 2005). La création d'un bassin de dissipation d'énergie à l'aval du ponceau peut être utile afin de procurer une profondeur adéquate et des abris aux poissons, leur permettant de se reposer après une tentative de passage. Un bassin à l'aval permet également d'augmenter la probabilité de franchissement dans le cas où la sortie aval du ponceau est surélevée (Kondratieff and Myrick, 2005).

- **Vitesse d'écoulement moyenne**

  La vitesse d'écoulement moyenne dans le ponceau devrait être inférieure à 1 m/s, en excluant des périodes de crue. À l'intérieur du présent projet, à des vitesses moyennes supérieures à 1m/s, le succès de passage était inférieur à 40%, tandis qu'à des vitesses moyennes inférieures à 1m/s, le succès de passage était de plus de 60%. De plus, une vitesse d'écoulement moyenne

égale ou inférieure à 1 m/s permet à des ombles de fontaine de plus de 125 mm de franchir des ponceaux d'une longueur égale ou supérieure à 25 m (Castro-Santos et al. 2013). Pour des individus dont la longueur se situe entre 90 et 125 mm, les distances de remontée minimales vont de 10 à 25 mètres lorsque la vitesse de l'écoulement est de 1 m/s et plus si elle est inférieure à 1 m/s. L'annexe B présente les courbes illustrant la distance de remontée maximale possible en fonction de la vitesse d'écoulement pour des ombles de 90 à 225 mm dans des structures lisses. Si le ponceau est rugueux, il est possible que les distances de remontée puissent être plus grandes, mais les données actuelles ne permettent pas d'estimer dans quelle proportion.

- **Longueur du ponceau :**

Dans le cadre du présent projet, aucune relation significative n'a été identifiée entre la longueur du ponceau et la capacité de passage du poisson (longueurs étudiées de 45 m ou moins). Néanmoins, selon les travaux de Castro-Santos (2013), il est possible qu'au-delà d'une longueur de 25 m certains ponceaux soient difficilement franchissables pour l'omble de fontaine, même sous des conditions hydrauliques favorables. Cela va principalement dépendre de la taille des ombles. Les figures de l'annexe B illustrent comment longueur de l'obstacle et vitesse de l'écoulement interagissent pour limiter le succès de passage.

- **Profondeur minimale d'écoulement**

Idéalement, la profondeur minimale d'écoulement dans le ponceau devrait être égale ou supérieure à 10 cm en tout temps. La valeur de 10 cm provient d'une interprétation de la littérature existante ainsi que des résultats du présent projet. Bien que la profondeur ne semble pas constituer une limite physique à la capacité de passage des ombles dans la présente étude, elle interagit avec la vitesse de l'écoulement en ce qui a trait au succès de passage. Cela est liée au fait que, pour recruter différents muscles nécessaires à la nage, le poisson a besoin d'un certain espace pour se mouvoir. Par ailleurs, une plus grande profondeur accroît l'hétérogénéité des vitesses d'écoulement dans la colonne d'eau, ce qui permet au poisson d'exploiter les zones de vitesses inférieures à la vitesse moyenne pour optimiser sa distance de remontée à un coût énergétique moindre.

- **Type de ponceau**

La rugosité du ponceau influence le succès de passage du poisson. Les ponceaux de tôle ondulée galvanisée (TTOG) sont habituellement associés à une plus grande hétérogénéité des vitesses d'écoulement ainsi qu'à des profondeurs plus élevées, dues à la présence d'ondulations amenant une rugosité supérieure des parois. Il est également possible que certains ombles puissent prendre du repos au creux des ondulations, bien que des études additionnelles soient nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Une rugosité élevée va tempérer l'effet de la vitesse de l'écoulement (notamment influencée par la pente du ponceau) sur la capacité de passage. C'est pourquoi, si le ponceau est constitué de matériel lisse et comporte des caractéristiques susceptibles de limiter le passage (telles que : une pente > 2%, une longueur > 25 m, une vitesse moyenne > à 1 m/s, une profondeur < à 10 cm), il est recommandé de recréer des éléments de rugosité à l'intérieur du ponceau.

- **Aménagements particuliers**

Dans le cas où certaines des caractéristiques hydrauliques et structurantes du ponceau s'avèrent limitantes pour le libre passage des ombles, certaines options d'aménagement sont à considérer afin de recréer des zones d'écoulement réduit, dont:

- L'enfouissement du radier par rapport au thalweg naturel du cours d'eau, ce qui permet la création d'une **zone de refoulement** en aval du ponceau et réduit la longueur du ponceau où les conditions sont limitantes.
- L'aménagement d'un substrat durable et hétérogène dans le ponceau et, finalement;
- L'aménagement de déversoirs dans le ponceau afin de minimiser les vitesses d'écoulement, de créer des zones de repos et de fractionner les dénivelés à franchir.

- **Réfection de ponceau par insertion**

Une attention particulière doit être portée à l'utilisation de la technique d'insertion aux endroits où le passage du poisson est requis. Le fait que cette technique réduit simultanément le diamètre du ponceau ainsi que sa rugosité a des effets directs sur les conditions hydrauliques ayant cours dans la structure. Des travaux de modélisation par calculs hydrauliques montrent en effet que, lors d'une réfection de ponceau par la technique d'insertion, les profondeurs d'écoulement vont décroître en moyenne de 35% (± 6%) et la vitesse va augmenter en moyenne de 100% (± 20%) (Duguay, J. et J. Lacey, Université de Sherbrooke, communication personnelle).

Une caractérisation des habitats (comprenant au besoin un inventaire par pêche à l'électricité) situés en amont et en aval du site de la traversée devrait être effectuée préalablement au choix du concept de la structure. Dans le cas où l'intervenant responsable juge que la population de poisson présente devrait être en mesure de pouvoir franchir l'infrastructure routière en vue de satisfaire ses besoins vitaux, il est recommandé de réduire le moins possible le diamètre du ponceau existant et d'apporter les aménagements nécessaires si on suspecte que les vitesses d'écoulement y seront excessives. Aussi, l'analyse des conditions hydrauliques dans le cours d'eau est nécessaire préalablement à ce genre de travaux, dans le but d'identifier des débits ou des vitesses plus représentatives des conditions normales ou d'étiage auxquelles peuvent être confrontés les poissons, plutôt que les conditions de crues traditionnellement modélisées. Dans le cas où des mesures comme l'aménagement de déversoirs dans le ponceau à insérer ou d'un seuil en aval afin de créer une zone de refoulement vers l'amont ne sont pas applicables du point de vue de la capacité hydraulique, d'autres options devront être évaluée (p.ex. l'ajout d'un autre ponceau par forage directionnel ou la reconstruction complète en tranchée).

PUBLICATIONS

La route des rivières, n° 1 et 2. INRS.

2010-2011

Bulletins d'information vulgarisée destinés au ministère des Transports du Québec, projet R656.1

Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis) à franchir les ponceaux, protocole expérimental. INRS.

2009

Protocole expérimental destinés au ministère des Transports du Québec, projet R656.1

Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis) à franchir les ponceaux; rapports d'étape 1 et 2. INRS.

2010-2011

Rapports techniques destinés au ministère des Transports du Québec, projet R656.1

COMMUNICATIONS

Colloques, congrès et conférences

20e symposium annuel du Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie et en environnement aquatique.

Saint-Hyppolite (Qc). Mars 2010

Présentation d'une affiche : GOERIG, E. GILLIS, CA & DUGDALE S. «Habitat en rivière des salmonidés: aperçu de trois projets en cours au Labo Bergeron »

22e symposium annuel du Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie et en environnement aquatique.

Saint-Ferdinand (Qc). Mars 2012

Présentation d'une affiche : GOERIG E. & BERGERON N « Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) à franchir les ponceaux : de la théorie à la réalité»

Congrès de l'association des biologistes du Québec

Boucherville (Qc). Novembre 2012

Présentation d'une affiche : GOERIG E. & BERGERON N. «Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux : vers une plus grande connectivité des réseaux fluviaux»

13e Colloque annuel du centre interuniversitaire de recherche sur le saumon atlantique

Université Laval, Québec (Qc). Avril 2010

Présentation orale : GOERIG E. & BERGERON N & LAFRANCE, M. «Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux : aperçu du projet et résultats préliminaires»

14e Colloque annuel du centre interuniversitaire de recherche sur le saumon atlantique

Université Laval, Québec (Qc). Mai 2011

Présentation orale : GOERIG E. & BERGERON N. «Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) à franchir les ponceaux : de la théorie à la réalité»

International Conference on Engineering & Ecohydrology for Fish Passage.

Amherst, MA, USA. Juin 2012

Présentation orale: GOERIG E. & BERGERON N. «Modelling brook trout passage success through road culvert: from theory to reality».

NoWPaS European workshop on anadromous salmonids.

Machynlleth, Pays de Galles, Royaume-Uni. Avril 2013

Présentation orale : GOERIG E. & BERGERON N & T. CASTRO-SANTOS. «Modelling brook trout (*Salvelinus fontinalis*) passage success through road culverts: from theory to reality»

Atelier de transfert des connaissances sur la libre circulation de l'omble de fontaine dans les ponceaux

Université Laval, Québec (Qc). 30 avril 2013

Présentations orales de GOERIG Elsa. & BERGERON Normand & panel de discussion.

Un compte-rendu synthétisé de l'atelier est disponible à l'annexe C.

15e Colloque annuel du centre interuniversitaire de recherche sur le saumon atlantique

Université Laval, Québec (Qc). Mai 2013

Présentation orale : GOERIG E. & BERGERON N & T. CASTRO-SANTOS. «Succès de passage dans les ponceaux» : quelles sont les conditions gagnantes?»

Annual meeting of the American Fisheries Society

Little Rock, Arkansas, USA. Septembre 2013

Présentation orale: GOERIG E. & BERGERON N & CASTRO-SANTOS T. «Culvert hydraulics and passage performance of brook trout: challenging existing models»

PRÉSENCE DANS LES MÉDIAS

Médias écrits (papiers et électroniques)

Jeune poisson sous la route

2012-10-03

Découvrir, le magasine de l'ACFAS

Dans la section "En image", un texte d'Elsa Goerig, étudiante au doctorat à l'INRS-ETE

La pénible traversée des saumons sous les routes du Québec

2012-09-11

Webzine Planète INRS

Télévision

Des chercheurs du Saguenay au secours de nos saumons des rivières

2010-03-02

Télé-Québec : Le Code Chastenay

Des poissons sous la route.

2013-26-03

Canal-Savoir : Campus (émission 47)

RÉFÉRENCES

ADAMS, S.R., HOOVER, J.J., KILLGORE, K.J. 2000, «Swimming performance of the Topeka shiner (*Notropis topeka*), an endangered midwestern minnov». *The American Midland Naturalist* 144 : 178-186.

ALLISON, P. D. 2012. Logistic Regression Using SAS: Theory and Aplications. Cary, NC, SAS Institute Inc.

BATES, K. 2003, «Design of Road Culverts for Fish Passage». *In:* WILDLIFE, W. D. O. F. A. (ed.) 2003 ed.

BEAMISH, F. W. H., W. S. HOAR, ET AL., 1979,. 2 «Swimming Capacity». *Fish Physiology,* Academic Press. Volume 7: 101-187.

BEHLKE, C. E. 1991, «Power and energy implications of passage structures for fish». *American Fisheries Society Symposium,* 10**,** 289-298.

BELFORT, D. A. & GOULD, W. R. 1989, «An Evaluation of trout Passage through Six Highway Culverts in Montana», *North American Journal of Fisheries Management,* 9**,** 437-445.

BENTON, P.D. 2000, *Swimming performance of the Barrens topminnov and western mosquitofish : implications for barrier design and topminnov conservation*. M.S. thesis, Tennessee Technological University : Cookeville, TN; 63.

BJORNN, T. C. 1971, «Trout and Salmon Movements in Two Idaho Streams as Related to Temperature, Food, Stream Flow, Cover, and Population Density». *Transactions of the American Fisheries Society,* 100**,** 423-438.

BLANK, M., CAHOON,J., MCMAHON, T. 2009, «Using three dimensional hydrodynamic modeling and fish swimming energetics to assess culverts as potential physical barriers to upstream fish movement».*TRB 2009 Annual Meeting* 09-2917.

BOUBÉE, J., JOWETT, I., NICHOLS, S. & WILLIAMS, E. 1999, *Fish passage at culverts; A review, with possible solutions for New-Zealand indigenous species* In: DEPARTMENT OF CONSERVATION, W., NEW-ZEALAND (ed.). Manager, Science & Research unit, Science technology and Information Services, Department of Conservation.

BRETT, J.R. 1964, «The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon». *Journal of Fisheries Research Board of Canada* 21 : 1183-1226.

BURFORD, D. D., MCMAHON, T. E., CAHOON, J. E. & 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**,** 739-752.

BURNHAM, K. P. et D. R. ANDERSON. 2002. Model selection and multimodel inference: A praticalinformation - Theoretic approach. Springer, New York, 488 p.

BURNETT, N.J., K.M. STAMPLECOSKIE, J.D. THIEM ET S.J. COOKE, 2013, «Comparison of detection efficiency among three sizes of half-duplex passive integrated transponders using manual tracking and fixed antenna arrays», *North American Journal of Fisheries Management*, 33 (1): 7-13.

CAHOON, J. E., MCMAHON, T. STEIN, O. BURFORD, D.AND BLANK, M. 2005, *Fish passage at road crossings in a Montana watershed*. FHWA/MT-05-002/8160.
CAHOON, J., MCMAHON, T., ROSENTHAL, T., BLANK, M. AND STEIN,O. 2007, *Warmwater species fish passage in Montana culverts.* U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report FHWA/MT-07–009/8182, Washington, D.C.

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**,** 1602-1615.

CASTRO-SANTOS, T. 2005. «Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes». *J Exp Biol,* 208**,** 421-432.

CASTRO-SANTOS T. and NISLOW, 2010, *Managing and monitoring for movement within stream networks*, Aquatic organism passage workshop: guidelines for an effectiveness. US Forest Service Available at: www. http://stream.fs.fed.us/fishxing/PEPs.html.

CASTRO-SANTOS T., F.J. SANZ-RONDA, J.R. RUIZ-LEGAZPI, 2013, «Breaking the speed limit - comparative sprinting performance of brook trout (*Salvelinus fontianalis*) and brown trout (*Salmo trutta*)», *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,* 70 (2): 280-293.

CHANSEAU, M., BOSC, S. ET AL., 2002, «L'utilisation de l'huile de clous de girofle comme anesthésique pour les smolts de saumon atlantique (*Salmo Salar L.*) et comparaison de ses effets avec ceux du 2-phenoxyethanol». *Bulletin Francais De La Peche Et De La Pisciculture* 365-36**6**: 579-589.

CHESNUT TJ. 2002, «A review of closed bottom stream crossing structures (culverts) on fish-bearing streams in the Kamloops Forest District», *Canadian Manuscript Reportof Fisheries and Aquatic Sciences* 2602.

CLARK, S. P. AND KEHLER, N. 2011, «Turbulent flow characteristics in circular corrugated culverts at mild slopes». *Journal of Hydraulic Research* 49(5): 676-684.

COFFMAN, J. S. 2005, *Evaluation of a predictive model for upstream fish passage through culverts*. Master's thesis. James Madison University, Harrisonburg, Virginia.

COLAVECCHIA, M., KATOPODIS, C., GOOSNEY, R., SCRUTON, D. A. & MCKINLEY, R. S. 1998, «Measurement of burst swimming performance in wild Atlantic salmon (Salmo salar L.) using digital telemetry». *Regulated Rivers-Research & Management,* 14**,** 41-51.

ENDERS,E.C., D. BOISCLAIR, A.G. ROY, 2003, «The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*)», *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60 (9): 1149-1160.

ERKINARO, J. & GIBSON, R. J. 1997, «Interhabitat migration of juvenile Atlantic salmon in a Newfoundland river system», *Journal of Fish Biology,* 51**,** 373-388.

ERKINARO, J. & NIEMELÄ, E. 1995, «Growth differences between the Atlantic salmon parr, Salmo salar , of nursery brooks and natal rivers in the River Teno watercourse in northern Finland». *Environmental Biology of Fishes,* 42**,** 277-287.

FITCH, M. G. 1995, *Nonanadromous Fish Passage in Highway Culverts*. In: TRANSPORTATION, V. D. O. (ed.).

FRANKEL , G.S. ET D.L. GUNN. *The orientation of Animals*. Dover Publications Incorporated, New York, 1961.

FURNISS, M., M. LOVE, S. FIROR, K. MOYNAN, A. LLANOS, J.GUNTLE, AND R. GUBERNICK. 2008, FishXing, version 3.0.U.S. Forest Service, San Dimas Technology and Development Center, San Dimas, California. Available: www.stream.fs.fed.us/fishxing. (October 2008).

GARDNER, A. N. 2006, *Fish passage through road culverts.* Master's thesis. North Carolina State University. Raleigh, North Carolina.

GIBSON, R. J., HAEDRICH, R. L. & WERNERHEIM, C. M. 2005, «Loss of Fish Habitat as a Consequence of Inappropriately Constructed stream Crossings». *Fisheries,* 30**,** 10-17.

GURARIE, E., J.J. ANDERSON ET R.W. ZABEL, 2009, «Continuous models of population-level heterogeneity inform analysis of animal dispersal and migration», *Ecology*, 90: 2233-2242.

HARO, A., CASTRO-SANTOS, T., NOREIKA, J. & ODEH, M. 2004, «Swimming performance of upstream migrant fishes in open-channel flow: a new approach to predicting passage through velocity barriers». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,* 61**,** 1590-1601.

HARPER, D. J. & QUIGLEY, J. T. 2005, «No net loss of fish habitat: a review and analysis of habitat compensation in Canada». *Environment Management,* 36**,** 343-355.

HINCH, S. G. & BRATTY, J. 2000, «Effects of swim speed and activity pattern on success of adult sockeye salmon migration through an area of difficult passage». *Transactions of the American Fisheries Society,* 129**,** 598-606.

HOUSE, M. R., PYLES, M. R. & WHITE, D. 2005, «Velocity distributions in streambed simulation culverts used for fish passage». *Journal of the American Water Resources Association,* 41**,** 209-217.

HUNSTMAN AG. 1945, «Migration of salmon parr». *Journal of Fisheries Research Board of Canada* 6: 399-402.

HYNES HBN. 1970, *The ecology of running waters*. Univ. Toronto Press. xxiv + 555 p.

KAHLER, T. H. & QUINN, T. P. 1998. *Juvenile and resident salmonid Movement and Passage Through Calverts.* In: WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION AND U.S, D. O. T., FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (ed.). Washington State Department of Transportation.

KATOPODIS, C. & GERVAIS, R. 2011, «Ecohydraulic analysis of fish fatigue data. *River Research and Applications»***,** n/a-n/a.

KONDRATIEFF, M. C. & MYRICK C.A. 2005. "Two adjustable waterfalls for evaluating fish jumping performance." *Transactions of the American Fisheries Society* **134**: 503-508.

LANGLILL DA, ZAMORA PJ. 2002, An audit of small culvert installations in Nova Scotia: habitat loss and habitat fragmentation. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* 2422.

LARINIER, M. 2002. «Fish passage through culverts, rock weirs and estuarine obstructions». *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture,* 364**,** 119-134.

LIAO, J., D.N. BEAL, G.V.LAUDER, M.S. TRIANTAFYLLOU, 2003, «Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science.* 302*:* 1566-1569

MAGNAN, P., J. FRANSSEN, M. PÉPINO, V. BOILY, Y. PARADIS, A. PARIS, M. LAPOINTE et M. A. RODRÍGUEZ. 2012. *Impact de la réfection de l'axe routier 73/175 sur l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis) et son habitat*. Université du Québec à Trois-Rivières et Université McGill pour le compte du ministère des Transports du Québec. 101 pages et 3 annexes.

MEYERS LS, THUEMLER TF, KORNELY GW. 1992, «Seasonal movements of brown trout in northeast Wisconsin». *North American Journal of Fisheries Management* 12: 433-441.

MORITA, K. AND S. YAMAMOTO 2002, «Effects of Habitat Fragmentation by Damming on the Persistence of Stream-Dwelling Charr Populations». *Conservation Biology*, Pages 1318–1323, Volume 16, No. 5

NEARY, V.S. 2011, «Binary fish passage models for uniform and nonuniform flows», *River research and applications.* DOI : 10.1002/rra.

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-Revue Canadienne De Recherche Forestiere,* 38**,** 566-575.

PEAKE, S., MCKINLEY, R. S. & SCRUTON, D. A. 1997, «Swimming performance of various freshwater salmonids relative to habitat selection and fishway design», *Journal of Fish Biology,* 51**,** 710-723.

PÊCHES ET OCÉANS CANADA, *Lignes directrices pour la conception des traversées de cours d'eau au Québec*, Pêches et Océans Canada, Division de la gestion de l'habitat du poisson, Mont-Joli (Qc), Canada, 2012, 47 pages + annexes.

PLAUT, I. 2001, «Critical swimming speed: its ecological relevance», *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physoiology,* 131**,** 41-50.

POPLARS-JEFFERS, I.O., J.T. PETTY, J.T. ANDERSO, S.J. KITE, M.P. STRAGER ET R.H. FORTNEY, 2009, «Culvert replacement and stream habitat restoration: implication from brook trout management in an Appalachian watershed», *USA Restoration Ecology*, 17: 404-413.

POWERS, P. D., BATES, K., BURNS, T., GOWEN, B. & WHITNEY, R. 1997, «Culvert hydraulics related to upstream juvenile salmon passage». *WILDLIFE*, W. D. O. F. A. (ed.).

PRÉVOST, L., PLAMONDON, A. P. & LÉVESQUE, D. 2002, *Méthodologie pour évaluer l'effet de l'installation d'un ponceau sur le susbtrat des frayères de l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis)*, In: Ministère des ressources naturelles du québec, société de la faune et des parcs du Québec & Québec, f. d. l. f. d. (eds.).

RICHMOND, M. C., DENG, Z. Q., GUENSCH, G. R., TRITICO, H. & PEARSON, W. H. 2007, «Mean flow and turbulence characteristics of a full-scale spiral corrugated culvert with implications for fish passage», *Ecological Engineering,* 30**,** 333-340.

ROBERT, A. *River Processes; an introduction to fluvial dynamics*, London, Hodder Arnold. 2003, 214.

RODRIGUEZ, M.A., 2002, «Restricted movement in stream fish: The paradigm is incomplete, not lost», *Ecology*, 83: 1-13

RODRIGUEZ, M.A., 2010, «A modeling framework for assessing long-distance dispersal and loss of connectivity in stream fish» Pages 263-279 dans D.A. JACKSON et K.B. GIDO, éditeurs. *Community ecology of stream fishes: concepts, approaches, and techniques*, American Fisheociety Symposium, 73, Bethesda, Maryland.

SOLCZ, A. A. 2007, *Assessment of culvert passage of Yellowstone cutthroat trout in a Yellowstone river tributary using a passive integrated transponder system,* Master, Montana State University.

USFWS (U.S. Fish and Wildlife Service). 2003, *National fish passage program. Reconnecting Aquatic Species to Historic Habitats*, Available at: https://www.fws.gov/fisheries/fwma/fishpassage/pdfs/nfpp.pdf

TAGUCHI, M, J.C. LIAO, 2011, «Rainbow trout consume less oxygen in turbulence: the nergetics of swimming behaviors at different speeds», *Journal of Experimental Biology,* 214: 1428-1436.

TRITICO, H.M., A.J. COTEL, 2010, «The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*)». *Journal of Experimental Biology*, 213: 2284-2293

TUDORACHE, C., R.A. O'KEEFE et T.J. BENFEY, 2010. «Flume length and post-exercise impingement affect anaerobic metabolism in brook charr Salvelinus fontinalis. *Journal of Fish Biology*, 76 (3): 729-733.

WOFFORD JEB, 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.

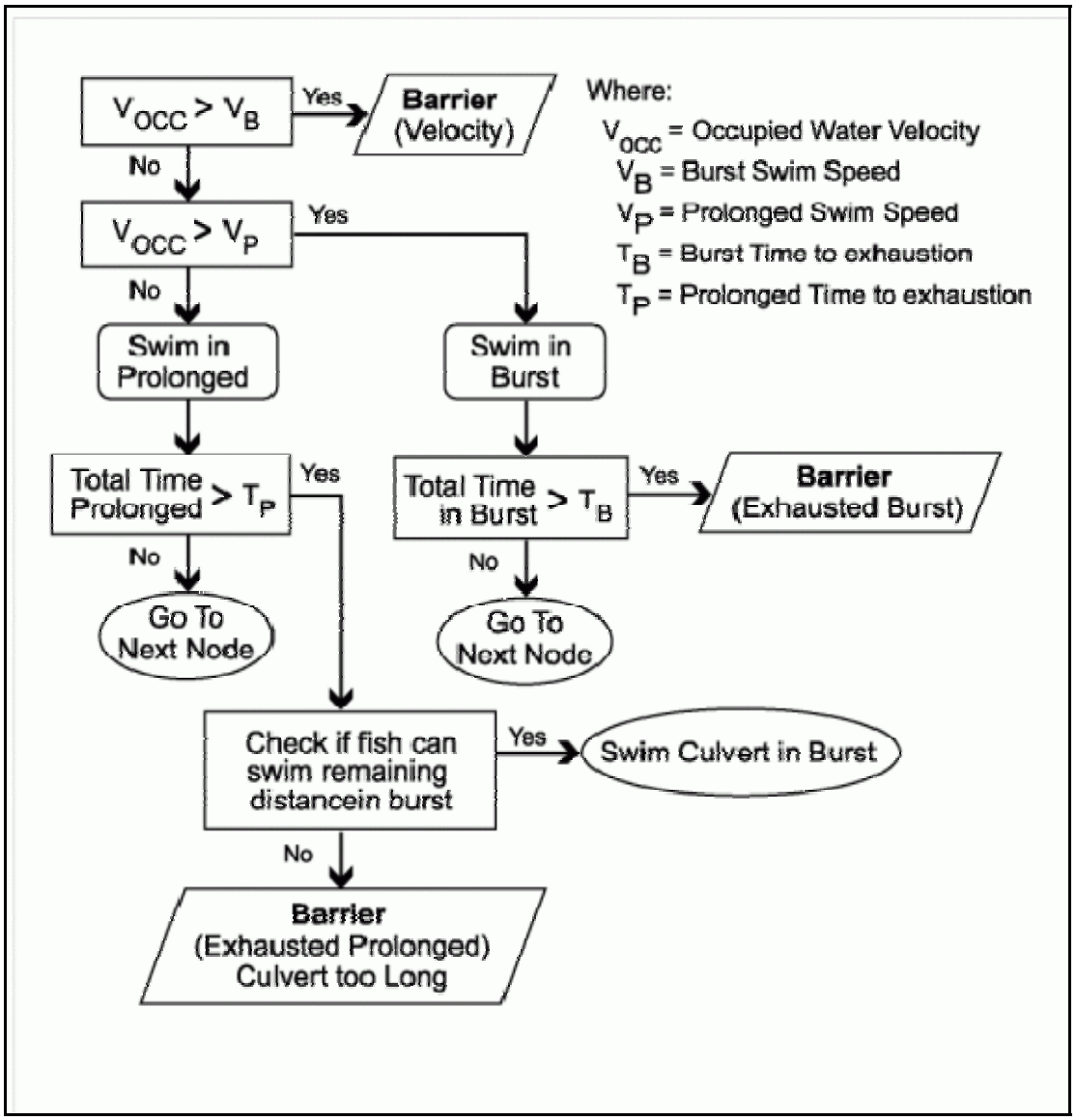
YOUNG MK. 1998, «Absence of autumnal changes in habitat use and location of adult Colorado River cutthroat trout in a small stream», *Transactions of the American Fisheries Society* 127: 147-151.

ZWIRN, M. 2002, *Forest Road Contruction and Culvert Installations in Salmon Streams: Best Management Practices and Lessons for the Samarga Watershed*. The Wild Salmon Center.

ANNEXE A

Algorithme de nage de FishXing

Cette figure illustre de façon schématisée l'algorithme de nage utilisé dans les simulations de passage du modèle FishXing (Furniss et al., 2003). Les vitesses de nage en modes prolongé ou sprint pour différentes espèces de poissons sont issues de la littérature et comparées à la vitesse de l'écoulement de la coupe transversale de chacune des sections du ponceau (définies ici par le terme «node»). Habituellement, la vitesse moyenne est utilisée, mais l'utilisateur peut choisir d'appliquer un facteur de correction à la vitesse moyenne s'il pense, par exemple, que les poissons vont plutôt nager près du fond ou à un endroit spécifique de la coupe transversale où la vitesse de l'écoulement serait moindre (d'où le terme de «occupied water velocity»).


$V_{OCC} > V_B$
Yes
Barrier (Velocity)
No
$V_{OCC} > V_P$
Yes
No
Swim in Prolonged
Swim in Burst
Total Time Prolonged > T_P
Yes
No
Go To Next Node
Total Time in Burst > T_B
Yes
Barrier (Exhausted Burst)
No
Go To Next Node
Check if fish can swim remaining distancein burst
Yes
Swim Culvert in Burst
No
Barrier (Exhausted Prolonged) Culvert too Long
Where:
V_{OCC} = Occupied Water Velocity
V_B = Burst Swim Speed
V_P = Prolonged Swim Speed
T_B = Burst Time to exhaustion
T_P = Prolonged Time to exhaustion

ANNEXE B

Distance de remontée en fonction de la vitesse de l'écoulement pour l'omble de fontaine

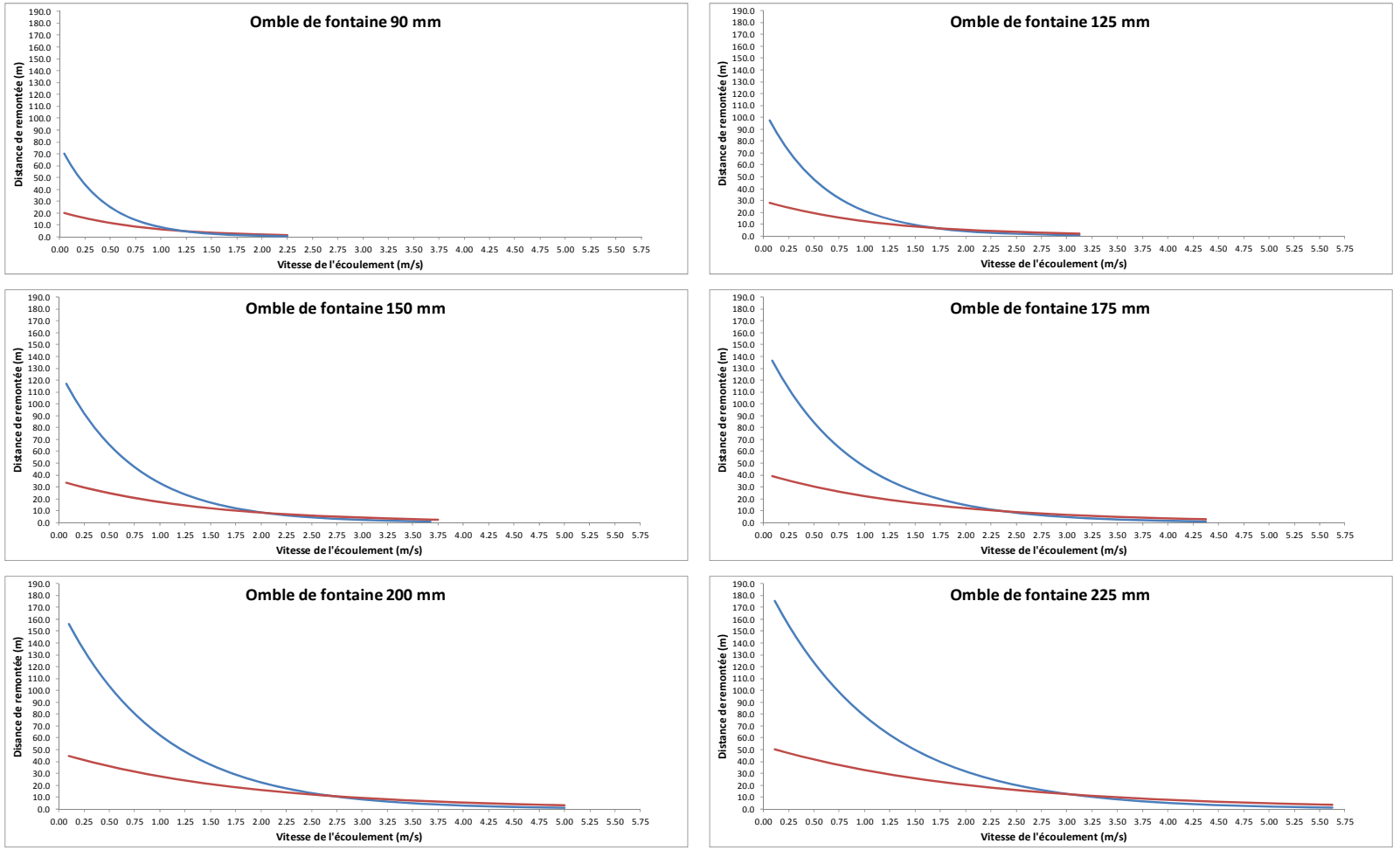


Figure 40: Distance de remontée en fonction de la vitesse de l'écoulement pour des ombles de fontaine de 90- 225 mm en mode sprint 1 (bleu) et sprint 2 (rouge).

ANNEXE C

Synthèse de l'atelier

Rédigé par : Martin Lafrance, de la direction Capitale Nationale selon le compte-rendu initial rédigé par Mme Audrey Turcotte du service de la coordination de la recherche et de l'innovation, direction de l'environnement et de la recherche, Ministère des Transports du Québec selon ses notes et celle de M. Julien Mocq, INRS.

Un atelier de diffusion des résultats du projet de recherche « Modélisation de la capacité de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) à franchir les ponceaux » a eu lieu le 30 avril 2013 de 10h00 à 16h00 à l'auditorium Jean-Paul Tardif, du Pavillon La Laurentienne de l'Université Laval.

Les principaux objectifs de l'atelier étaient d'échanger sur les résultats du projet de recherche, d'évaluer la pertinence et l'applicabilité concrète des modèles existants et de sensibiliser et consulter certains intervenants clés impliqués dans la conception des ponceaux au MTQ ainsi que des analystes impliqués dans l'émission des autorisations reliées à ce type d'infrastructure.

L'auditoire fut composé d'environ 75 participants représentant le MTQ, MDDEFP, MRN, Pêches et Océans Canada, Hydro-Québec, l'Université de Sherbrooke, l'UQTR, l'INRS-ETE et la CRÉ du Saguenay Lac-Saint-Jean.

En guise d'introduction, **Normand Bergeron**, chercheur en géomorphologie fluviale et responsable du projet à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) présente des cas de fragmentation des habitats aquatiques et dresse un portrait de la situation au Québec. Différents impacts sur les populations de poissons peuvent en résulter. **Jean-Baptiste Torterotot**, aussi de l'INRS, est invité à présenter les résultats préliminaires obtenus dans le cadre de son projet sur l'effet des ponceaux forestiers dans la forêt boréale du Saguenay – Lac-St-Jean. Il rapporte notamment des différences dans la diversité et la structure génétique des populations de poissons. **M. Torterotot** en arrive à la conclusion qu'il pourrait y avoir une diminution de la richesse et de la diversité génétique d'une population de poisson donnée lorsque son habitat est fragmenté par un ponceau infranchissable.

Normand Bergeron reprend la parole et dresse l'état des connaissances actuelles et des méthodologies utilisées pour étudier la capacité natatoire des poissons. Il explique les calculs de la vitesse de nage, de la capacité de nage soutenue, du temps de fatigue et de la distance d'ascension maximum. Ensuite, il présente un système de classification des ponceaux selon leur degré de franchissabilité par les poissons.

Ensuite, **Elsa Goerig** présente les résultats découlant du projet de modélisation de la capacité de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux, lequel fait en partie l'objet de sa

thèse de doctorat. Elle explique que le mandat confié par le ministère des Transports du Québec (MTQ) consiste à développer un outil permettant de déterminer dans quelle proportion l'omble de fontaine est apte à franchir un ponceau donné. Elle nous présente une vidéo résumant le projet. Ensuite, elle présente une synthèse des critères biologiques et hydrologiques qui régissent le succès de passage. **Mme Goerig** répond à plusieurs questions de l'auditoire, portant notamment sur l'impact de la longueur, de la pente, et des ondulations d'un ponceau sur le régime d'écoulement, ainsi que sur la motivation des poissons à franchir un ponceau. **Mme Goerig** présente ensuite une évaluation de la performance des modèles existants et récemment publiés de prédiction du succès de passage et employés à l'occasion pour la conception de ponceaux. Elle mentionne qu'elle réalise actuellement les analyses statistiques sur les résultats de ses essais sur le terrain afin d'inclure au rapport final un modèle distinctif développé dans le cadre du présent projet qui prédit le mieux la capacité de l'omble de fontaine à franchir les ponceaux en mettant en relief les variables explicatives les plus signifiantes.

Un panel de discussion, dirigé par **Normand Bergeron**, a permis ensuite aux spécialistes suivants d'exprimer leurs points de vue et de partager leurs préoccupations sur les résultats qui ont été présentés :

- **Christian Poirier**, ingénieur en hydraulique à la Direction des Structures du MTQ;
- **Luc Major**, biologiste au ministère des Ressources naturelles, région de la Chaudière-Appalaches;
- **Pierre Magnan**, professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières;
- **Dominique Boula**, biologiste au ministère des Pêches et des Océans du Canada;
- **Martin Lafrance**, biologiste à la Direction de la Capitale-Nationale du MTQ.

Avant d'inviter l'assemblée à formuler des commentaires, **M. Bergeron** pose un certain nombre de questions aux panélistes: « Pour vous, c'est quoi la libre circulation? À qui doit-on doit permettre le libre passage? Où s'arrête-t-on? À partir de quelle superficie est-il pertinent de préserver l'habitat? Jusqu'à quel débit? Comment quantifier les services écosystémiques ou la valeur de chaque bout de territoire auxquels les populations de poisson ont accès? Comment définit-on ce qu'est un ponceau idéal? » Des réponses diverses à ces questions sont formulées mais le temps manque pour dresser des consensus.

En guise de résumé des nombreuses interventions qui ont caractérisé le présent atelier, **M. Lafrance** souligne :

- Les succès de passage sont souvent sous-estimés par les modèles existants; les poissons, en particulier ceux de petites et de moyennes tailles, utilisent des sections du ponceau où la vitesse réelle est probablement plus faible que celle mesurée dans l'expérimentation;
- Une bonne acquisition de connaissances sur les habitats et populations existantes du milieu récepteur est requise préalablement à l'établissement de la solution à privilégier;

- Il demeure fondamentalement important de conserver l'intégrité génétique et écologique des populations fréquentant le site des travaux. Il faut essayer de tendre vers la situation de référence;
- Il est quand même important de faire usage de jugement professionnel, de faire preuve de pragmatisme aussi, afin de mettre en perspective les bénéfices vs les coûts des options disponibles;
- Le modèle prédictif qu'**Elsa Goerig** et **Normand Bergeron** développeront à partir des données qu'ils ont recueillies est attendu avec intérêt;
- Un comité interministériel sur la libre circulation du poisson pourrait voir le jour prochainement et les nombreuses questions en suspens pourraient être étudiées dans le mandat à définir de ce comité.

David Boudreault, chef du Service de l'environnement du MTQ, remercie l'ensemble des panélistes pour leur participation aux débats. Il remercie également les chercheurs, **Normand Bergeron** et **Elsa Goerig**, ainsi que le chargé de projet, **Martin Lafrance**. Il remercie également les gens de la Direction de l'environnement et de la recherche du MTQ (DER) qui ont participé à l'organisation de l'événement. Il invite **Christian Therrien**, directeur de la DER, à prononcer le mot de clôture.