Université du Québec

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

Développement d'une nouvelle passe migratoire multi-spécifique au ruisseau de Feu

Par
Joanie Côté

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

Jury d'évaluation

Examinateur interne	Marie Clément Professeure invitée, INRS-ETE
Examinateur externe	Eva Enders Pêches et Océans Canada
Directeur de recherche	Normand Bergeron Professeur, INRS-ETE
Co-directeur de recherche	Marc Mingelbier Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

© Droits réservés de Joanie Côté

Résumé

Les passes migratoires permettent de compenser partiellement les effets négatifs de la fragmentation des habitats aquatiques. Jusqu'à récemment, leur conception visait principalement à améliorer le franchissement d'obstacles par les salmonidés. Des travaux récents indiquent que ces concepts nécessitent d'être adaptés pour d'autres espèces de poissons (Brodeur et al., 2007). Le présent projet vise à développer et tester un nouveau type de passe migratoire multi-espèces adaptée aux non-salmonidés.

Une passe migratoire à cloisons et bassins successifs a été installée au ruisseau de Feu pour donner l'accès aux poissons de la rivière des Prairies à un marais aménagé par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) et Canards Illimités. La passe migratoire est composée de 15 bassins séparés par des seuils d'une hauteur de 10-15 cm chacun. Les conditions hydrauliques aux seuils sont déterminantes pour le passage des poissons et sont en grande partie influencées par le débit et la forme des seuils. C'est pourquoi deux conditions de débit (0,03 m^3s^{-1} et 0,05 m^3s^{-1}) et trois types de seuils (trapèze non-enroché, trapèze enroché et brèche) ont été testés simultanément dans trois tronçons expérimentaux, comprenant trois bassins chacun. Le taux et la chronologie de passage des poissons ont été déterminés grâce à la technologie pit tag (transpondeurs passifs sur les poissons couplés à des antennes de détection sur les seuils). Le grand brochet (*Esox lucius)*, la perchaude *(Perca flavescens)*, la barbotte brune *(Ameiurus nebulosus*), l'achigan à petite bouche *(Micropterus dolomieu)* et le crapet-soleil *(Lepomis gibbosus)* ont été choisis pour une expérimentation menée au printemps 2008. Après marquage, les poissons ont été déposés dans le premier bassin de chaque tronçon expérimental, libres de se déplacer vers l'amont de façon à franchir jusqu'à deux seuils, durant une période de 24 heures. Des antennes pit-tag rectangulaires installées en amont de chaque seuil enregistraient le passage des poissons marqués. Un objectif de trois essais par condition de débit avec dix individus de chaque espèce par tronçon était visé.

La comparaison des taux de passage d'un seuil à débit fort et à débit faible a montré que le taux de passage était significativement plus élevé lors des essais à débit faible qu'à débit fort chez le grand brochet, la perchaude et la barbotte brune. De plus, ce sont les seuils en

trapèze enroché qui ont permis les meilleurs succès de passages. Ceux-ci ont montré un succès de passage significativement plus élevé pour le grand brochet et la barbotte brune. Par contre, les seuils en brèche profonde ont montré un succès de passage significativement plus élevé pour la perchaude. L'achigan à petite bouche a montré un succès de passage de 50% et plus pour tous les types de seuils et pour les deux conditions de débit. Nous avons mesuré les effets de plusieurs variables physiques sur la montaison des espèces utilisées. Nos ne montrent aucune significative entre le succès de passage et la dénivellation interbassin et la vitesse du courant mesurées au cours de l'expérimentation. Nos résultats tendent à démontrer que la configuration «débit faible et seuils en trapèze enroché» est la plus favorable pour l'ensemble des espèces utilisées dans ce projet. Nos résultats suggèrent également que les paramètres de conception actuels pourraient être améliorés, entre autres pour faciliter le passage du crapet-soleil et de la perchaude, en réduisant la vitesse du courant et la dénivellation interbassin tout en créant des zones de repos à l'intérieur des enrochements. Pour se faire, des déflecteurs enrochés pourraient être ajoutés en quinconce. Le présent projet constitue une avancée importante dans le développement de passes migratoires adaptées aux non-salmonidés.

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Normand Bergeron, pour ses précieux conseils, son soutien et sa confiance. Merci également à mon co-directeur, Marc Mingelbier, pour son aide et le temps qu'il a consacré à me transmettre ses connaissances. Je remercie aussi Philippe Brodeur pour sa contribution indispensable lors de la campagne de terrain et tout au long du projet.

Merci à Rémi Bacon, Nicolas Auclair, Paul Messier, Virginie Boivin, Daniel Hatin, et Catherine Greaves, l'équipe de terrain, qui a été d'une efficacité impressionnante et sans qui la réalisation du mémoire n'aurait été possible.

Je tiens à remercier Francis Bérubé et Marc-André Pouliot pour avoir installé les dispositifs de détection des pit-tags et pour leur aide précieuse dans le traitement des données.

Merci à l'équipe de Canards Illimités et au ministère des Ressources naturelles et de la Faune, de m'avoir permis de participer à ce projet, ainsi qu'au FQRNT et au CRSNG pour leur soutien financier.

J'adresse un merci tout spécial à mes extraordinaires collègues de laboratoire : Patricia Johnston, Véronique Tremblay, Jean-Nicolas Bujold et Elsa Goerig pour leur aide et leur soutien.

Merci à Audrey Lessard-Fontaine, Stéphane Mermoz et Jonathan Jalbert, mes amis qui m'ont été d'une aide précieuse en informatique et en statistique.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes parents, Manon Charbonneau et Michel Côté, et mes amis, qui m'ont soutenue jusqu'au bout de ce projet.

Table des matières

Résumé.....iii

Remerciements.....v

Table des matières.....vi

Liste des tableaux.....ix

Liste des figures.....x

Chapitre I : Introduction.....1

1.1 Problématique..... 1

1.2 But et objectifs 3

1.3 Structure du mémoire 4

Chapitre II : Écologie des marais riverains.....5

2.1 Définition des milieux humides et caractéristiques des systèmes riverains..... 5

2.2. Ichtyofaune des milieux humides..... 6

2.2.1. Facteurs influençant la fréquentation des marais en période de fraie..... 6

2.2.2. Capacité natatoire des poissons.....7

2.2.3. Espèces utilisées dans cette étude.....9

2.2.3.1. Le grand brochet 9

2.2.3.2 La perchaude 11

2.2.3.3 La barbotte brune 13

2.2.3.4 L'achigan à grande bouche 15

2.2.3.5 L'achigan à petite bouche 16

2.2.3.6 Le crapet-soleil..... 17

Chapitre III : Passes migratoires, types et efficacité 20

3.1. Types de passes migratoires les plus courants 20

3.1.1 Passe migratoire à seuils et bassins successifs (*pool and weir)* 20

3.1.2 Passe migratoire à fente verticale 22

3.1.3 Passe migratoire de type Denil 23

3.1.4 Écluses et ascenseurs à poissons 24

3.1.5 Les passes migratoires d'aspect naturel..... 24

3.2 Suivi de l'efficacité d'une passe migratoire..... 26

3.2.1 Évaluation de l'efficacité par le comptage amont et aval des poissons et par marquage-recapture 27

3.2.2 Télémétrie radio et acoustique 28
3.2.3 Transpondeurs passifs 28
3.3 Efficacité des passes migratoires utilisées par des non-salmonidés 30
3.3.1 Efficacité des passes à seuils et bassins successifs 30
3.3.2 Efficacité des passes migratoires d'aspect naturel 31
Chapitre IV : Méthodologie 33
4.1 Site à l'étude 33
4.1.1 Mise en contexte 33
4.1.2 Site à l'étude 33
4.1.3 Passe migratoire à l'étude 36
4.2 Débits testés 37
4.3 Seuils testés 38
4.3.1 Seuils en trapèze 39
4.3.2 Seuils en brèche 40
4.4 Tronçons à l'étude 40
4.5 Espèces à l'étude et approvisionnement en poissons 41
4.5.1 Espèces à l'étude 41
4.5.2 Approvisionnement en poissons 42
4.6 Suivi des poissons dans la passe 43
4.6.1 Méthode de suivi 43
4.6.2 Caractéristiques et disposition des antennes de détection 43
4.6.3 Marquage 44
4.7 Déroulement des essais et nombre de poissons marqués 45
4.8 Variables hydrauliques et environnementales 47
4.9 Traitement des données 48
4.9.1 Activité journalière 48
4.9.2 Comparaison du succès de passage en fonction du débit et des types de seuils 48
4.9.3 Effet des variables hydrauliques 48
4.9.4 Température 49
4.9.5 Effet de la turbidité 49
Chapitre V : Résultats 50
5.1 Conditions physiques et environnementales des essais 50
5.1.1 Dénivellation interbassin 50

5.1.2 Vitesse du courant 53
5.1.3 Température 56
5.1.4 Turbidité 57
5.2 Succès de passage par espèce 57
5.2.1 Grand brochet 57
5.2.2 Perchaude 62
5.2.3 Barbotte brune 66
5.2.4 Achigan à petite bouche 70
5.2.5 Crapet-soleil 75
Chapitre VI : Discussion 80
6.1 Effet des conditions hydrauliques et environnementales 80
6.1.1 Dénivellation interbassin 80
6.1.2 Vitesse du courant 83
6.1.3 Température 87
6.1.4 Activité journalière des poissons 87
6.1.5 Turbidité 88
6.2 Effet du type de seuil et du débit pour chaque espèce 88
6.2.1 Grand brochet 88
6.2.2 Perchaude 89
6.2.3 Barbotte brune 90
6.2.4 Achigan à petite bouche 91
6.2.5 Crapet-soleil 91
6.3 Comparaison des résultats avec d'autres projets 92
6.4 Synthèse des résultats 93
6.5 Perspectives 95
Chapitre VII : Conclusion 96
Annexe 1 : Classification des milieux humides 98
Annexe 2 : Dénivellations interbassin 99
Bibliographie 103

Liste des tableaux

Tableau 4.1 Poissons utilisés pour tester la passe migratoire et leur période de fraie.....**42**

Tableau 4.2 Période de dépôt pour chaque espèce, nombre de tests effectués pour chaque débit et étendue du nombre de poissons déposé par tronçon pour chaque test. **46**

Tableau 4.3 Nombre et taille moyenne des poissons utilisés pour l'expérimentation.....**47**

Tableau 6.1 Résumé de l'efficacité de chaque forme de seuil pour chaque espèce à débit fort et à débit faible.....94

Liste des figures

Figure 1.1 Succès de passage de cinq espèces de poissons dans la passe migratoire de la rivière aux Pins. (modifié de Brodeur et al., 2007). 3

Figure 3.1. Exemple de passe migratoire à seuils et à bassins successifs (Kamula, 2001)....21

Figure 3.2. a) Exemple de passe migratoire à fente verticale, installée sur le site de la rivière aux Pins, Boucherville, Québec (Brodeur et al. 2007) et b) vue en plan d'un bassin d'une passe migratoire à fente verticale (Kamula, 2001). 22

Figure 3.3. Exemple de passe migratoire de type Denil (Kamula, 2001)....23

Figure 3.4. Canal de contournement d'aspect naturel sur la rivière Ewan en Suisse (Calles et Greenberg, 2007)....25

Figure 3.5. Schéma d'une passe migratoire à rampe enrochée (Department of Industry & Investment of New South Wales, Australia, 2005)....26

Figure 4.1. Localisation du ruisseau de Feu et de la rivière aux Pins 34

Figure 4.2. Plan de l'aménagement faunique du ruisseau de Feu (Ville de Terrebonne, 2008)....35

Figure 4.3. Passe migratoire multi-espèces étudiée du segment marais du ruisseau de Feu.. 37

Figure 4.4 Seuils testés à débit faible et à débit fort. ii

Figure 4.5 a) Encadré de poutrelle et b) seuil temporaire inséré dans les glissières....39

Figure 4.6 a) Seuil en trapèze enroché b) Seuil en trapèze non-enroché....40

Figure 4.7 Schéma des neuf bassins expérimentaux séparés en trois tronçons. 41

Figure 4.8. Antenne rectangulaire placée en amont du deuxième seuil en trapèze non-enroché. 44

Figure 4.9 a) Transpondeur passif utilisé pour l'expérimentation de la passe du segment marais du ruisseau de Feu et b) transpondeur collé à un hameçon pour le marquage des crapets-soleil....45

Figure 5.1 Distributions des fréquences d'observation des dénivellations interbassin aux seuils de chaque tronçon, à débit faible et à débit fort. 52

Figure 5.2 Distributions des fréquences d'observation des vitesses du courant aux seuils de chaque tronçon, à débit faible et à débit fort. 55

Figure 5.3 Température horaire de l'eau, mesurée en aval des tronçons à l'étude de la passe du segment marais du ruisseau de Feu 56

Figure 5.4 Variation de la turbidité au cours de l'expérience, mesurée par un disque de Secchi. 57

Figure 5.5 Succès de passage moyen d'un seuil des grands brochets entre les essais à débit fort et à débit faible 58

Figure 5.6 Succès de passage moyen des grands brochets d'un seuil et de deux seuils de différentes formes....59

Figure 5.7 Succès de passage des grands brochets en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus....61

Figure 5.8 Succès de passage des grands brochets en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus. 62

Figure 5.9 Succès de passage moyen d'un seuil des perchaudes entre les essais à débit fort et à débit faible 63

Figure 5.10 Succès de passage moyen des perchaudes d'un seuil et de deux seuils de différentes formes....64

Figure 5.11 Succès de passage des perchaudes en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus....65

Figure 5.12 Succès de passage des perchaudes en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus....66

Figure 5.13 Succès de passage moyen d'un seuil des barbottes brunes entre les essais à débit fort et à débit faible 67

Figure 5.14 Succès de passage moyen des barbottes brunes d'un seuil et de deux seuils de différentes formes....68

Figure 5.15 Succès de passage des barbottes brunes en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus. 69

Figure 5.16 Succès de passage des barbottes brunes en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus. 70

Figure 5.17 Succès de passage moyen d'un seuil des achigans à petite bouche entre les essais à débit fort et à débit faible 71

Figure 5.18 Succès de passage moyen des achigans à petite bouche d'un seuil et de deux seuils de différentes formes 72

Figure 5.19 Succès de passage des achigans à petite bouche en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus. 74

Figure 5.20 Succès de passage des achigans à petite bouche en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus. 75

Figure 5.21 Succès de passage moyen d'un seuil des crapets-soleil entre les essais à débit fort et à débit faible 76

Figure 5.22 Succès de passage moyen des crapets-soleil d'un seuil et de deux seuils de différentes formes a) à débit faible et b) à débit fort.. 77

Figure 5.23 Succès de passage des crapets-soleil en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus. 78

Figure 5.24 Succès de passage des crapet-soleils en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus. 79

Figure 6.1 Seuils en trapèze enroché : a) sans déflecteur, vue d'amont et b) avec déflecteur, vue du dessus. 95

Chapitre I : Introduction

1.1 Problématique

Pour compenser les nombreuses pertes de milieux humides le long du fleuve Saint-Laurent, les gouvernements fédéral et provincial, épaulés par des organismes non gouvernementaux tels que Canards Illimités, ont aménagé près de 4000 hectares d'habitats riverains avec des digues et des structures de contrôle de niveau d'eau qui permettent de recréer des milieux marécageux. En raison de la tendance à la baisse des niveaux d'eau lors des périodes de crues, ces marais, aménagés sont cependant souvent surélevés et déconnectés du fleuve pendant la période de fraie de plusieurs espèces de poissons telles que le grand brochet, la perchaude, la barbotte brune, l'achigan à grande bouche et le crapet-soleil. Une solution à ce problème consiste à construire une passe migratoire permettant de redonner à ces espèces un accès aux marais pendant la période de reproduction.

Dans le passé, les passes migratoires ont souvent été conçues pour les salmonidés, groupe de poissons dont la valeur économique est très élevée (Calles et Greenberg, 2007). Grâce à leur grande capacité natatoire, les salmonidés peuvent franchir des vitesses de courant et des dénivellations interbassin relativement élevées (Mallen-Cooper et Brand, 2007). Bien que les passes conçues pour les salmonidés ne soient pas adaptées aux autres espèces, elles ont souvent été prises comme modèle pour les non-salmonidés (Mallen-Cooper et Brand, 2007), notamment dans la plaine inondable du Saint-Laurent. Cependant, la pente abrupte et la vitesse du courant élevée à l'intérieur de ces passes migratoires excèdent souvent la capacité natatoire des non-salmonidés, empêchant leur montaison (Mallen-Cooper et Brand, 2007).

La passe migratoire à fentes verticales de la rivière aux Pins, située sur la rive sud de Montréal, constitue un exemple de passe migratoire dont l'objectif est de faciliter le passage de non-salmonidés, mais qui a été conçue selon les critères de conception d'une passe à salmonidés. L'efficacité de cette passe migratoire a été testée par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) aux printemps 2005 et 2006, pour vérifier

le succès du passage de différentes espèces de poissons (grand brochet (*Esox lucius*), perchaude (*Perca flavescens*), barbotte brune (*Ameiurus nebulosus*), achigan à petite bouche (*Micropterus dolomieu*) et crapet-soleil (*Lepomis gibbosus*)) se reproduisant dans la plaine inondable (Brodeur et al., 2007). Les résultats de cette étude démontrent que la passe est peu efficace pour les espèces visées (un succès de passage ≤40%), à l'exception de l'achigan à petite bouche (succès de passage de 68% lors des essais de 2005) (fig. 1.1). Les modifications apportées à cette passe au cours du printemps 2006 (fig.1.1), bien que bénéfiques pour la perchaude et le grand brochet, ont eu pour effet de réduire le succès de montaison de la barbotte brune et de l'achigan à petite bouche. Ce travail suggérait donc le besoin de développer et de tester un nouveau type de passe répondant mieux aux besoins des poissons non-salmonidés de la plaine inondable du Saint-Laurent.

Pour ce faire, le MRNF a mis à profit le projet d'aménagement du marais du ruisseau de Feu pour concevoir et tester un nouveau type de passe migratoire multi-espèces. Pour atteindre le site de fraie que constitue l'aménagement, les poissons de la rivière des Prairies doivent remonter une section du ruisseau de Feu et franchir la passe migratoire qui a fait l'objet de l'étude. Cette passe migratoire présente des caractéristiques se rapprochant de celles d'un cours d'eau naturel constitué d'une succession de seuils et de bassins, permettant de diviser la dénivellation totale de 2,25 m entre le marais aménagé et le ruisseau de Feu, en une succession de petits seuils de 10 à 15 cm. En plus de permettre les mouvements amont et aval des poissons, ce type de passe représente en soi un habitat pour les poissons et les différents invertébrés présents dans le système (Aarestrup et al., 2003).

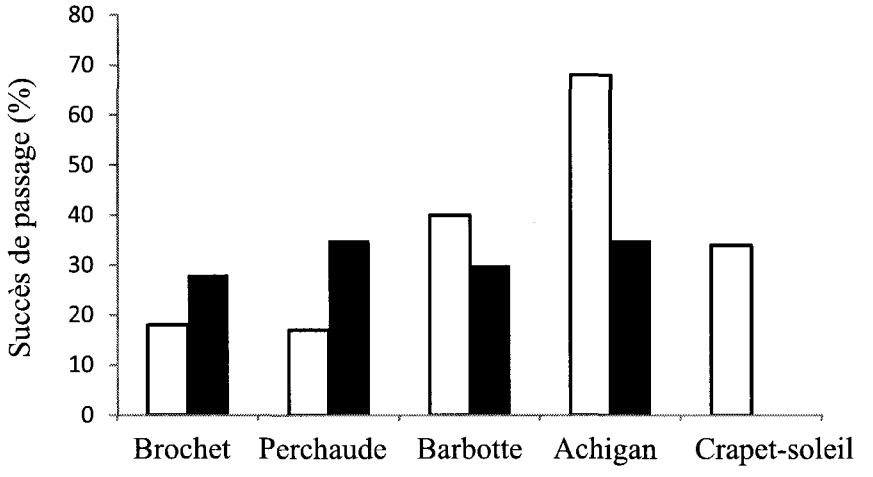


Figure 1.1 Succès de passage de cinq espèces de poissons dans la passe migratoire de la rivière aux Pins. Printemps 2005 (en blanc) et printemps 2006 (en noir) (modifié de Brodeur et al., 2007).

1.2 But et objectifs

Le but du projet consiste à identifier la meilleure configuration de la passe migratoire pour l'aménagement du marais du ruisseau de Feu, en mesurant le succès de passage de différentes espèces de poissons non-salmonidés. Les conditions hydrauliques aux seuils, telles que la vitesse du courant, la dénivellation interbassin et la profondeur d'eau, sont des facteurs déterminants pour le succès de passage des poissons (Jungwirth, 1996; Kneapken et al., 2006). Puisque le débit et la forme des seuils contribuent largement à établir ces conditions, ce projet a pour objectifs spécifiques de :

- tester l'effet de différentes configurations de seuil et de différents débits sur le succès de passage de plusieurs espèces de poissons non-salmonidés,
- déterminer la configuration de seuil et le débit optimal pour chaque espèce de poissons,
- formuler les recommandations pour améliorer la conception et l'opération de la passe migratoire.

Les travaux de terrains ont eu lieu entre le 19 avril et le 14 mai 2008. Le grand brochet, la perchaude, la barbotte brune, l'achigan à grande bouche (*Micropterus salmoides*) et le crapet-soleil ont été sélectionnés en tant qu'espèces indicatrices pour tester la passe

migratoire du ruisseau de Feu, car ce sont des espèces qui migrent vers les eaux chaudes et peu profondes des marais pour la reproduction et l'alimentation. Cependant, étant donné la rareté de l'achigan à grande bouche sur le site d'étude, ce sont des achigans à petite bouche qui ont été utilisés pour tester la passe, considérant que les capacités natatoires de ces deux espèces sont comparables.

1.3 Structure du mémoire

Le mémoire est divisé en sept chapitres. Le premier et présent chapitre expose la problématique et les objectifs du projet. Le second chapitre contient un résumé de l'écologie des milieux humides et souligne leur importance dans le cycle de vie de plusieurs espèces de poissons. Ce chapitre présente aussi le cycle de vie et les principales caractéristiques physiques des espèces de poissons qui ont été utilisées pour évaluer l'efficacité de la passe migratoire. Le troisième chapitre traite des principaux types de passes migratoires existants et des différentes méthodes utilisées pour évaluer leur efficacité. Le quatrième chapitre présente la méthodologie utilisée dans le présent projet, décrivant d'abord le site et la passe à l'étude, puis la méthode de marquage et le déroulement des essais. Les résultats sont ensuite présentés dans le cinquième chapitre. Le sixième chapitre contient la discussion des résultats et le septième chapitre résume les contributions du mémoire et les perspectives à venir.

Chapitre II : Écologie des marais riverains

Le chapitre deux résume les caractéristiques principales des milieux humides et traite de leur rôle dans le cycle vital de plusieurs espèces de poissons. Ces connaissances sont essentielles afin d'identifier les raisons pour lesquelles les poissons ont besoin d'y accéder et les conditions du milieu qui les stimulent leur migration et de protéger cet habitat.

Les milieux humides, qui constituent une transition entre les milieux terrestres et aquatiques, sont particulièrement productifs et essentiels pour les écosystèmes aquatiques. En effet, en plus d'intervenir dans le cycle de vie de nombreuses espèces de vertébrés et d'invertébrés pour lesquelles ils représentent des sites de reproduction, de nidification ou d'alimentation (Champagne et Melançon, 1985), les milieux humides ont une fonction de filtration de nombreux polluants et de stockage des eaux de crue (Mitsch et Gosselink, 1993). Cependant, le remblaiement des berges (Champagne et Melançon, 1985), l'aménagement agricole, urbain et industriel (PSUT, 1985), ainsi que la baisse du niveau d'eau du fleuve (Jean et al., 2001) ont causé la disparition de plus de 70% des milieux humides le long du fleuve Saint-Laurent et des Grands-Lacs depuis les 150 dernières années (Ouellet, 2005).

2.1 Définition des milieux humides et caractéristiques des systèmes riverains

Un milieu humide est un habitat dont les sols sont inondés ou saturés d'eau, en raison de la nappe phréatique qui est située près de la surface du sol. Ces milieux sont caractérisés par la présence d'une végétation adaptée aux conditions humides et par l'absence d'espèces intolérantes aux inondations (Couillard et Grondin, 1986; Mitsch et Gosselink, 1993; Hejny et Segal, 1998; Batzer et Sharitz, 2006). Cette définition englobe plusieurs types de milieux humides et l'annexe 1 présente le schéma de la classification des milieux humides du Québec, établie par Buteau et al. (1994).

Les systèmes riverains sont les milieux humides adjacents aux berges d'un cours d'eau (Mitsch et Gosselink, 1993). Du haut de la berge vers le lit de la rivière, un système

riverain est lui-même composé de différents habitats, possédant chacun un type de communauté végétale qui lui est propre. En hauteur, on retrouve le marécage, caractérisé par des communautés arbustives ou arborescentes, un peu plus bas, on retrouve le marais, composé d'herbaçaies inondées périodiquement ou de façon permanente et finalement, l'eau peu profonde est l'habitat le plus bas, où se retrouvent la végétation flottante et la végétation submergée (Grondin, 1996).

La dynamique des milieux riverains est principalement assujettie aux variations du niveau d'eau (Mitsch et Gosselink, 1993). À l'intérieur de la plaine inondable du Saint-Laurent, les systèmes riverains présentent des variations de la hauteur d'eau avec des pics en période de crue et un abaissement lors de la période d'étiage (Barnaud et Fustec, 2007). Ces variations influencent le développement des communautés végétales et animales en déterminant la superficie d'habitat disponible pour les espèces aquatiques (Jean et al., 2001) et en changeant les propriétés physiques et chimiques du milieu (Mitsch et Gosselink, 1993; Batzer et Sharitz, 2006). Par exemple, les crues printanières augmentent considérablement les apports en nutriments, permettant ainsi une croissance plus importante des jeunes poissons et faisant de ce type d'écosystème, l'un des plus productifs (Mitsch et Gosselink, 1993; Craig, 2008).

2.2. Ichtyofaune des milieux humides

2.2.1. Facteurs influençant la fréquentation des marais en période de fraie

Selon Grondin (1996), les marais sont des habitats essentiels dans le cycle vital de 28 espèces de poissons d'eau douce du Saint-Laurent, que plusieurs utilisent pour la fraie et l'alevinage. La fréquentation de ces frayères par les différentes espèces de poissons est principalement stimulée par le niveau d'eau et la température. Parmi les espèces fréquentant les marais, on retrouve le grand brochet, la perchaude, la barbotte brune, l'achigan à grande bouche et le crapet-soleil (Grondin, 1996; Bernatchez et Giroux, 2000).

Le niveau d'eau contrôle l'accès aux sites de fraie de la plaine inondable et leur superficie en dépend (Mingelbier et al., 2005). Par exemple, dans le Saint-Laurent fluvial,

la crue permet l'inondation des prairies humides, qui constituent le substrat idéal pour la reproduction du grand brochet. (Mingelbier et al., 2005). Il existe une relation positive entre la richesse spécifique de poissons retrouvée dans les marais et le niveau d'eau (Mingelbier et al., 2005). Le nombre d'espèces de poissons fréquentant les marais au printemps est aussi fonction de la longueur de la période d'accès printanière (Mingelbier et al., 2005). Ainsi, des crues persistant jusqu'à la fin de la saison de fraie permettent dans un premier temps l'accès aux sites de reproduction par les poissons à fraie hâtive (perchaude et grand brochet) et dans un second temps, par les poissons à fraie tardive (barbotte brune, l'achigan à grande bouche et le crapet-soleil) (Mingelbier et al., 2005).

Dans les eaux peu profondes de la plaine inondable, la température de l'eau augmente plus rapidement qu'ailleurs dans le fleuve. Selon Mingelbier et al. (2008), la richesse spécifique à l'intérieur des marais atteint un maximum lorsqu'il y a eu accumulation de 75 à 100 degrés-jours (en considérant les températures moyennes de plus de 0°C).

2.2.2 Capacité natatoire des poissons

La capacité natatoire des poissons est un élément clé pour calibrer la vitesse de courant à l'intérieur d'une passe migratoire. Elle est exprimée en trois types de vitesse de nage : la vitesse de nage soutenue, la vitesse de nage prolongée et le sprint (Hammer, 1995; Peake 2004; Peake et Farrell, 2004). La vitesse de nage soutenue est une vitesse à laquelle un poisson peut nager durant plus de 200 minutes sans éprouver de fatigue et est supportée par les muscles rouges, qui utilisent la voie aérobique. La vitesse de nage prolongée est maintenue entre 20 secondes et 200 minutes et est supportée à la fois par les muscles rouges et les muscles blancs. Ce type de nage implique les processus métaboliques aérobiques et anaérobiques. Finalement, le sprint (ou vitesse de nage maximum), est maintenu pendant moins de 20 secondes et utilise les muscles blancs, qui produisent de rapides et courtes accélérations de façon anaérobique (Hammer, 1995; Tudorache et al., 2008).

La vitesse à laquelle le maximum de consommation en oxygène est atteint se retrouve à l'intérieur de la nage prolongée et est appelée la vitesse de nage critique (Peake, 2004;

Tudorache et al., 2008). Afin de déterminer la vitesse de nage critique, on place un poisson dans un bassin à travers lequel un courant circule à une vitesse donnée pendant un intervalle de temps donné (pouvant aller de 2 à 60 minutes) (Peake, 2004). Une fois l'intervalle de temps terminé, la vitesse est augmentée d'un incrément donné. On augmente ainsi la vitesse par pallier, jusqu'à ce que le poisson se fatigue. Au cours de ce type d'exercice, la fatigue se produit lorsque les réserves intracellulaires de ressources énergétiques (telles que l'ATP et le glycogène) sont épuisées ou encore lorsqu'il y a accumulation de métabolites résultant de l'activité anaérobique (tel que le lactate) (Hammer, 1995; Peake et Farrell, 2004). La vitesse de nage critique est calculée comme suit :

$$U_{crit} = V_a + \left(\left(\frac{t_n}{t_i} \right) \times V_i \right)$$

Où U_{crit} est la vitesse de nage critique, V_a est l'avant dernière vitesse à laquelle le poisson a nagé, t_n est la période de temps à laquelle le poisson a nagé lors du dernier pallier de vitesse, t_i est l'intervalle de temps entre chaque changement de vitesse et V_i est l'incrément de vitesse ajouté à chaque pallier (Hammer, 1995). La valeur de U_{crit} mesurée peut varier en fonction de l'intervalle de temps utilisé dans l'expérimentation et est généralement plus élevée lorsque des incréments de temps plus courts sont utilisés (Peake, 2004). Il existe généralement une corrélation positive entre la longueur du poisson et la vitesse de nage critique (Hammer, 1995; Peake, 2004).

Cette vitesse de nage est couramment utilisée pour ajuster la vitesse de courant dans les passes migratoires (Peake, 2004). Cependant, Peake (2004), a testé des achigans à petite bouche à l'intérieur d'un couloir de 50 m, qu'ils devaient traverser avec différentes vitesses de courant. Les poissons n'étaient pas confinés et pouvaient donc nager librement en choisissant leur vitesse de nage. Lors de cet exercice, la vitesse à laquelle les poissons ont traversé le couloir (soit la vitesse au sol) était plus grande lorsque les vitesses de courant augmentaient, ayant pour effet de diminuer le temps de l'exercice (Peake, 2004; Peake et Farrell, 2004). La méthode de calcul de la vitesse de nage critique expliquée plus haut ne laisse pas la liberté aux poissons de choisir une vitesse plus élevée,

elle sous-estime donc la capacité réelle des poissons dans le contexte d'une passe migratoire et il faut donc l'utiliser avec prudence (Peake, 2004). Cependant, plusieurs facteurs environnementaux présents dans les passes migratoires, tels que les polluants et la turbulence peuvent diminuer la performance des poissons de façon difficilement prévisible (Hammer, 1995). Il est donc raisonnable d'utiliser la vitesse de nage critique, qui est très conservatrice, afin d'assurer le succès de passage des espèces de poissons visées.

2.2.3 Espèces utilisées dans cette étude

2.2.3.1. Le grand brochet

Caractéristiques générales

Le grand brochet mesure en moyenne de 50 à 75 cm de long, mais certains spécimens peuvent atteindre des tailles plus importantes (Bernatchez et Giroux, 2000). Cette espèce est présente dans 45% des eaux douces d'Amérique du Nord (Casselman et Lewis, 1996). Le grand brochet se nourrit d'invertébrés tels que des insectes et des sangsues, et de poissons (Craig, 2008). Il joue un rôle particulièrement important comme prédateur piscivore dans la régulation de la communauté piscicole (Casselman et Lewis, 1996). Le grand brochet se retrouve généralement dans les eaux douces peu profondes des lacs ou des rivières (Craig, 2008). Ses préférences d'habitat sont principalement basées sur la température de l'eau, la végétation, le niveau d'oxygène, la profondeur et la turbidité (Casselman et Lewis, 1996). Aux stades juvénile ou adulte, les grands brochets fréquentent des eaux d'une profondeur variable, allant d'environ 4 à 12 m (Casselman et Lewis, 1996).

Site de fraie recherché

Selon Casselman et Lewis (1996), les critères les plus importants pour le choix du site de ponte des grands brochets sont le niveau d'eau, type de végétation et l'exposition du site au vent et aux vagues. Ils recherchent des sites de ponte où l'eau atteint une profondeur de 10 à 70 cm. Le niveau d'eau doit être stable, afin d'empêcher l'assèchement des œufs et des larves et de favoriser le développement et le maintien de la végétation (Casselman

et Lewis, 1996; Mingelbier et al. 2005). Les brochets déposent leurs œufs sur des amas de végétation suffisamment denses pour les empêcher d'entrer en contact avec le substrat du milieu peu profond où les conditions sont souvent anoxiques (Mitsch et Gosselink, 1993). Le site doit être peu exposé au vent et aux vagues, afin d'accélérer le réchauffement de l'eau. Mingelbier et al. (2008) ont observé que les grands brochets recherchaient les eaux les plus chaudes d'une frayère pour y déposer leurs œufs. Dans plusieurs études, les grands brochets ont montré une certaine fidélité à leur site de ponte (Craig, 2008).

Phénologie

C'est au printemps, après la débâcle, que les grands brochets migrent vers les eaux peu profondes des plaines inondées (Massé et al., 1988; Casselman et Lewis, 1996; Mingelbier et al., 2005). La période de fraie se déroule d'avril à mai (Brodeur et al., 2004). Dans le lac Saint-Pierre, Brodeur et al. (2004) ont observé les premiers pics de migration alors que la température était sous les 6°C. Ils ont aussi observé que les pics de migration les plus importants se sont manifestés lors de montées rapides du niveau d'eau. Ces constats suggèrent que la migration des brochets serait déclenchée par l'augmentation de la température, alors que le niveau d'eau donnerait accès aux frayères.

Mouvement et capacité natatoire

Plusieurs études se sont intéressées aux mouvements des grands brochets (Diana, 1980; Massé et al., 1988; Jepsen et al., 2001; Koed et al. 2006; Vehanen et al., 2006). En général, ces poissons sont considérés comme étant peu actifs et bougeant de façon sporadique en raison de leur mode de chasse par embuscade (Diana, 1980; Kobler et al., 2008). Leurs déplacements seraient légèrement plus importants durant le crépuscule, mais très limités durant la nuit (Diana, 1980; Jepsen et al., 2001).

Pour ce qui est des mouvements saisonniers et annuels, Vehanen et al. (2006) ont suivi par radio-télémétrie 40 grands brochets de la rivière Kajaaninjoki (Fiinlande) sur une période allant du 24 mai 2002 au 23 juillet 2003. Selon leurs résultats, 16 d'entre eux se sont montrés sédentaires, c'est-à-dire qu'ils ne quittaient pas la rivière, et 24 voyageaient entre la rivière et le lac en fonction des saisons. Ces derniers remontaient dans la rivière

au printemps, et retournaient dans le lac en automne, où ils se dispersaient. Koed et al. (2006) ont observé des femelles parcourant des distances allant de 1,3 à 37 km, lors de la période de fraie. Des repérages télémétriques sur le grand brochet réalisés dans l'archipel de Montréal montrent que l'espèce est sédentaire et effectue des déplacements saisonniers inférieurs à 1 km dans 92% des cas (Leclerc 1984).

La capacité natatoire des grands brochets est fonction de la taille de l'individu (Peake, 2008). Harper et Blake (1990), ont testé leur capacité natatoire en laboratoire en stimulant le comportement de fuite. Ils ont observé une vitesse de nage maximale de 7,06 ms^{-1} ou 18,95 Ls^{-1} (où L correspond à la longueur de l'individu) et la vitesse maximale moyenne était de 3,97 ms^{-1}. Poddubny et al. (1970) ont observé une vitesse de nage maximale légèrement plus faible, soit 3 ms^{-1}. Par contre les grands brochets pouvaient maintenir une telle vitesse sur une période d'une minute. Selon Beamish (1978) la vitesse de nage critique du grand brochet est de 2,5 à 4,5 ms^{-1}. Finalement, dans une expérience menée par Peake (2008), les grands brochets se sont montrés capables de traverser un couloir de 50 m de long avec une vitesse de 1,2 ms^{-1} à une température moyenne de 13,9 °C.

2.2.3.2 La perchaude

Caractéristiques générales

La perchaude atteint une longueur allant de 10 à 25 cm (Bernatchez et Giroux, 2000). Cette espèce se retrouve principalement dans les eaux douces claire et peu profondes de l'Est de l'Amérique du Nord, dans les latitudes allant de la Floride jusqu'au sud de la Baie-James (Bernatchez et Giroux, 2000; Leclerc et al., 2008).

Selon leur taille, les perchaudes se nourrissent de zooplancton, de macro-invertébrés benthiques et de poissons (Thorpe, 1977; Magnhagen et Borcherding, 2008). Cette espèce est donc d'une grande importance à l'intérieur de la communauté ichtyologique des Grands Lacs et du tronçon fluvial du Saint-Laurent, car elle représente le lien énergétique entre les invertébrés benthiques et les poissons piscivores tels que le grand brochet (Thorpe, 1977; Tardif et al., 2005; Glover et al., 2008).

La perchaude est aussi l'une des espèces les plus abondantes dans le système des Grands Lacs et du Saint-Laurent (Glover et al., 2008). Malheureusement, en raison de la destruction des marais et de la mortalité due à la pêche, l'abondance de cette espèce a décliné dans ces systèmes (Bernatchez et Giroux, 2000; Glover et al., 2008).

Site de fraie recherché

Comme le grand brochet, la perchaude recherche les eaux calmes et peu profondes des marais en temps de crue, mais aussi dans les eaux peu profondes des lacs et des rivières (Thorpe, 1977). Les substrats recherchés pour la ponte sont diversifiés, les perchaudes déposent leurs œufs sur les rochers, les racines, les branches mortes et la végétation submergée (Thorpe, 1977; Glover et al., 2008). Selon Ceche et al. (2009), la perche européenne (*Perca fluviatilis*), qui est biologiquement très semblable à la perchaude (Thorpe, 1977), utilise plus fréquemment la végétation submergée morte comme substrat. Selon Mingelbier et al. (2005), les végétaux morts représentaient le substrat le plus utilisé par l'espèce dans le site étudié. Cette espèce évite cependant les secteurs où le substrat est inorganique et où la végétation est très dense (Mingelbier et al., 2005). Les perchaudes ont tendance à retourner vers leur site d'origine pour y pondre (Aalto et Newsome,1990; Glover et al., 2008). Glover et al. (2008) ont observé un comportement de fidélité au site d'origine pour 35% à 80% des perchaudes, dans le sud du lac Michigan.

Phénologie

La période de migration des perchaudes suit celle des grands brochets et se déroule de la mi-avril à mai (Brodeur et al., 2004). Selon Thorpe (1977), ce sont la photopériode et la température qui déclenchent la saison de fraie. Dans les marais du lac Saint-Pierre, Brodeur et al. (2004) ont observé le début de la migration des perchaudes lorsque la température de l'eau a atteint environ 7,0 °C. Selon cette même étude, les variations du niveau d'eau influencent les mouvements de la perchaude uniquement lors des années de montée rapide de la crue.

Mouvement et capacité natatoire

Les perchaudes sont des prédateurs diurnes et sont donc actives principalement durant la journée (Thorpe, 1977). Au cours d'une année, elles parcourent des distances très variables. Glover et al. (2008) ont marqué 63 948 perchaudes dans le bassin sud du lac Michigan avant de les relâcher et de les repêcher au cours de l'année. Ils ont observé que les distances parcourues par les perchaudes variaient de 13 à 101 km. Leurs résultats suggèrent aussi que quelques individus ont tendance à voyager sur de longues distances, alors qu'une majorité parcourt de courtes distances.

La capacité natatoire des perchaudes varie selon la taille des individus. Selon Nelson (1989), la vitesse de nage critique de la perchaude varie de 0,30 ms^{-1} à 0,45 ms^{-1}. Cependant, Pavlov et al. (1972) ont mesuré une vitesse de nage allant de 0,56 à 1,26 ms^{-1} chez la perche européenne.

2.2.3.3 La barbotte brune

Caractéristiques générales

La barbotte brune mesure entre 20 et 35 cm. On la retrouve dans les eaux douces du centre et de l'est de l'Amérique du nord et elle a été introduite en Europe et en Nouvelle-Zélande où elle représente un véritable fléau pour les espèces indigènes (Dedual, 2002; Melançon, 2006).

Les barbottes brunes se nourrissent d'écrevisses, de mollusques, d'œufs de poissons, de vers, de larves d'insectes, de carcasses et de matériel végétal (Scott et Crossman, 1974; Bernatchez et Giroux, 2000; Melançon, 2006). Ces poissons se servent de leurs capteurs chimiques, qui sont présents partout sur leur corps et en grande concentration sur leurs barbillons, pour détecter les goûts et les odeurs et rechercher leur nourriture (Sherman et Moore, 2001).

Ce poisson préfère les eaux peu profondes et calmes des lacs ou des zones protégées des grandes rivières et se tient dans les fonds vaseux (Melançon, 2006). La barbotte brune est réputée comme étant très résistante. En effet, elle peut s'accommoder des eaux polluées

et tolère des températures élevées, jusqu'à 36,6 °C (Scott et Crossman, 1974). Son faible besoin en oxygène lui permet de survivre dans la vase où la concentration en oxygène est aussi faible que 2 ppm. De plus, elle peut utiliser sa vessie natatoire afin de respirer de l'air à la surface de l'eau (Melançon, 2006). Les jeunes de cette espèce constituent des proies pour les grands brochets, les maskinongés (*Esox masquinongy*) et les dorés noirs (*Sander canadense*) et jaunes (*Sander vitreus*) (Scott et Crossman, 1974).

Site de fraie recherché

Les adultes recherchent les eaux peu profondes des rives des lacs, des marais, des baies ou des embouchures de ruisseaux, où la végétation est abondante (Scott et Crossman, 1974). Le mâle ou la femelle nettoie et creuse un petit nid sur lequel la femelle dépose ses œufs. Un ou les deux parents reste au-dessus du nid afin d'en assurer la protection (Scott et Crossman, 1974; Melançon, 2006). Les œufs éclosent six à neuf jours suivant la ponte lorsque la température de l'eau se situe entre 20,6 et 23,3 °C (Scott et Crossman, 1974). La température élevée des eaux peu profondes des marais permet aux œufs d'éclore plus rapidement (Melançon, 2006).

Phénologie

La période de fraie a généralement lieu de mai à juin et est déclenchée lorsque la température de l'eau atteint environ 21°C (Scott et Crossman, 1974; Bernatchez et Giroux, 2000).

Mouvement et capacité natatoire

Les barbottes brunes sont principalement actives la nuit, alors qu'elles sont à la recherche de nourriture (Scott et Crossman, 1974). Dans le Saint-Laurent, cette espèce effectue d'importantes migrations printanières en vue de s'alimenter et de se reproduire (Massé et al., 1988; Brodeur et al., 2004). Au cours de l'année, c'est au printemps que la barbotte brune est la plus active alors qu'elle migre vers les sites de fraie (Dedual, 2002). Il existe peu de documentation traitant du mouvement et de la capacité natatoire de la barbotte brune au Canada.

2.2.3.4 L'achigan à grande bouche

Caractéristiques générales

L'achigan à grande bouche est un poisson faisant partie de la famille des centrachidés, qui atteint généralement une longueur allant de 20 à 38 cm (Bernatchez et Giroux, 2000). Cette espèce est présente dans le sud du Québec et dans l'est et le centre des États-Unis. Elle a aussi été introduite en Europe, en Afrique et dans l'ouest de l'Amérique du Nord (Scott et Crossman, 1974).

Ces poissons sont principalement ichtyophages et chassent à l'affût, cachés dans la végétation. Cependant, ils se nourrissent aussi d'insectes, de crustacés et de grenouilles (Scott et Crossman, 1974).

L'été, l'achigan à grande bouche fréquente les eaux calmes peu profondes, herbeuses et au fond vaseux des lacs, des étangs et des rives protégées des rivières à courant faible (Scott et Crossman, 1974). Cependant, il utilise des profondeurs plus grandes lors de la période hivernale (Scott et Crossman, 1974; Hanson et al., 2008).

Site de fraie recherché

L'achigan à grande bouche fraie dans les eaux calmes et peu profondes, où l'on retrouve de la végétation émergente (Bernatchez et Giroux, 2000). Le mâle creuse une zone circulaire pour y faire son nid, généralement à une profondeur de 30 à 122 cm, et le garde jusqu'à l'éclosion des œufs (Scott et Crossman, 1974).

Phénologie

Selon Hanson et al. (2008), c'est la température de l'eau qui a le plus d'influence sur l'activité des achigans à grande bouche. La période de fraie s'étend de la fin du printemps jusqu'à mi-été, alors que la température de l'eau se situe entre 16,7 et 18,3°C (Scott et Crossman, 1974).

Mouvement et capacité natatoire

L'activité et le mouvement des poissons sont grandement dépendants de la température et des saisons. Hanson et al. (2008) ont fait le suivi de 20 achigans à grande bouche à l'aide de la télémétrie acoustique sur trois dimensions. Les poissons étaient également équipés d'un thermographe. Ils ont observé que les achigans à grande bouche sont très actifs durant la période qui précède la reproduction, pendant qu'ils migrent vers les sites de fraie. Les périodes où les achigans à grande bouche se sont montrés le moins actifs sont l'hiver et à la période de fraie (lors de la période de fraie les mâles bougent peu pour garder le nid). Après la fonte des glaces, les poissons vont vers les profondeurs d'eau plus faibles pour se trouver un site de fraie. En automne, ils recherchent des endroits plus profonds pour passer l'hiver.

La capacité natatoire de l'achigan à grande bouche est dépendante de sa longueur et de la température de l'eau. Les tests effectués par Cooke et al. (2001) en laboratoire, ont montré que la vitesse de nage critique de ces poissons varie de 1,7 à 1,9 Ls^{-1} (où L représente la longueur du poisson), à 6°C. Considérant que les achigans mesurent généralement entre 20 et 38 cm, on peut estimer leur vitesse de nage allant de 0,34 à 0,72 ms^{-1}. À 18°C, la vitesse augmente et varie entre 2,19 Ls^{-1} et 2,86 Ls^{-1}, soit de 0.44 à 1,10 ms^{-1}, pour des longueurs de 20 à 38 cm.

2.2.3.5 L'achigan à petite bouche

Caractéristiques générales

Comme il en a été question plus haut, c'est l'achigan à petite bouche qui a été utilisé au cours de ce projet, en raison des difficultés d'approvisionnement en achigan à grande bouche. Cette espèce mesure entre 20 et 38 cm de longueur (Bernatchez et Giroux, 2000). L'achigan à petite bouche se retrouve dans le centre et l'est de l'Amérique du nord, où il fréquente les eaux douces et claires des lacs et des rivières à fond rocheux ou sablonneux (Scott et Crossman, 1974).

L'achigan à petite bouche se nourrit d'abord de plancton et d'invertébrés au stade juvénile, mais lorsqu'il atteint la maturité, son régime alimentaire comprend des écrevisses, des grenouilles et des poissons (Scott et Crossman 1974).

Site de fraie

L'achigan à petite bouche recherche un substrat rocheux ou sablonneux pour y construire son nid (Scott et Crossman, 1974) et ne migre pas vers les marais. Ses sites de fraie ne correspondent donc pas à ceux des achigans à grande bouche.

Phénologie

Barthel et al. (2008) ont observé que les achigans à petite bouche migrent ver les rives d'un lac ou dans les rivières, à la fin du printemps, de la mi-mai à la mi-juillet, lorsque la température de l'eau atteint environ 15°C.

Mouvement et capacité natatoire

Les achigans à petite bouche sont principalement actifs durant la journée. Peake (2004) a observé une vitesse de nage critique allant de 0,65 à 0,98 ms^{-1} en laboratoire (à une température de 17,5 à 21°C), ce qui est semblable à ce qui a été observé chez l'achigan à grande bouche. Cependant, lors de cette même étude, les achigans à petite bouche ont réussi à remonter un couloir dans laquelle la vitesse du courant allait de 0,40 à 1,2 ms^{-1}. Les vitesses de nage mesurées en laboratoire ont donc sous-estimé les capacités réelles des poissons.

2.2.3.6 Le crapet-soleil

Caractéristiques générales

Le crapet-soleil est un autre centrachidé fréquentant les eaux douces de l'est de l'Amérique du nord (Scott et Crossman, 1974). Mesurant en moyenne 10 à 15 cm, il est beaucoup plus petit que l'achigan à grande bouche (Bernatchez et Giroux, 2000).

Les crapets-soleil se nourrissent de mollusques, de petits crustacés, de macro-invertébrés, de larves de salamandres et de petits poissons. Ils sont eux-mêmes la proie des grands

brochets, des achigans, des perchaudes et des dorés (Scott et Crossman, 1974; Bernatchez et Giroux, 2000).

Ce poisson fréquente les eaux peu profondes où le courant est faible. On le retrouve dans les zones denses en végétation submergée, donc près des rives des lacs et des rivières à courant faible, habituellement dans les profondeurs de moins de 3 m (Scott et Crossman, 1974; Melançon, 2006).

Site de fraie recherché

Les crapets-soleil fraient dans les marais et les eaux peu profondes (Scott et Crossman, 1974). Le mâle choisit un emplacement où il construira son nid, dans une zone où les courants sont faibles, où l'eau atteint une profondeur de 15 à 30 cm (Scott et Crossman, 1974). Le substrat recherché est très varié et peut être constitué de gravier, de roches, de sable ou de boue (Scott et Crossman, 1974). Il peut frayer avec plusieurs femelles dans le nid. Une fois la fraie terminée, le mâle garde les œufs (Melançon, 2006). Le temps d'incubation varie en fonction de la température (Scott et Crossman, 1974).

Phénologie

Selon Burns (1976), le début de la fraie chez le crapet-soleil dépend de la température de l'eau et de la photopériode. Lors d'essais en laboratoire, il a observé que la reproduction peut débuter lorsque la température se situe entre 11,5 et 14 °C chez les mâles et entre 14 et 16°C chez les femelles. La photopériode correspondant à la fraie se situe entre 12 et 13,5 heures de lumière par jour. En milieu naturel, la période de fraie s'étend de juin à début août, alors que la température de l'eau atteint les 20°C (Bernatchez et Giroux, 2000).

Capacité natatoire

Peu de données sont disponibles concernant la vitesse de nage des crapets-soleils. Selon Long et al. (1994), la vitesse de nage des crapets-soleil dépend de leur longueur. Ceux-ci peuvent nager à des vitesses correspondant à 2,1 Ls^{-1} (où L correspond à la longueur du

poisson), soit de 0,27 à 0,60 ms^{-1} pour les longueurs de 13 à 28,5 cm utilisées dans cette étude, avant d'avoir besoin de se servir de leurs nageoires pectorales.

Chapitre III : Passes migratoires, types et efficacité

Partout à travers le monde, des barrières artificielles (ex : barrages, écluses, ponceaux, etc.) ont été construites par l'homme, fragmentant ainsi les habitats aquatiques. Cette fragmentation limite le mouvement des poissons, causant de nombreux effets néfastes, tels qu'une perte d'accès à des habitats essentiels pour réaliser leur cycle vital, une diminution de la superficie des habitats, et à plus long terme, une diminution du flux génique entre les individus d'une même espèce (Kneapken et al., 2006). Pour réduire l'impact de ces barrières, des passes migratoires ont été construites depuis plus de 300 ans (Mallen-Cooper et Brand, 2007). Depuis la construction des premières passes migratoires en Europe, leur conception n'a cessé d'évoluer et s'est grandement diversifiée pour répondre aux besoins des espèces ciblées. Traditionnellement, les espèces ciblées étaient surtout des salmonidés, en raison de leur grande valeur commerciale. Récemment, de nouveaux types de passes migratoires ont été conçus pour d'autres espèces (Mallen-Cooper et Brand, 2007). Le chapitre trois présente les types de passes les plus utilisés dans le monde et porte une attention particulière aux passes migratoires multi-spécifiques. Il traite aussi des différentes méthodes mises en place pour évaluer l'efficacité d'une passe migratoire, en utilisant quelques exemples de cas pour illustrer le propos. Dans cette étude, une passe migratoire à seuil et à bassin successifs a été testée. Cette passe comporte aussi les caractéristiques d'un canal de contournement d'aspect naturel, car elle est principalement construite à partir de matériaux naturels et possède une pente faible (deux mètre de dénivelés répartis sur 160 m).

3.1. Types de passes migratoires les plus courants

3.1.1 Passe migratoire à seuils et bassins successifs (*pool and weir)*

La passe migratoire à seuils et bassins successifs est la plus ancienne, les premières ayant été construites au 17e siècle (Alvarez-Vazquez et al., 2008). Comme son nom l'indique, cette passe est composée d'une succession de seuils et de bassins. Un avantage de ce type de passe est que son installation et son entretien sont peu coûteux (ASCE, 2007; Alvarez-Vazquez et al., 2008). Son fonctionnement est simple : les poissons doivent approcher un seuil et dépenser une grande quantité d'énergie en un court laps de temps afin de le

franchir. Après le saut, ils peuvent se reposer dans le bassin situé en amont (fig. 3.1). L'efficacité de ce type de passe selon espèce dépend principalement de la dénivellation interbassin et fonctionne bien à débit constant (ASCE, 2007; Alvarez-Vazquez et al., 2008). Des fentes et des orifices peuvent êtres découpés dans les seuils afin de faciliter le passage des poissons.

Ce type d'ouvrage est l'un des plus courants parmi les passes migratoires et il peut être utilisé pour faciliter le passage des salmonidés (ASCE, 2007) ou des non-salmonidés, selon sa conception (Kneapken et al., 2006). Les passes migratoires conçues pour les non-salmonidés ont un gradient, une vitesse de courant et une dénivellation interbassin plus faibles que celles conçues pour les salmonidés (Jungwirth, 1996; Mallen-Cooper et Brand, 2007). Par exemple, en Australie, une passe à salmonidés ayant un gradient de 1:9 avec une vitesse du courant maximale de 2,4 ms^{-1} inhibe grandement le passage de non-salmonidés, tandis qu'une autre passe, ayant un gradient plus faible, soit 1:32 et une vitesse du courant maximale de seulement 1,4 ms^{-1} permet le passage des plus petites espèces (Mallen-Copper et Brand, 2007).

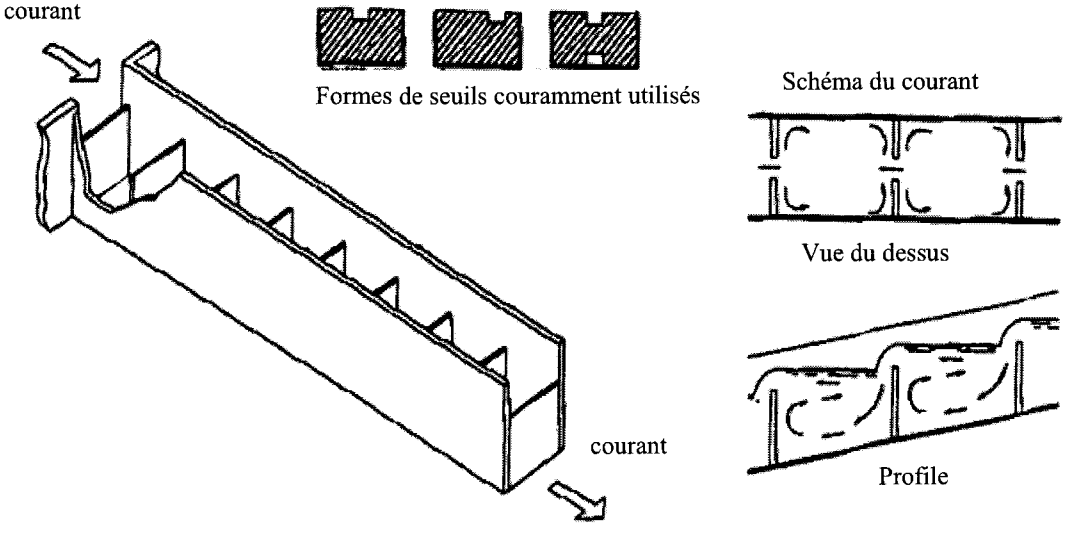
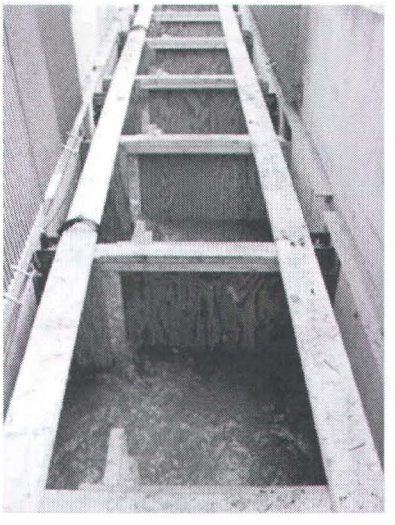


Figure 3.1. Exemple de passe migratoire à seuils et à bassins successifs (Kamula, 2001).

3.1.2 Passe migratoire à fente verticale

Les passes migratoires à fentes verticales sont formées d'un canal rectangulaire divisé en une succession de bassins séparés entre eux par des déflecteurs entre lesquels se trouve une fente verticale sur toute la profondeur du bassin (Alvarez-Vazquez et al., 2008) (fig. 3.2). Le courant perd alors de l'énergie en tourbillonnant dans les bassins grâce aux déflecteurs (ASCE, 2007). Ce sont aujourd'hui les modèles de passes les plus populaires dans le monde (Alvarez-Vazquez et al., 2008). Pour franchir ce type de passe, les poissons donnent d'importantes poussées pour traverser la fente et peuvent ensuite se reposer dans le bassin, avant de tenter de franchir la prochaine fente. Ce type de passe comporte des avantages : elle peut fonctionner sous une grande variété de hauteurs d'eau et les poissons peuvent la traverser à toutes les profondeurs (ASCE, 2007). Par contre, s'il est efficace pour le franchissement des salmonidés (ASCE, 2007; Alvarez-Vazquez et al., 2008), il l'est beaucoup moins pour les espèces aux capacités natatoires plus faibles, telles que le grand brochet, la perchaude, la barbotte brune, l'achigan à petite bouche et le crapet-soleil (Brodeur et al., 2007).

a)



b)

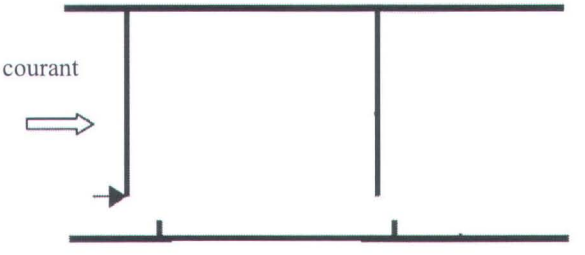


Figure 3.2. a) Exemple de passe migratoire à fente verticale, installée sur le site de la rivière aux Pins, Boucherville, Québec (Brodeur et al. 2007) et b) vue en plan d'un bassin d'une passe migratoire à fente verticale (Kamula, 2001).

3.1.3 Passe migratoire de type Denil

La passe migratoire de type Denil a pris le nom de son concepteur, Denil G. (1909), qui les a conçues pour permettre aux saumons de contourner un barrage sur la rivière de l'Ourthe, en Belgique. Ce type de passe est formé d'un tunnel rectangulaire à l'intérieur duquel se trouvent des déflecteurs en forme de cadre installés en angle (fig. 3.3). Les déflecteurs augmentent la friction du tunnel et créent des contre-courants (ASCE, 2007). Ce dispositif génère des zones de courant plus calmes à l'intérieur de l'orifice et des zones de courant plus fort sur les côtés (Kamula, 2001). Pour franchir la passe, les poissons doivent remonter la veine de courant sur toute la longueur de la passe, sans repos (Kamula, 2001). La pente et la hauteur d'eau dans le bassin de tête influencent l'efficacité de la passe chez différentes espèces (Haro et al. 1999). Cette passe est idéale pour les petits cours d'eau de tête, car elle est fonctionnelle pour un large intervalle de niveaux d'eau et les poissons peuvent la traverser à différentes profondeurs d'eau. Même si cette passe a d'abord été conçue pour faciliter le passage des salmonidés, elle est de plus en plus utilisée et efficace pour d'autres espèces, telles que l'alose savoureuse (*Alosa sapidissima*) et l'alose d'été (*Alosa estivalis*) (Haro et al. 1999).

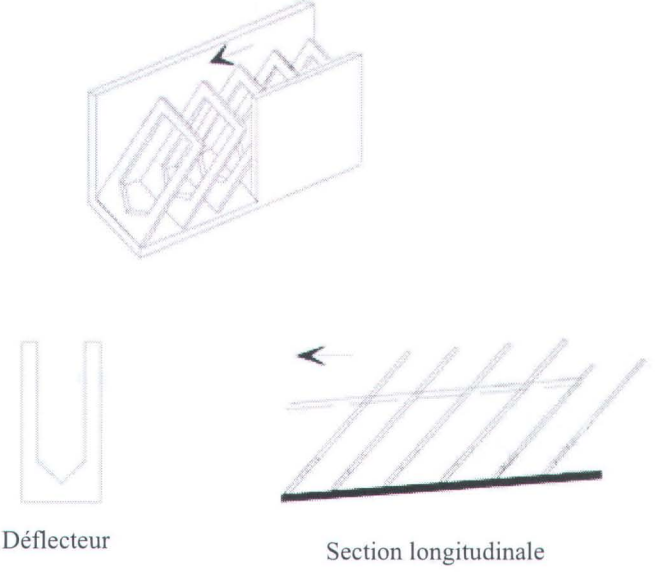


Figure 3.3. Exemple de passe migratoire de type Denil (Kamula, 2001).

3.1.4 Écluses et ascenseurs à poissons

Les écluses et les ascenseurs à poissons sont des passes mécaniques retrouvées principalement en Europe, malgré qu'il en existe quelques-unes aux États-Unis (ASCE, 2007) et en Australie (Baumgartner et Harris, 2007). Les ascenseurs à poissons sont constitués d'un bassin qui se referme lorsqu'il y a suffisamment de poissons à l'intérieur. Ce bassin est ensuite monté grâce à un moteur pour atteindre l'amont du barrage (ASCE, 2007).

Les écluses à poissons, fonctionnent comme les écluses à bateaux. Les poissons se rassemblent devant un mur dans un canal rectangulaire, puis une barrière se referme derrière eux pour former un bassin. Le niveau d'eau monte ensuite dans le bassin jusqu'à la hauteur d'eau du bassin suivant. Une fois ce niveau d'eau atteint, le mur devant les poissons s'ouvre et ceux-ci peuvent sortir dans le bassin plus haut perché, sans dépenser d'énergie (ASCE, 2007). Ce type de passe est efficace pour plusieurs espèces de poissons de toutes tailles (Baumgartner et Harris, 2007), mais son coût de construction, d'opération et d'entretien est particulièrement élevé, rendant son installation peu accessible (ASCE, 2007).

3.1.5 Les passes migratoires d'aspect naturel

Comme leur nom le suggère, les passes migratoires d'aspect naturel sont conçues à partir de matériaux naturels et possèdent les caractéristiques physiques et hydrauliques d'un cours d'eau naturel (Wildman et al., 2003). Non seulement ce type de passe permet les mouvements amont et aval, mais il constitue un habitat en soit pour plusieurs organismes aquatiques (Santos et al., 2005). Wildman et al. (2003) ont répertorié 85 passes migratoires d'aspect naturel à travers le monde et les ont subdivisées en deux grandes catégories : les passes de type canal de contournement d'aspect naturel et les passes à rampe enrochée.

Les canaux de contournement d'aspect naturel sont des canaux peu profonds à pente faible généralement utilisés pour éviter un obstacle dans une rivière, tel un barrage, et dont le lit ressemble à celui du cours d'eau principal (Wildman et al. 2003; Santos et al.

2005; Calles et Greenberg, 2007) (fig. 3.4). Les canaux de contournement conviennent aux salmonidés et aux non-salmonidés. Ils fonctionnent pour un large intervalle de niveaux d'eau et demandent peu d'entretien (Wildman et al., 2003; ASCE, 2007; Calles et Greenberg, 2007). Les passes à rampe enrochée sont des passes à aspect naturel dont le substrat du lit est constitué de roche pour aider les organismes à remonter près de l'une des rives du cours d'eau principal (fig. 3.5). À l'intérieur de chacune de ces catégories, on peut retrouver différents types de passes d'aspect naturel, telles que des passes à seuils et à bassins, à rapides et à bassins, à méandres, à rochers, à seuils enrochés, etc (Wildman et al., 2003).

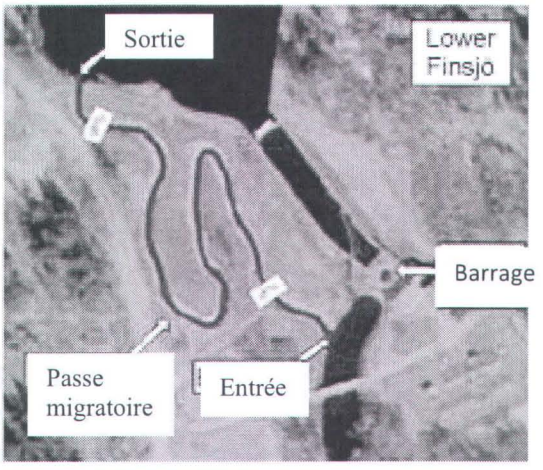


Figure 3.4. Canal de contournement d'aspect naturel sur la rivière Ewan en Suisse (Calles et Greenberg, 2007).

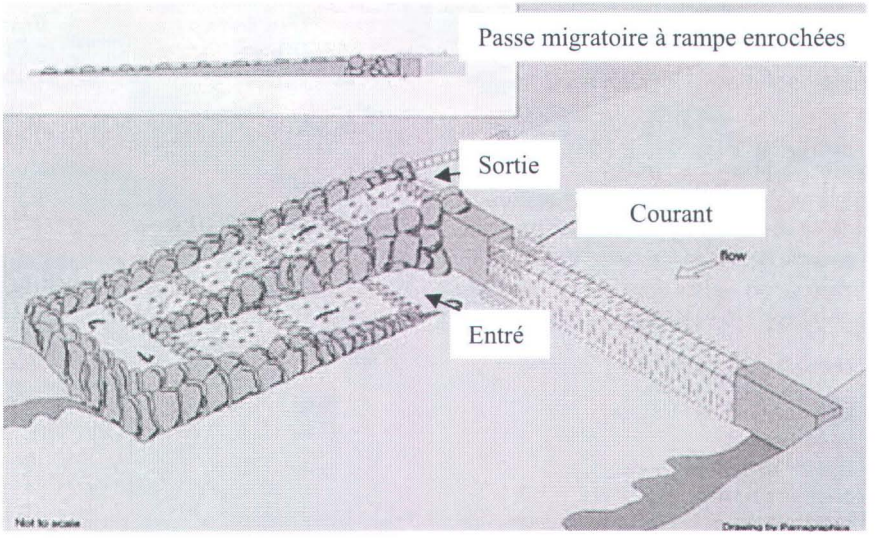


Figure 3.5. Schéma d'une passe migratoire à rampe enrochée (Department of Industry & Investment of New South Wales, Australia, 2005).

3.2 Suivi de l'efficacité d'une passe migratoire

L'installation d'une passe migratoire a pour objectif d'améliorer le passage des poissons dans un cours d'eau. Il faut souligner qu'une passe migratoire ne remplace pas entièrement un passage naturel. Pour être efficace, le type de passe doit être soigneusement choisi en fonction des caractéristiques du cours d'eau et des espèces ciblées. Mallen-Cooper et Brand (2007) suggèrent un plan en quatre étapes pour choisir et installer une passe migratoire. Il convient premièrement d'identifier la communauté de poissons fréquentant le cours d'eau, deuxièmement de connaitre les capacités natatoires de chaque espèce, troisièmement de concevoir et installer la passe en fonction de la capacité natatoire des poissons et quatrièmement d'évaluer la performance de la passe. Il est donc essentiel de tester l'efficacité de ces passes en observant son attractivité et le succès de passage des poissons.

Plusieurs techniques ont été développées afin de suivre les poissons dans une passe migratoire. Le comptage des poissons en amont et en aval, le marquage et la recapture, le sondage hydroaccoustique (Mallen-Cooper et Brand, 2007), l'enregistrement vidéo automatisé (Santos et al., 2005) et le suivi des poissons à l'aide de la télémétrie acoustique ou radio, ou à l'aide de transpondeurs passifs (Mallen-Cooper et Brand, 2007)

en sont des exemples. Il est important de choisir une méthode d'évaluation adéquate, afin d'éviter de biaiser l'estimation de l'efficacité de la passe migratoire (Mallen-Cooper et Brand, 2007).

3.2.1 Évaluation de l'efficacité par le comptage amont et aval des poissons et par marquage-recapture

Une méthode souvent utilisée pour évaluer l'efficacité d'une passe migratoire est le décompte des poissons en amont de la passe. Cependant, selon Mallen-Cooper et Brand (2007), cette méthode tend à surestimer l'efficacité des passes migratoires. En effet, cette méthode ne tient pas compte des poissons qui s'approchent de la passe et tentent de la traverser sans succès. Par contre, cette méthode peut être utile pour les suivis annuels à très long terme (Mallen-Cooper et Brand, 2007).

On obtient plus de précision en effectuant le décompte des poissons en aval et en amont de la passe. Mallen-Cooper et Brand (2007) ont utilisé cette méthode pour vérifier l'efficacité d'une ancienne passe migratoire à seuils et bassins successifs pour salmonidés utilisée par des non-salmonidés sur la rivière Murray en Australie. Cette passe migratoire avait fait l'objet d'un suivi par décompte quotidien des poissons en amont de la passe entre 1937 et 1992. La passe était considérée comme étant efficace en raison du grand nombre de non-salmonidés comptés en amont. Par contre, les poissons comptés en amont représentaient en fait moins de 1% des poissons qui approchaient l'entrée de la passe.

La méthode de marquage et de recapture des poissons est plus précise pour évaluer l'efficacité d'une passe migratoire que le simple comptage en aval et en amont. Les poissons sont d'abord capturés, marqués de façon à donner un code spécifique à chaque individu, relâchés puis recapturés après un délai donné. Il existe plusieurs façons de marquer des poissons pour la recapture, l'injection d'élastomère et la fixation d'une étiquette en sont des exemples (ex : Knaepkens et al., 2005; Glover et al. 2008). Cette méthode éprouvée permet d'identifier chaque individu et fournit des informations sur les taux de passage, de croissance et de survie. Le lieu de relâche étant connu, la distance parcourue et les mouvements saisonniers des poissons recapturés peuvent être estimés (Gibbon et Andrews, 2004; Johnston et al., 2009). Cependant, cette méthode n'offre pas

d'informations précises sur le mouvement des poissons à l'intérieur d'une passe, dont les recaptures sont très variables (ex : Knaepkens et al., 2005; Glover et al. 2008).

3.2.2 Télémétrie radio et acoustique

La télémétrie radio et la télémétrie accoustique fournissent des informations détaillées sur les mouvements des poissons. Les deux technologies fonctionnent grâce à un émetteur implanté sur l'animal, qui envoie des ondes détectées par une antenne. La télémétrie radio utilise des ondes radio, qui peuvent êtres captées sur une longue distance à l'aide d'antennes. La télémétrie acoustique, quant à elle, utilise des ondes sonores, plus rapides. Elle peut être à deux dimensions ou à trois dimensions. La télémétrie acoustique en trois dimensions a l'avantage d'indiquer, en plus de la localisation du poisson dans l'espace, la profondeur à laquelle il se trouve (Hanson et al., 2008). La position des poissons marqués peut être prise automatiquement pendant une période donnée, par des hydrophones fixes (Hanson et al., 2008). Cependant, cette technologie ne convient pas à l'utilisation en rivière, où la turbulence reliée à l'écoulement crée un bruit masquant le signal des émetteurs. Les émetteurs radios et acoustiques nécessitent une batterie à durée de vie limitée, qui mobilise une large partie du volume de l'émetteur. De plus, le coût des émetteurs radio et acoustique varie entre 200$ et 400$ l'unité (Johnston et al., 2009), ce qui limite le nombre de poissons marqués (Castro-Santos et al., 1996). La taille des émetteurs peut aussi avoir un impact sur la capacité natatoire et le comportement des poissons (Castro-Santos et al., 1996). Stakenas et al. 2008, ont comparé les effets de différents types de marquage sur plusieurs espèces de poissons et ont conclu que la santé des poissons marqués par des émetteurs radio et acoustiques était demeurée bonne durant la période d'expérimentation.

3.2.3 Transpondeurs passifs

Les transpondeurs passifs sont des puces électroniques scellées dans du verre biocompatible (Gibbon et Andrews, 2004) que l'on peut insérer dans la cavité abdominale ou sous la peau des poissons (ex : Lucas et al., 1999; Brodeur et al., 2007; Stakenas et al., 2009). À chaque transpondeur est attribué un code numérique unique, afin d'identifier les individus marqués. Lorsqu'ils sont placés à l'intérieur d'un champ

magnétique produit par une antenne reliée à un module de contrôle, les transpondeurs passifs sont activés et transmettent leur code numérique. Le signal est capté par l'antenne et un ordinateur enregistre le numéro du code ainsi que l'heure de la détection (Castro-Santos et al., 1996). Les antennes ont donc deux fonctions : elles chargent le transpondeur passif et captent son signal.

Il existe principalement deux modes de transmission de l'information entre le transpondeur passif et l'antenne: les modes full-duplex et half-duplex (Johnston et al., 2009b). Le mode full-duplex permet au module de contrôle des antennes d'envoyer et de recevoir simultanément des signaux (le téléphone est un exemple de système full-duplex). Ce système est plus rapide, mais demande plus d'énergie et la portée des antennes est plus faible (20 mm à 360 mm pour les transpondeurs de 12 mm et environ 900 mm pour les transpondeurs de 23 mm) (Johnston et al., 2009b). Dans un système half-duplex, le module de contrôle envoie et reçoit l'information selon un cycle d'alternance (le talkie walkie est un exemple de système half-duplex). Ce système est plus lent, mais moins énergivore et la portée des antennes peut s'étendre jusqu'à 1000 mm (Johnston et al., 2009b).

Les antennes peuvent être fixes ou portatives. Les antennes portatives permettent de balayer manuellement une grande superficie pour détecter des individus marqués. Cependant, le suivi est fait de façon sporadique (Johnston et al., 2009a). Les antennes portatives sont aussi utilisées lors de campagne de marquage et recapture de poissons marqués par transpondeurs passifs (ex : Gibbon et Andrews, 2004). Les antennes fixes sont utilisées pour effectuer un suivi continu à des endroits précis. Dans le cas des passes migratoires, elles peuvent être installées à l'entrée et à la sortie d'une passe, ou encore au niveau de chaque seuil (ex : Haro et al., 1999; Brodeur et al., 2007). Il est également possible d'installer un tapis d'antenne sur le fond d'un plan d'eau, afin d'obtenir des informations plus précises sur le mouvement des poissons (Lucas et al., 1999; Johnston et al., 2009b). Par exemple, Lucas et al. (1999) ont utilisé un petit tapis d'antennes, en aval et en amont d'une passe migratoire de type Denil afin de mesurer les capacités de montaison de 11 espèces de poissons, tels que la perche européenne et la truite brune (*Salmo trutta*). Selon les auteurs, l'efficacité de détection approchait les 100%, ce qui

suggère que cette méthode est fiable pour effectuer un suivi précis de poissons à travers une passe.

La fiabilité de la méthode a aussi été testée dans le cadre du suivi des poissons dans la passe migratoire de la rivière aux Pins, à Boucherville. Brodeur et al. (2007) ont mesuré un taux de détection des poissons marqués variant entre 96% et 97%, démontrant ainsi l'efficacité de cette méthode pour le suivi des poissons dans le contexte du suivi des passes migratoires.

La technologie des transpondeurs passifs présente de nombreux avantages pour le suivi des poissons. Les transpondeurs passifs sont autonomes, puisqu'ils n'ont pas besoin de batterie pour émettre leur signal, ce qui leur procure une durée de vie presqu'illimitée, en plus de réduire considérablement leur taille et leur prix (Castro-Santos et al., 1996). Le faible coût des transpondeurs passifs permet d'augmenter le nombre de poissons marqués. De plus, en raison de leur plus petite taille, les transpondeurs passifs sont moins susceptibles d'affecter la croissance et le comportement des poissons, que les émetteurs acoustiques ou radio (Stakenas et al., 2009).

3.3 Efficacité des passes migratoires utilisées par des non-salmonidés

3.3.1 Efficacité des passes à seuils et bassins successifs

L'efficacité des passes à seuils et bassins successifs dépend grandement de la dénivellation interbassin, de la configuration des seuils, de la grandeur des bassins et des conditions environnementales (ex : température, turbidité, vitesse du courant). Les non-salmonidés ont besoin de dénivellations interbassins plus faibles que les salmonidés pour franchir une passe en raison de leur capacité natatoire plus faible. Par exemple, Mallen-Cooper et Brand (2007) ont testé l'efficacité d'une passe migratoire à seuils et bassins successifs pour le passage de non-salmonidés tels que la perche dorée (*Macquaria ambigua*), le bony herring (*Nematalosa erebi*), la carpe commune (*Cyprinus carpio*), la perche européenne et la perche argentée (*Bidyanus bidyanus*). Un très faible succès de passage a été mesuré (< à 1%) et attribué à la forte dénivellation interbassin de 30,5 cm.

Knaepkens et al. (2005) ont aussi testé une passe migratoire à seuils et bassins successifs pour permettre le passage de non-salmonidés, tels que la perche européenne, le chabot commun (*Cottus gobio,* un poisson de fond*)* et le gardon (*Rutilus rutilus*, un cyprinidé), après l'installation d'un barrage sur la rivière Laarse Beek, un rivière en Belgique. À l'intérieur de cette passe, la dénivellation interbassin était de 10 à 20 cm. De plus, une brèche en forme de «V» avait été découpée dans chaque seuil, afin de faciliter le passage des poissons. Les vitesses mesurées variaient de 0,01 à 0,2 ms^{-1} pour les cinq premiers seuils, et de 0,3 à 0,6 ms^{-1} pour les deux derniers seuils. Afin de tester l'efficacité de la passe, les poissons ont été capturés en aval et en amont du barrage, marqués par élastomère, relachés en aval et recapturés en amont de la passe. Parmi les poissons marqués, 8% des perches européennes et 29% des gardons ont été recapturés en amont de la passe, mais les chabots communs ont tous été recapturés soit en aval ou à l'intérieur de la passe. La passe a donc montré une efficacité légèrement supérieure à celle testée par Mallen-Cooper et Brand (2007), suggérant que les non-salmonidés ont un meilleur succès de passage lorsque la dénivellation interbassin est plus faible, mais le concept pourrait encore être amélioré. Selon les auteurs, des brèches plus profondes pourraient faciliter le passage des nageurs de fond et offrir une plus grande variété de vitesses du courant à l'intérieur de celles-ci.

3.3.2 Efficacité des passes migratoires d'aspect naturel

Des passes migratoires d'aspect naturel ont aussi été testées dans le passé. Calles et Greenberg (2007) ont testé l'efficacité de deux canaux de contournement d'aspect naturel sur la rivière Eman, en Suède. Ces canaux mesuraient 370 m et 150 m de long avec des pentes de 2,5% et 1,8 % respectivement. Les vitesses à l'intérieur des passes variaient de 0 à un peu plus de 2 ms^{-1} dans les deux passes. Les poissons tels que la tanche (*Tinca tinca*), la perche européenne, le chevaine (*Leuciscus cephalus*), la lotte (*Lota lota*) et le gardon ont été suivis à l'aide de transpondeurs passifs et d'antennes placées en aval et en amont des deux passes. Les résultats ont démontré un succès de passage global de 74%. Parmi les espèces testées, la perche européenne a montré un succès de passage de 32% et le grand brochet, un succès de 13%.

Santos et al. (2005) ont aussi mesuré le succès de passage de non-salmonidés dans un canal de contournement d'aspect naturel au Portugal, grâce à un suivi par enregistrement vidéo automatisé. Pendant les 117 jours de suivi, 7614 poissons représentant huit espèces, dont 7 non-salmonidé, (le mullet (*Mugil cephalus*), le barbot commun (*Barbus bocagei*), le nase commun (*Chondrostoma polylepis*), l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), la lamproie (*Petromyzon marinus*), *Squalus carolitertii* et *Cho arcasii*) et la truite brune, ont été dénombrés à l'intérieur de la passe. Toutes les espèces répertoriées en aval de la passe étaient également présentes à l'intérieur de la passe. Ce type de passe a donc permis le passage de l'ensemble des espèces présentes dans la rivière, même celles à faible capacité natatoire, mais le taux de passage demeure inconnu. Tous les stades de vie de sept des huit espèces répertoriées ont été retrouvés dans la passe, suggérant ainsi que la passe constituait également un habitat utilisé par ces espèces.

Ces exemples démontrent qu'il est possible de construire des passes migratoires améliorant le passage de plusieurs espèces à faible capacité natatoire. Les passes migratoires d'aspect naturel ont montré des résultats particulièrement intéressants (Santos et al., 2005; Calles et Greenberg, 2007; Jungwirth 1996). Les passes migratoires à seuils et à bassins successifs peuvent aussi améliorer le passage de non-salmonidés lorsqu'elles y sont adaptées. D'ailleurs, plusieurs passes migratoires à aspect naturel s'inspirent de ce concept tout en utilisant des matériaux naturels (Wildman et al., 2003).

Chapitre IV : Méthodologie

4.1 Site à l'étude

4.1.1 Mise en contexte

Depuis le milieu des années 1970, les crues printanières sont plus faibles en raison des variations climatiques et de la régularisation par les barrages, ce qui influence la disponibilité des milieux humides de la plaine inondable pour les poissons (Brodeur et al., 2004). Afin de compenser en partie les pertes de superficie de milieux humides, plusieurs marais artificiels ont été aménagés à travers le monde (Mitsch et al., 2005). Au Québec, entre les années 1987 et 2001, 14 marais totalisant 1326 ha ont été aménagés au lac Saint-Pierre dans le but de compenser des pertes d'habitats pour la sauvagine et les poissons (Brodeur et al., 2004). Ces marais représentent des milieux de qualité pour la croissance des poissons (Brodeur et al., 2004). Par exemple, selon Tardif et al. (2005) les perchaudes de l'année y croissent plus rapidement qu'en milieu naturel. Ces milieux sont utilisés par au moins 37 espèces de poissons (Mingelbier et al., 2005).

4.1.2 Site à l'étude

Le ruisseau de Feu est situé au nord-est de Montréal, dans la municipalité de Terrebone (fig.4.1). Ce site a été utilisé pour l'agriculture depuis plus de 250 ans (Ville de Terrebone, 2008). Il s'agit d'une plaine inondable dont le tiers de la superficie est située dans une zone d'inondation de récurrence 2 ans et le reste est situé dans une zone de récurrence 20-100 ans (Ville de Terrebone, 2008). Historiquement, la perchaude utilisait ce site pour y frayer et le ruisseau de Feu était très fréquenté par les pêcheurs jusqu'à la fin des années 1990. Ensuite, une diminution de l'abondance des perchaudes a été observée dans le Saint-Laurent, expliquée en partie par une surpêche, une détérioration de l'habitat, des obstacles à la montaison et des crues printanières plus faibles (Ville de Terrebone, 2008). En effet, la fluctuation du niveau d'eau peut avoir un impact sur les populations de poissons frayant en marais, en diminuant l'accès aux frayères et leur superficie (Brodeur et al., 2004).

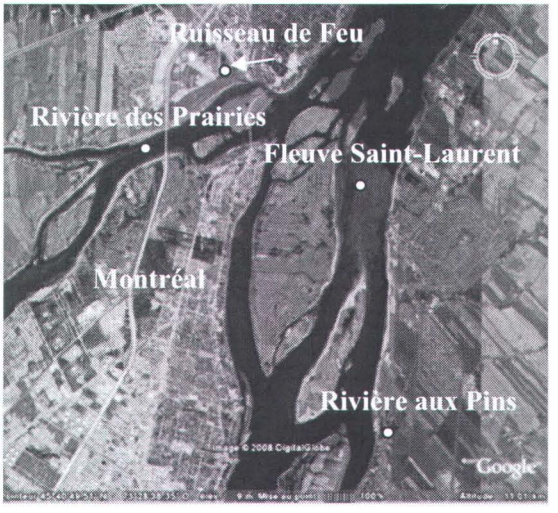


Figure 4.1. Localisation du ruisseau de Feu (au nord) et de la rivière aux Pins (au sud). Le ruisseau de Feu se jette dans la rivière des Prairies.

Le projet du ruisseau de Feu aménagé par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune et Canards Illimités, comprend quatre secteurs: un marécage, un marais, une forêt et une prairie (fig. 4.2). C'est dans le secteur marais, aménagé en 2007-2008, qu'a eu lieu la présente expérimentation. La superficie du marais est de 45 ha à la cote maximale d'opération de 8,7 m. Son niveau d'eau est contrôlé par des digues et une structure munie de vannes. Le marais, entouré de prairies humides et composé à 50% d'eau libre et à 50% de végétation émergeante, devrait offrir un habitat diversifié pour les oiseaux aquatiques et les poissons. Un réseau de canaux y a été aménagé, afin de procurer des habitats en eau libre. Une passe migratoire a aussi été aménagée pour permettre l'accès des poissons au marais. Une pompe acheminera l'eau de la rivière des Prairies vers le marais entre les mois de mars et novembre, afin de maintenir un niveau d'eau suffisant pour les besoins de la faune piscicole et pour assurer l'approvisionnement en eau de la passe migratoire (Michaud, 2007).

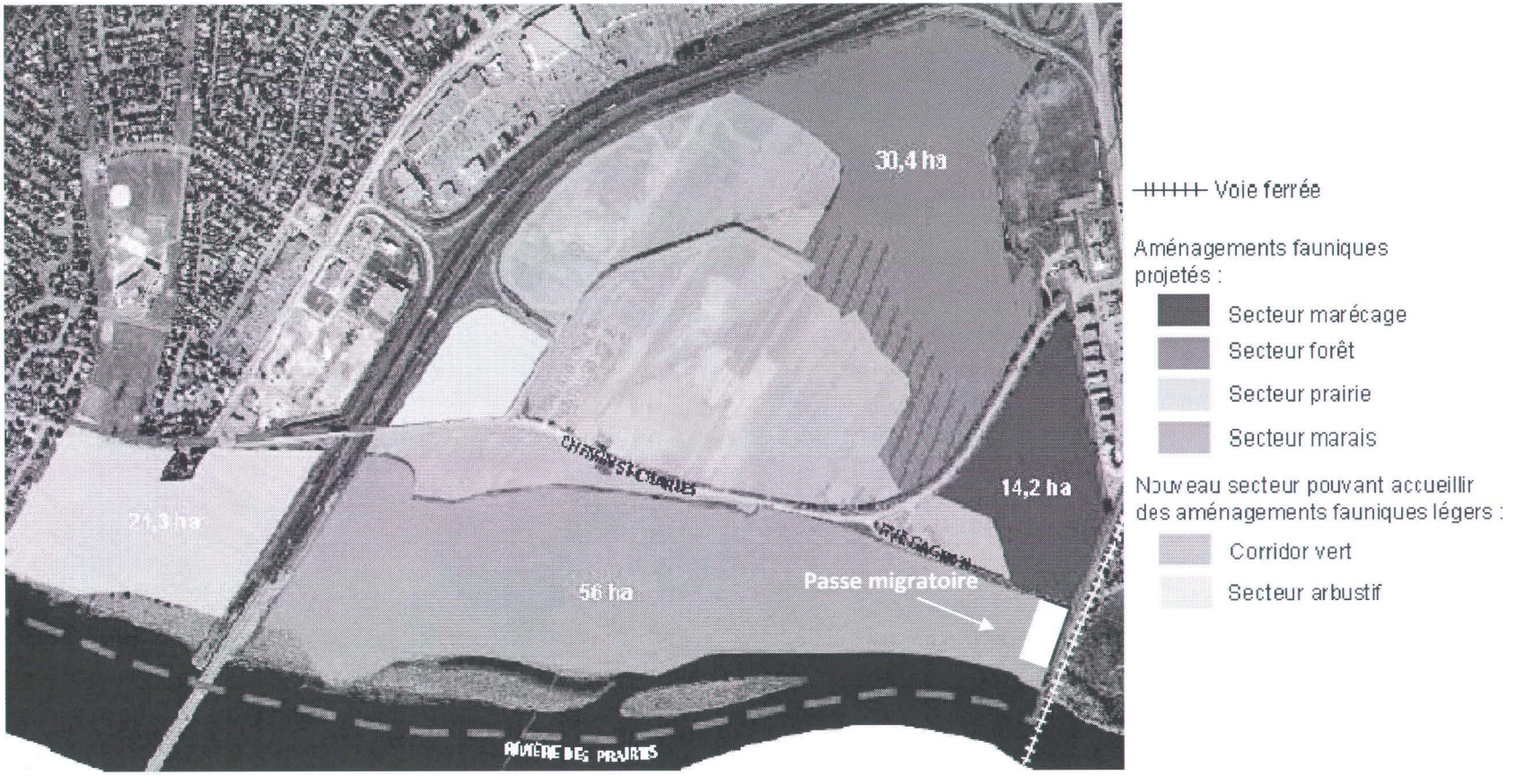


Figure 4.2. Plan de l'aménagement faunique du ruisseau de Feu (Ville de Terrebonne, 2008).

4.1.3 Passe migratoire à l'étude

La passe migratoire testée au cours (du 19 avril au 14 mai 2008) de ce projet relie le ruisseau de Feu au marais aménagé. Celle-ci est constituée de 14 bassins de 10 à 14 m de longueur par 6 à 8 m de largeur (fig. 4.3). Les bassins sont séparés par une cloison fabriquée de palplanches de métal, dans laquelle est inséré un panneau de bois muni d'une échancrure d'une forme donnée (voir la section 4.3). La berge des bassins adjacente aux cloisons a été stabilisée à l'aide d'enrochement et des végétaux y seront plantés afin d'améliorer l'aspect naturel de la passe. La grande taille de chacun des bassins permet de créer des zones d'eau calme offrant des aires de repos aux poissons migrants. La passe migratoire a une longueur totale de 160 m et permet aux poissons de passer de l'élévation 6,45 m à 8,7 m, grâce à une dénivellation interbassin d'environ 15 cm. Dans une première étape, les dix seuils les plus en amont ont été construits afin d'y effectuer l'étude décrite dans ce mémoire. Les résultats du mémoire serviront donc à déterminer la meilleure configuration de la passe, qui sera utilisée lors de la complétion des travaux de construction de la passe.

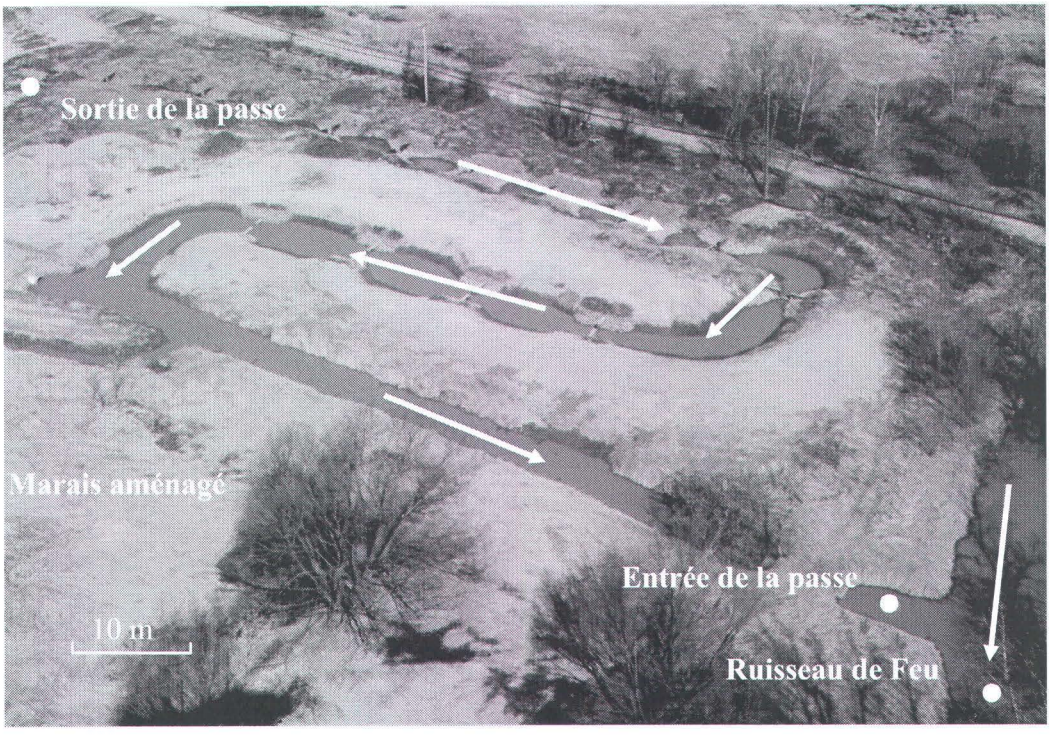


Figure 4.3. Passe migratoire multi-espèces étudiée du segment marais du ruisseau de Feu. Les flèches indiquent le sens de l'écoulement.

4.2 Débits testés

La passe migratoire a été testée sous deux conditions de débits différentes : un débit faible de 0,03 ± 0,006 m^3s^{-1} (n=40) et un débit plus élevé de 0,05 ± 0,009 m^3s^{-1} (n=34). La valeur des débits a été déterminée à partir des vitesses mesurées au début et à la fin de chaque essai, tel que décrit dans la section 4.8, à l'intérieur de chaque seuil, dont les dimensions sont présentés dans la section 4.3. Étant donné que le marais sera alimenté en eau par une pompe, l'objectif était de tester deux différents débits afin de déterminer la puissance de la pompe nécessaire. Puisque le marais n'était pas encore en fonction lors de la campagne de terrain, l'eau était pompée à partir d'un bassin adjacent formé par la crue printanière. Les deux débits étaient contrôlés par une valve et ont été testés en alternance.

4.3 Seuils testés

Pour les deux conditions de débit, trois types de seuils ont été comparés dans le cadre du projet, soit les seuils en trapèze enroché, les seuils en trapèze non-enroché et les seuils en brèche (Fig. 4.4). Entre chaque bassin, un cadre métallique recevant des poutrelles a permis d'insérer des panneaux temporaires, créant des seuils de formes différentes (Fig. 4.5).

a)

b)

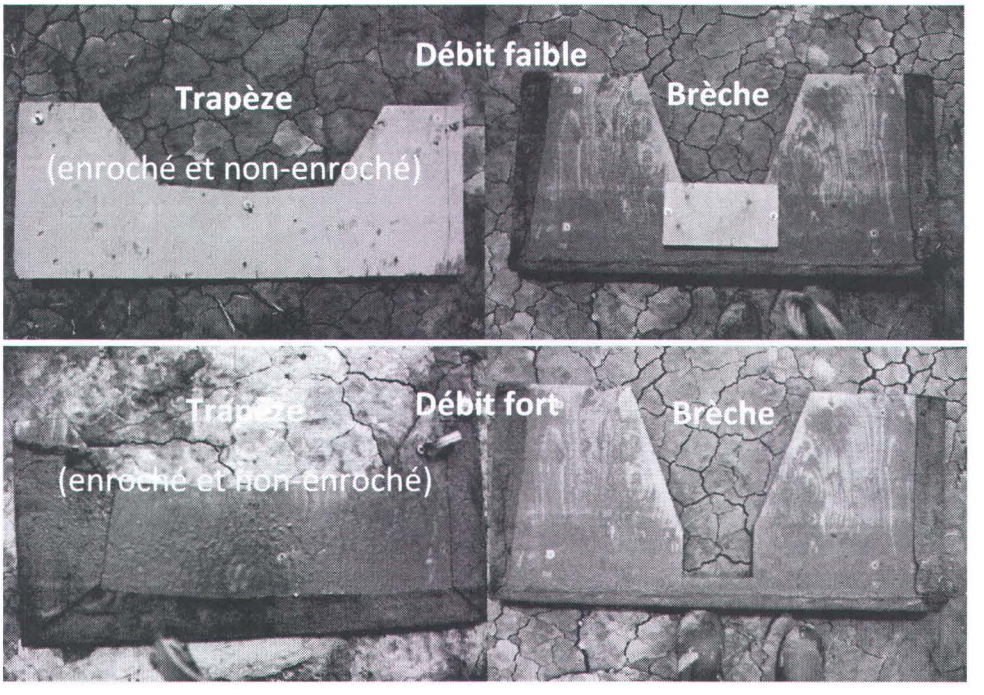


Figure 4.4 Seuils testés a) à débit faible et b) à débit fort.

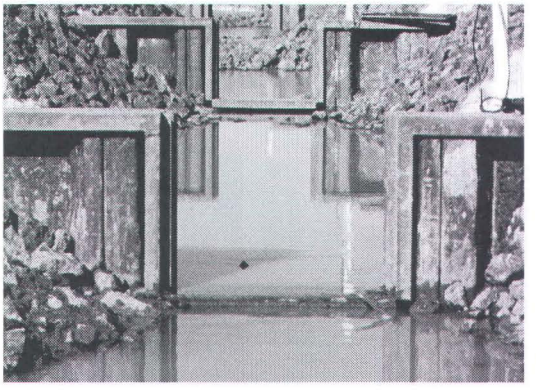
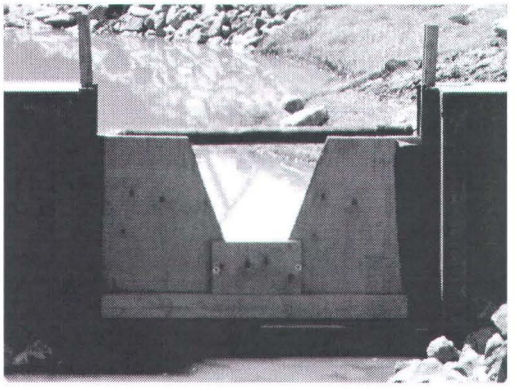
a)  b) 

Figure 4.5 a) Encadré de poutrelle et b) seuil temporaire inséré dans les glissières.

4.3.1 Seuils en trapèze

La dimension des seuils en trapèze différait entre les essais à débit fort et à débit faible. La largeur des seuils a été réduite lors des essais à débit faible afin d'y maintenir une profondeur d'eau suffisante pour le passage des poissons. Les seuils en trapèze avaient une profondeur de 18 cm et une largeur de 55 cm lors des essais à débit faible et une profondeur de 18 cm et une largeur de 75 cm lors des essais à débit fort (Fig. 4.4).

Les seuils en trapèze enrochés avaient les mêmes dimensions que les seuils en trapèze non-enrochés. Cependant, un enrochement (4 m de longueur par 2 m de largeur avec une granulométrie de 5 à 30 cm de diamètre) débutant à la base aval du seuil et montrant une pente longitudinale de 1/10 permettait d'éviter la formation d'un jet plongeant directement en aval du seuil (Fig. 4.6).

a)

b)

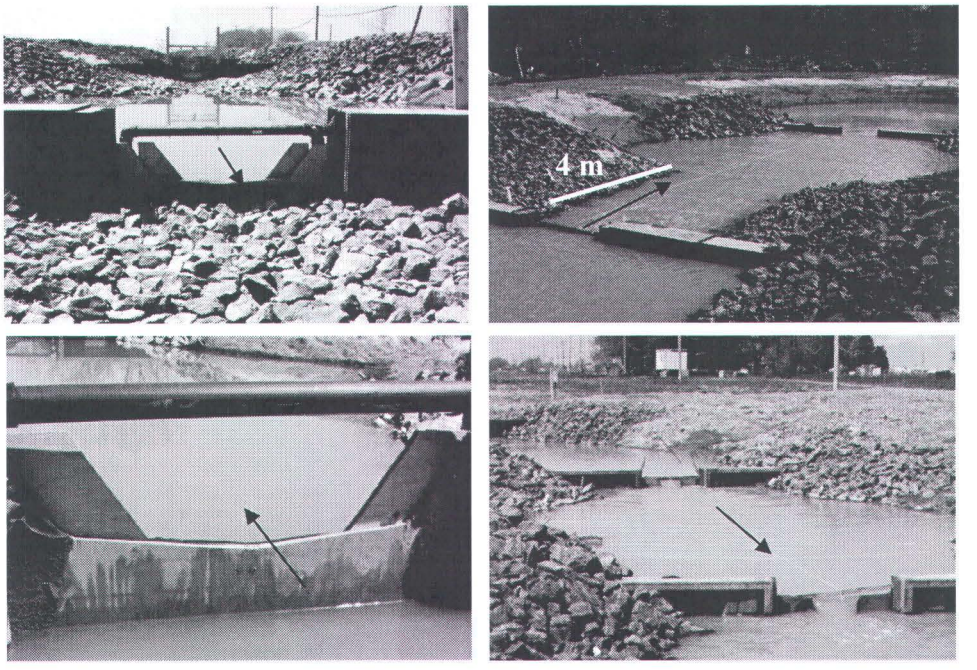


Figure 4.6 a) Seuil en trapèze enroché, vue rapprochée de l'aval et vue globale de l'amont b) Seuil en trapèze non-enroché, vue rapprochée de l'amont (la pompe arrêtée) et vue globale de l'aval. Les flèches indiquent le sens du courant.

4.3.2 Seuils en brèche

La dimension des seuils en brèche différait aussi entre les essais à débit fort et à débit faible. À débit fort, la brèche était plus profonde, de façon à créer une ouverture facilitant possiblement le passage des barbottes brunes, qui sont des nageurs de fond. À débit faible, les seuils en brèche avaient une largeur maximale de 40 cm et une profondeur de 29 cm tandis qu'à débit fort, ils avaient une largeur maximale de 40 cm et une profondeur de 43 cm (Fig.4.4).

4.4 Tronçons à l'étude

Afin de réaliser l'expérimentation, une série de neuf bassins a été divisée en trois tronçons de trois bassins chacun à l'aide de grillages. Dans chacun des tronçons, une forme différente de seuil a été testée : le seuil en trapèze enroché dans le tronçon aval, le

seuil en trapèze non-enroché dans le tronçon du centre et le seuil en brèche dans le tronçon amont (Fig. 4.7).

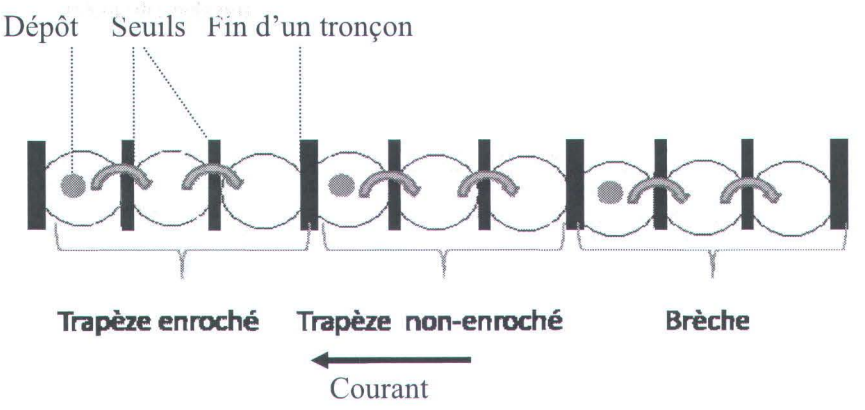


Figure 4.7 Schéma des neuf bassins expérimentaux séparés en trois tronçons. Les poissons étaient déposés à l'extrémité aval de chaque tronçon (représenté par un point), qui comprenait deux seuils d'une forme donnée. Les extrémités de chaque tronçon étaient fermées par un grillage.

4.5 Espèces à l'étude et approvisionnement en poissons

4.5.1 Espèces à l'étude

Deux espèces à fraie hâtive, le grand brochet et la perchaude, et trois espèces à fraie tardive, la barbotte brune, l'achigan à petite bouche et le crapet-soleil ont été choisies pour tester la passe migratoire (Tableau 4.1). Ces poissons fraient tous en marais (à l'exception de l'achigan à petite bouche qui a servi d'espèce témoin représentative de l'achigan à grande bouche) et sont présents dans cette section du fleuve Saint-Laurent (Bernatchez et Giroux, 2000).

Tableau 4.1 Poissons utilisés pour tester la passe migratoire et leur période de fraie (Bernatchez et Giroux, 2000; Massé et al., 1988; Brodeur et al., 2004)

Nom de l'espèce	Période de fraie	Température de l'eau durant la fraie (°C)
Grand Brochet (*Esox lucius*)	Avril à mai	<6
Perchaude (*Perca flavescens*)	Mi-avril à mai	7
Barbotte brune (*Ameiurus nebulosus)*	Mai à juin	21
Achigan à petite bouche (*Micropterus dolomieu*) (indicateur des *centrarchidés* de grande taille)	Mi-mai à mi-juillet	15
Crapet-soleil (*Lepomis gibbosus)*	Juin à août	20

4.5.2 Approvisionnement en poissons

La majorité des poissons utilisés au cours de la campagne de terrain ont été pêchés à l'aide de verveux installés dans le ruisseau de Feu et la rivière des Prairies, près du site à l'étude. Chaque verveux était visité une fois par jour. Puisque le nombre de perchaudes pêchées s'est avéré insuffisant, des individus ont été achetés d'un pêcheur commercial. Ceux-ci représentent 27% du nombre total de perchaudes utilisées lors des expérimentations et leur numéro de transpondeur passif a été noté. Aucun crapet-soleil n'ayant été capturé dans nos pêches, des poissons du lac Saint-François ont été utilisés suite à des pêches à la seine. Les crapets-soleil et les perchaudes qui ne provenaient pas du secteur à l'étude ont subit un transport en camion à l'intérieur de bassins oxygénés. Malgré les précautions qui ont été prises, ces poissons sont arrivés en mauvais état au site d'expérimentation. Une sélection a été effectuée afin de ne garder que les individus en bonne condition. Les poissons capturés ont été mesurés et sexés lorsque possible, avant d'être marqués.

4.6 Suivi des poissons dans la passe

4.6.1 Méthode de suivi

La technologie des transpondeurs passifs de type half-duplex a été utilisée afin d'effectuer le suivi des poissons dans la passe migratoire du ruisseau de Feu. Cette méthode permettant de connaître l'heure précise du passage d'un poisson marqué à une antenne, il devient possible de déterminer les conditions hydrauliques et environnementales qui prévalaient au moment du passage.

4.6.2 Caractéristiques et disposition des antennes de détection

Une antenne de détection formant un cadre rectangulaire a été installée directement sur la partie amont de chaque seuil (fig. 4.8). Au total, six antennes étaient reliées à deux modules d'acquisition de données. Les antennes étaient intérrogées successivement par le module, de façon à ce que chaque antenne soit intérrogée trois fois par seconde. Le champ de détection des antennes a été réglé de façon à obtenir une portée de 5 à 10 cm (sur toute la colonne d'eau du seuil), de part et d'autre de l'aire à l'intérieur du cadre qui entourait complètement le seuil auquel il était fixé. Afin de vérifier l'efficacité du système de détection, des tests ont été effectués plusieurs fois au cours de l'expérimentation, en approchant un transpondeur dans le champ de détection des antennes dans différentes positions. De plus, il a été vérifié que tous les poissons détectés à la deuxième antenne de chaque tronçon avaient d'abord été détectés à la première antenne sauf lors du premier essai où huit des 96 grands brochets utilisés dans l'étude ont réussi à traverser le premier seuil sans avoir été détectés par l'antenne. Ces événements se sont produits au début de la campagne de terrain (19, 20 et 22 avril), alors que le niveau d'eau dans la passe était à son plus haut en raison de la crue printannière qui inondait la partie située immédiatement en aval de la section à l'étude. Plusieurs observations de grands brochets sautant hors de l'eau afin de franchir des seuils ayant été notées, il est probable que ces grands brochets aient réussi à sauter par dessus la cloison, sans passer à l'intérieur du cadre de l'antenne. Aucune anomalie semblable n'a été détectée chez les poissons des autres espèces. Des grillages ont été ajoutés le 23 avril afin qu'il soit impossible pour les poissons de traverser d'un bassin à un autre sans passer à travers

l'antenne de détection. Le nettoyage des grillages a été effectué plusieurs fois par jour, afin d'éviter une obstruction par des débris.

Figure 4.8. Antenne rectangulaire placée en amont du deuxième seuil en trapèze non-enroché permettant de détecter les transpondeurs lors du passage des poissons (vue prise à partir de l'amont, alors que la pompe n'était pas en fonction). La flèche noire indique le sens du courant lorsque la pompe est en fonction.

4.6.3 Marquage

Chaque poisson a été mesuré et sexé (le sexe a pu être déterminé seulement chez les grands brochets et les perchaudes) avant d'être marqué à l'aide d'un transpondeur passif portant un numéro unique. Les transpondeurs utilisés sont de marque Texas Instrument, modèle RI-TRP-RRHP, mesurant 23,1 mm de long par 3,85 mm de diamètre et pesant 0,6g (fig. 4.9a). Les transpondeurs passifs ont été insérés par injection sous-cutanée sous la nageoire dorsale pour les grands brochets, les perchaudes, les barbottes brunes et les achigans à petite bouche. Seuls les grands brochets ont été soumis à une anesthésie au clou de girofle précédant les manipulations. La méthode de marquage a été différente pour les crapets-soleil en raison de la mortalité élevée qu'avait causé le marquage sous-cutané de cette espèce à l'aide de transpondeurs passifs lors du projet de la rivière aux Pins (Brodeur et al. 2007). Chaque crapet-soleil a donc été marqué à l'aide d'un transpondeur passif collé à un hameçon de marque Mustad Ultrapoint de calibre 1/0, ce dernier étant inséré derrière la nageoire dorsale du poisson (fig. 4.9b).

Après le marquage, les poissons ont été déposés dans des viviers pour une période de repos de 24 heures afin de favoriser leur récupération avant le début de l'expérimentation. Chez toutes les espèces autres que le crapet-soleil, l'insertion sous-cutanée des transpondeurs passifs a été bien tolérée et les poissons qui semblaient une bonne condition après la période de repos étaient utilisés pour les essais. Les individus qui semblaient en mauvais état après cette période de récupération ont été relâchés en milieu naturel afin de ne garder que les individus sains. Selon Brodeur et al. (2007), qui ont utilisé la technique de marquage sous-cutanée, le taux de rétention des transpondeur serait évalué à 97%. Dans le cas des crapets-soleil au ruisseau de Feu, une mortalité élevée suite au marquage a été observée et peut être expliquée par l'état précaire dans lequel ces poissons étaient au début de l'expérimentation.

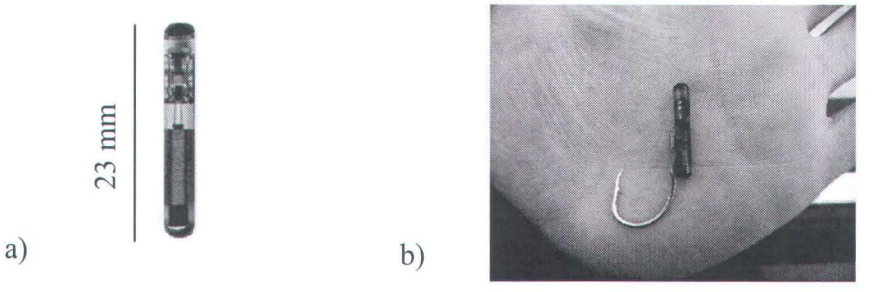


Figure 4.9 a) Transpondeur passif utilisé pour l'expérimentation de la passe du segment marais du ruisseau de Feu et b) transpondeur collé à un hameçon pour le marquage des crapets-soleil

4.7 Déroulement des essais et nombre de poissons marqués

Lors de chaque essai, un groupe de poissons marqués, d'une espèce donnée, a été relâché entre 8h00 et 11h00, dans la partie aval de chaque tronçon (fig. 4.7). Chaque essai se déroulait sur une période de 24 heures, période au cours de laquelle les poissons pouvaient franchir un maximum de deux seuils avant d'arriver à la fin d'un tronçon fermé par un grillage (fig. 4.7). Un même débit était maintenu constant pendant chaque essai. Les essais à débit fort et faibles ont été effectués en alternance, ce qui permettait d'obtenir des conditions de température semblables pour les deux débits testés. Le

tableau 4.2 présente les périodes d'essais pour chaque espèce, ainsi que le nombre d'essais effectués pour chaque débit testé. Un minimum de deux essais par condition de débit ont été effectués pour chaque espèce, excepté à l'intérieur du tronçon avec seuils en trapèze enroché, soit le plus en aval, qu'une inondation printanière importante a rendu inutilisable du 21 au 30 avril. Les poissons ont été répartis de façon à ce que la moyenne des tailles des poissons de chaque espèce soit semblable pour chaque tronçon (tab. 4.3). Comme il était possible de déterminer leur sexe, les mâles et les femelles des grands brochets et les perchaudes ont été répartis également dans les différents tronçons. Plusieurs espèces ont pu être testées simultanément lors d'un même essai (ex : les grands brochets et les perchaudes ont été déposés ensembles dans les différents tronçons).

Tableau 4.2 Période de dépôt (2008) pour chaque espèce, nombre de tests effectués pour chaque débit et étendue du nombre de poissons déposé par tronçon pour chaque test.

Espèce	Date de dépôt En 2008	Essais à débit faible	Essais à débit fort	Nombre de poissons déposés par tronçon pour chaque débit	
				Débit fort	Débit faible
Grand brochet	19 au 28 avril	2 *	3 *	5 - 8	6 - 11
Perchaude	19 au 28 avril	2 *	3 *	3 – 10	5 - 11
Barbotte brune	1er au 11 mai	3	3	10	9 - 10
Achigan à petite bouche	24 avril au 3 mai	2*	2 *	5 - 6	3 - 5
Crapet-soleil	9 au 14 mai	2	2	9 - 12	4 - 13

*Un seul essai a été effectué dans le tronçon des seuils en trapèzes enrochés en raisons d'inondation qui l'on rendu inutilisable du 21 au 30 avril.

Tableau 4.3 Nombre et taille moyenne (± écart-type) des poissons utilisés pour l'expérimentation.

	Nombre d'individus	Ratio male :femelle	Étendue des longueurs (mm)	Longueur moyenne (mm)
Grand brochet	96	59 :37	377 - 882	573 ± 99
Perchaude	77	31 :44 *	177 - 336	286 ± 32
Barbotte brune	179	N/D	228 - 386	299 ± 22
Achigan à petite bouche	49	N/D	318 - 482	417 ± 39
Crapet-soleil	113	N/D	130 - 285	180 ± 21

* Le sexe n'a pu être déterminé chez 2 individus

4.8 Variables hydrauliques et environnementales

La vitesse du courant et la dénivellation interbassin à chaque seuil ont été mesurées au cours de la campagne de terrain, au début et à la fin de chaque essai. La vitesse du courant a été mesurée à l'aide d'un vélocimètre acoustique à effet doppler, modèle SonTek FlowTracker Handheld ADV, à l'intérieur de la fenêtre des seuils. La vitesse a été mesurée à trois points à l'intérieur de chaque fenêtre d'écoulement. Dans les seuils en brèche, la vitesse a été mesurée (1) au centre de la brèche, à environ deux cm sous la surface, (2) à environ dix cm sous la surface et (3) au fond à environ 18 cm sous la surface pour les seuils en trapèze, 29 cm pour les seuils en brèche à débit faible et 43 cm pour les seuils en brèche à débit fort. Dans les seuils en trapèze, la vitesse a été mesurée aux points gauches, centres et droits des seuils à une profondeur correspondant à environ la moitié de la profondeur d'eau. La vitesse utilisée dans les analyses correspondait à la moyenne des trois valeurs mesurées. La dénivellation interbassin a été déterminée en mesurant la différence de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval de chaque seuil.

Deux variables environnementales, la température de l'eau et la turbidité, ont été mesurées afin de vérifier leurs effets potentiels sur le passage des poissons. Une mesure horaire de la température de l'eau a été effectuée à l'aide d'un thermographe, installé à

l'extrémité aval de la section à l'étude. La turbidité a été mesurée à l'aide d'un disque de Secchi, au début et à la fin de chaque essai.

4.9 Traitement des données

4.9.1 Activité journalière

Il a été déterminé si chaque espèce adoptait un comportement diurne ou nocturne en observant le pourcentage de passages qui ont été effectués le jour et la nuit. Il a ensuite été vérifié si le nombre de passages effectués le jour est significativement différent du nombre de passage effectués la nuit par Khi2.

4.9.2 Comparaison du succès de passage en fonction du débit et des types de seuils

La faible portée du champ de détection des antennes (entre 5 et 10 cm de part et d'autre de l'aire à l'intérieur des cadres), la position de l'antenne en amont du seuil et la position du transpondeur sur chaque poisson (à la base de la nageoire dorsale) permettent de considérer chaque détection comme un succès de passage au seuil. Les passages enregistrés par les modules ont été compilés afin de quantifier le succès de passage des poissons de chaque espèce pour chaque type de seuil et chaque débit testé. Par exemple, tous les grands brochets qui ont subi un test à débit fort dans le tronçon avec seuils en brèche ont été séparés en trois groupes : ceux qui ont réussi à traverser deux seuils, un seul seuil et aucun seuil. Ensuite, les succès de passages, exprimés en termes de pourcentage du nombre total de poissons déposés dans un tronçon donné, ont été calculés de deux façons différentes: le succès de passage d'un seuil et le succès de passage de deux seuils. Les succès de passage des différentes espèces ont été comparés entre les deux conditions de débit et entre les formes de seuil à l'aide de tests de Khi2 (α=0,05).

4.9.3 Effet des variables hydrauliques

Afin de vérifier l'effet de la dénivellation interbassin sur le succès de passage des différentes espèces, toutes les dénivellations de chaque type de seuil, à débit fort et à débit faible, observées durant la période d'essais de chacune des espèces, ont été compilées en une seule série, avec le succès de passage qui leur était associé. Une régression linéaire a ensuite été utilisée afin de quantifier la relation entre la dénivellation

interbassin et le succès de passage des poissons d'une espèce donnée. Lorsqu'un dénivelé a été mesuré plusieurs fois au cours des essais d'une même espèce, c'est le succès de passage total des poissons qui l'ont traversé qui a été considéré. Par exemple, une dénivellation interbassin de 0 cm a été observée le 19 et le 20 avril au niveau du premier seuil du tronçon à seuils en trapèze enroché (ce tronçon a ensuite été abandonné pour le reste de la période des essais sur le grand brochet et la perchaude, en raison de l'inondation). Cette période recouvre deux essais sur le grand brochet et le succès de passage de 100% a été calculé sur le total des poissons qui se sont retrouvés en aval de ce dénivelé, soit 19 (11 grands brochets lors de l'essai du 19 avril et 8 lors de l'essai du 20 avril).

La même procédure a été utilisée pour vérifier l'effet de la vitesse du courant sur le succès de passage des différentes espèces. La dénivellation interbassin et la vitesse du courant moyenne ont été comparées entre les types de seuil et les conditions de débit faible à l'aide d'une ANOVA, suivi d'un test de t protégé de Fisher pour les comparaisons multiples.

4.9.4 Température

Les mesures de température journalière moyenne ont été compilées et comparées à la période d'essais de chaque espèce afin de vérifier si elles correspondent aux températures déclenchant la fraie.

4.9.5 Effet de la turbidité

Étant donné que la turbidité est restée relativement stable durant toute la période d'expérimentation (à l'exception du 27 mai où elle avait diminué), il est impossible de vérifier l'effet de la turbidité sur le succès de passage des poissons testés.

Chapitre V : Résultats

5.1 Conditions physiques et environnementales des essais

5.1.1 Dénivellation interbassin

Une inondation a eu lieu du 19 avril au 6 mai dans le tronçon à seuils en trapèze enroché et du 19 au 27 avril dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché. Cette inondation a eu pour effet de diminuer les valeurs de dénivellation interbassin à l'intérieur de ces tronçons. Les données sur la dénivellation interbassin mesurés lors des essais des différentes espèces, à chaque seuil et à chaque essai sont fournies dans l'annexe 2.

Comparaison des dénivellations interbassin entre les deux conditions de débit par tronçon

La distribution des fréquences de dénivellation interbassin durant toute la période d'étude a été calculée pour chaque tronçon (fig. 5.1). Le tronçon le plus en aval, où étaient testés les seuils en trapèze enroché, montre une distribution de dénivellations interbassin très étendue allant de 0 cm en début d'expérience, alors que les seuils étaient inondés, à 16,5 cm vers la fin de l'expérience, alors que le niveau d'eau de la rivière des Prairies était plus bas. Pour l'ensemble de la période d'étude, la dénivellation interbassin moyenne sur ce tronçon a été de 7,2 ± 7,0 cm (n=44). L'inondation des tronçons due à la variation du niveau d'eau de la rivière des Prairies et du ruisseau de Feu engendre un biais dans la comparaison des dénivellations interbassins entre les trois tronçons. Si l'on retire les données mesurées lorsque la rivière des Prairies avait une influence sur l'écoulement (soit les données mesurées avant le 6 mai), la dénivellation interbassin a varié, à débit faible, de 12,5 cm à 16,5 cm, avec une moyenne de 15,4 ± 1,3 cm (n=8) et à débit fort, de 15,7 cm à 16,1 cm, avec une moyenne de 15,9 ± 1,2 cm (n=8). Lors de cette période, la dénivellation interbassin moyenne, tous débits confondus, était de 15,6 ± 0,9 cm (n=16). La comparaison par ANOVA entre les dénivellations interbassin des deux conditions de débit n'a montré aucune différence significative (p=0,35; n=16).

Le tronçon du milieu, où étaient testés les seuils en trapèze non-enroché, présente une distribution de dénivellation interbassin beaucoup plus étroite. L'étendue des valeurs

varie entre 5,0 et 16,8 cm pour une moyenne de 11,7 ± 3,3 cm (n=48). Le tronçon avec les seuils en trapèzes non-enrochés étant plus en amont, l'inondation s'y est retiré plus tôt, soit dès le 27 avril. Les dénivellations interbassin mesurées à partir de cette période ont varié, à débit faible, de 9,1 cm à 16,8 cm avec une moyenne de 13,0 ± 3,4 cm (n=16) et à débit fort, de 10,0 cm à 16,5 cm avec une moyenne de 13,2 ± 2,9 cm (n=16). Lors de cette période, la dénivellation interbassin moyenne, tous débits confondus, était de 13,1 ± 3,1 cm (n=32). La comparaison par ANOVA entre les dénivellations interbassin des deux conditions de débit n'a montré aucune différence significative (p=0,87; n=32).

Le tronçon amont, où les seuils en brèche ont été testés, présente la distribution de dénivellation interbassin la plus étroite des trois. Allant de 11,5 à 16,5 cm pour une moyenne de 14,1 ± 1,5 cm (n=24). Durant la période d'étude, la rivière des Prairies n'a pas eu d'influence sur l'écoulement à l'intérieur de ce tronçon. Lors des essais à débit faible, la dénivellation interbassin moyenne de ce tronçon a été de 14,1 ± 1,7 cm (n=24) et lors des essais à débit fort, elle a été de 14,1 ± 1,3 cm (n=48). La comparaison par ANOVA entre les dénivellations interbassin des deux conditions de débit n'a montré aucune différence significative (p=0,99; n=48).

Comparaison des dénivellations interbassin entre les différents tronçons

Les dénivellations interbassin mesurées après avoir retiré les données pour lesquelles la rivière des Prairies avait une influence sur l'écoulement ont été comparées entre les trois tronçons à l'aide d'une ANOVA, qui n'a révélé aucune différence significative (p=0,3; n=96).

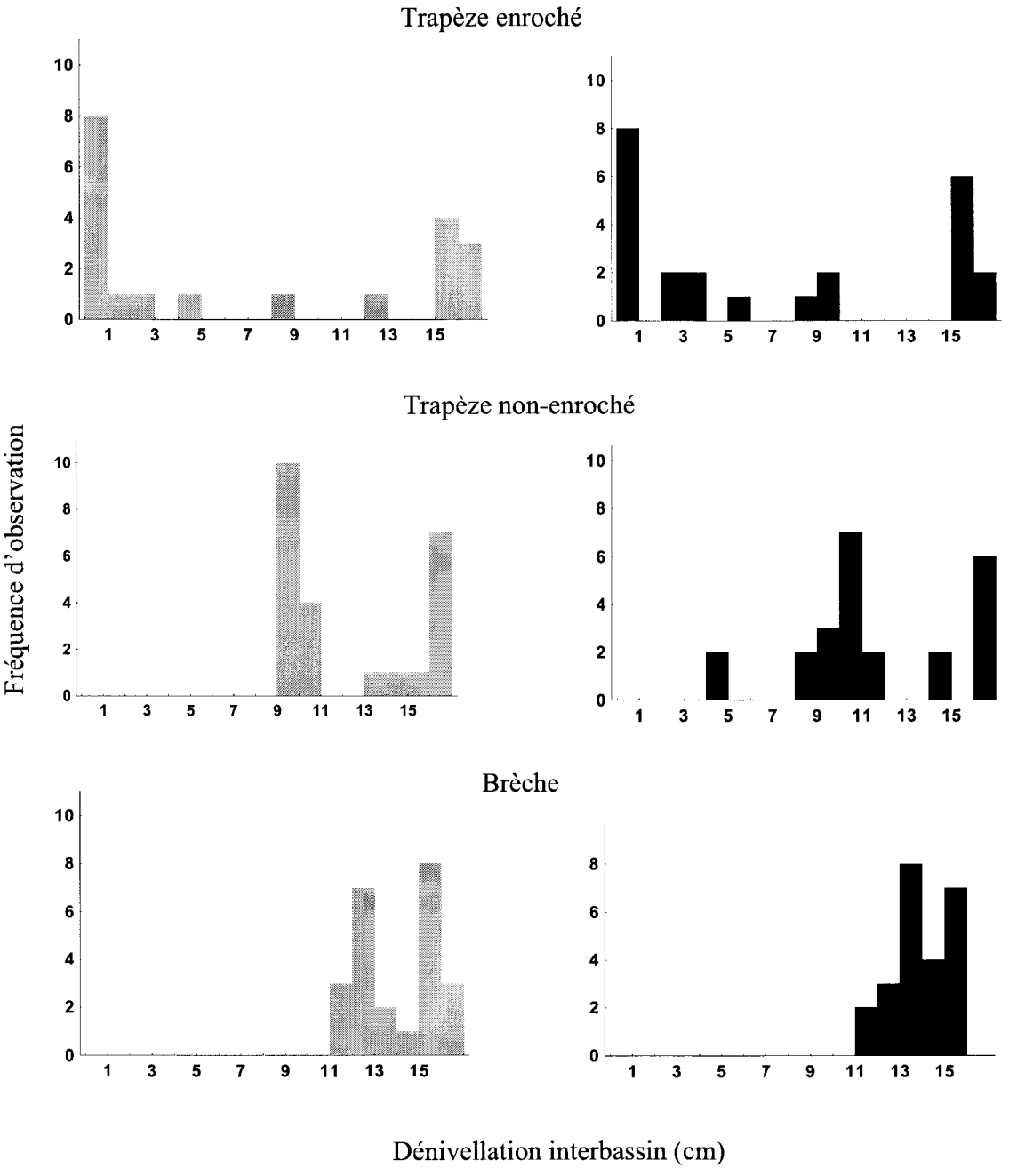


Figure 5.1 Distributions des fréquences d'observation des dénivellations interbassin aux seuils de chaque tronçon, à débit faible (en gris) et à débit fort (en noir).

5.1.2 Vitesse du courant

Comme pour les dénivellations interbassin, l'étendue des distributions de vitesse du courant a varié en fonction du tronçon (fig. 5.2). Au tronçon le plus en aval, où les seuils en trapèze enroché étaient testés, la vitesse du courant s'étendait, à débit faible, de 0,19 ms^{-1} à 0,47 ms^{-1}, avec une moyenne de 0,38 ± 0,07 ms^{-1} (n=16) et à débit fort, de 0,15 ms^{-1} à 0,58 ms^{-1}, avec une moyenne de 0,45 ± 0,11 ms^{-1}(n=20). Comme pour les dénivellations interbassin, ce tronçon a été influencé par la fluctuation du niveau d'eau de la rivière des Prairies et du ruisseau de Feu qui a modifié la vitesse du courant aux seuils. Si l'on retire les données pour lesquelles la rivière des Prairies avait une influence sur l'écoulement, la vitesse du courant a varié, à débit faible, de 0,36 ms^{-1} à 0,47 ms^{-1}, avec une moyenne de 0,40 ± 0,03 ms^{-1} (n=12) et à débit fort, de 0,49 ms^{-1} à 0,54 ms^{-1}avec une moyenne de 0,51 ± 0,02 ms^{-1}(n=12). La comparaison par ANOVA a montré que la moyenne des vitesses du courant mesurées à débit fort était significativement plus élevée qu'à débit faible ($p< 0,01$; n=24).

Au tronçon du centre où ont été testés les seuils en trapèze non-enroché, l'étendue des vitesses du courant est plus étroite. À débit faible, les vitesses de courant s'étendaient de 0,28 ms^{-1} à 0,55 ms^{-1} avec une moyenne de 0,38 ± 0,08 ms^{-1} (n=20) et à débit fort, elles s'étendaient de 0,32 ms^{-1} à 0,52 ms^{-1}, avec une moyenne de 0,41 ± 0,07 ms^{-1} (n=24). Si l'on retire les données mesurées lors de la période d'inondation, la vitesse du courant a varié, à débit faible, de 0,28 ms^{-1} à 0,46 ms^{-1}, avec une moyenne de 0,35 ± 0,07 ms^{-1} (n=16) et à débit fort, de 0,35 ms^{-1} à 0,52 ms^{-1}, avec une moyenne de 0,42 ± 0,07 ms^{-1} (n=20). La comparaison par ANOVA a montré que la moyenne des vitesses du courant mesurées à débit fort sont significativement plus élevées qu'à débit faible ($p<0,01$;n=36).

Le tronçon le plus en amont où les seuils en brèche étaient testés, n'a pas été influencé par le niveau d'eau de la rivière des Prairies et montre l'étendue de distribution la plus étroite. À débit faible, la vitesse du courant s'étendait de 0,32 ms^{-1} à 0,47 ms^{-1} avec une moyenne de 0,40 ± 0,03 ms^{-1} (n=20) et à débit fort, elle variait de 0,44 ms^{-1} à 0,68 ms^{-1} avec une moyenne de 0,54 ± 0,09 ms^{-1}(n=24). La comparaison par ANOVA a montré que

la moyenne des vitesses du courant mesurées à débit fort sont significativement plus élevées qu'à débit faible ($p<0,01^{-7}$; n=44).

Les vitesses du courant ont été comparées entre les tronçons par ANOVA, après avoir retiré les données mesurées lors de la période d'inondation. À débit faible, le résultat du test statistique a révélé des différences significatives entre les vitesses du courant mesurées dans les trois tronçons ($p<0,01$; n=48). Un test-de t protégé de Fisher a ensuite démontré que la moyenne des vitesses mesurées dans le tronçon avec seuils en trapèze enroché était significativement plus élevée que celle du tronçon avec seuils en trapèze non-enroché ($p<0,05$; n=28) et que la moyenne des vitesses du courant du tronçon avec seuils en brèche était significativement plus élevée que celle du tronçon avec seuils en trapèze non-enroché ($p<0,05$; n=36). Aucune différence significative n'a été observée entre les vitesses de courants mesurées dans le tronçon avec seuils en brèche et le tronçon avec seuils en trapèze enroché ($p=0,3$; n=32). À débit fort, la comparaison entre les vitesses du courant des trois tronçons par ANOVA a révélé qu'il existe des différences significatives entre les vitesses du courant des différents tronçons ($p<0,01$; n=56). Un test-t protégé de Fisher a ensuite démontré que la moyenne des vitesses du courant mesurées à débit fort dans le tronçon avec seuils en brèche est significativement plus élevée que celles des tronçons avec seuils en trapèze enroché et non-enroché ($p<0,05$; n=36). Aucune différence significative n'a été observée entre les vitesses mesurées dans le tronçon avec seuils en trapèze enrochés et dans le tronçon avec seuils en trapèze non-enroché ($p>0,05$; n=32) et entre les vitesses mesurées dans le tronçon avec seuils en trapèze non-enrochés et dans le tronçon avec seuils en brèche ($p>0,05$; n=44).

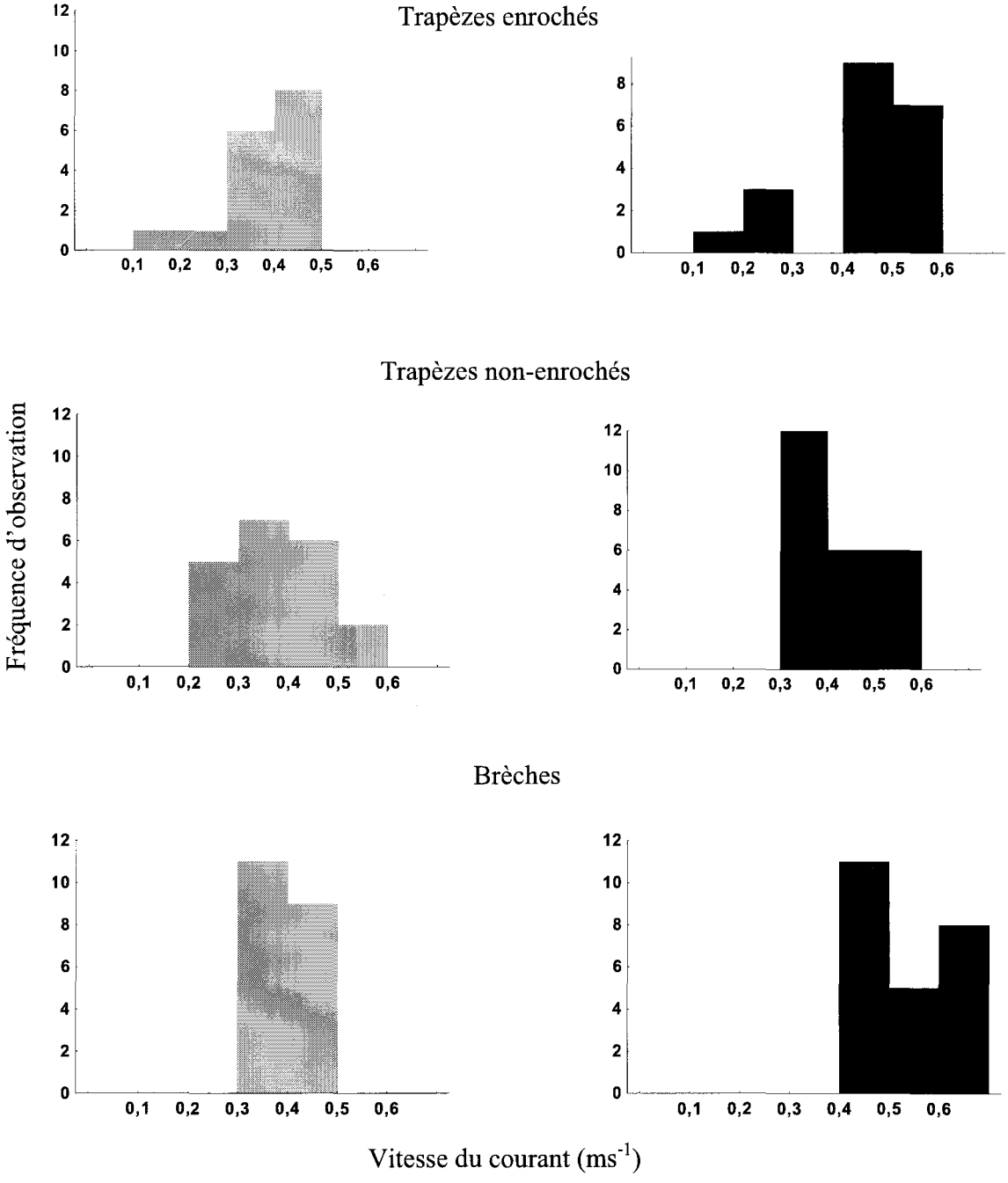


Figure 5.2 Distributions des fréquences d'observation des vitesses du courant aux seuils de chaque tronçon, à débit faible (en gris) et à débit fort (en noir).

5.1.3 Température

L'analyse des températures horaires de l'eau en aval des tronçons à l'étude de la passe montre que la température moyenne journalière a augmenté graduellement tout au long de la campagne de terrain (fig. 5.3). La moyenne journalière la plus faible mesurée lors des essais est de 8,6 ± 1,4 °C et a été enregistrée le 19 avril. La température moyenne journalière la plus élevée mesurée lors des essais est de 17,4 ± 3,7 °C et a été enregistrée le 13 mai.

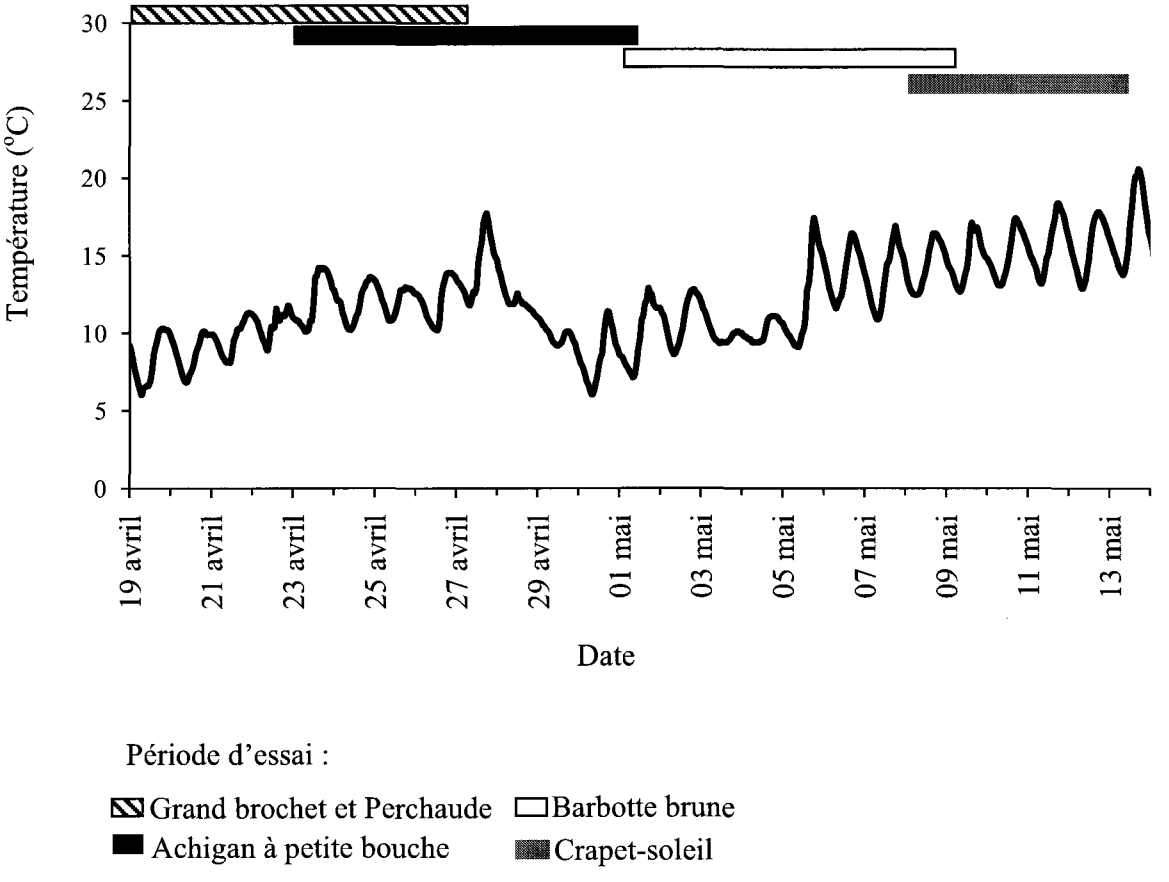


Figure 5.3 Température horaire de l'eau, mesurée en aval des tronçons à l'étude de la passe du segment marais du ruisseau de Feu au printemps 2008. Les périodes d'essai de chaque espèce sont également représentées.

5.1.4 Turbidité

L'eau pompée dans la passe était chargée de solides en suspension, ce qui la rendait très turbide. Cette turbidité est demeurée stable durant toute la campagne de terrain. La mesure de la transparence de l'eau indiquait une profondeur de 6 à 11 cm, à l'exception du 7 mai (29 cm). Cette anomalie est survenue suite à un arrêt de trois jours de la pompe. Par la suite, l'eau a retrouvé les mêmes valeurs de turbidité (fig.5.4). Toutes les espèces testées ont été exposées à des conditions de turbidité semblables, et ce dans l'ensemble des tronçons.

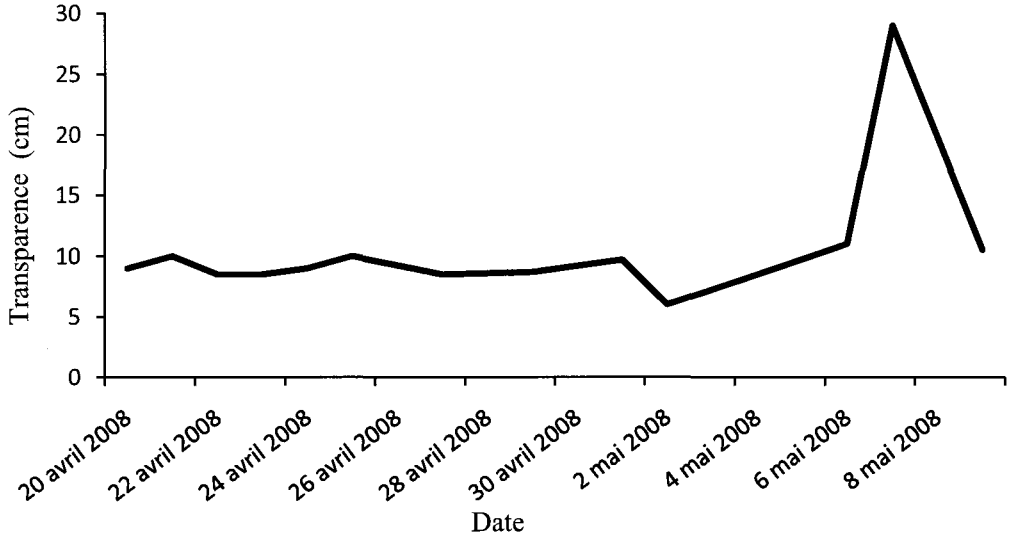


Figure 5.4 Variation de la turbidité au cours de l'expérience, mesurée par un disque de Secchi.

5.2 Succès de passage par espèce

5.2.1 Grand brochet

Les grands brochets ont été testés du 19 au 28 avril. Il est à noter qu'au court de cette période, le tronçon à seuils en trapèze enroché et le tronçon à seuils en trapèze non-enrochés étaient sous l'influence des inondations.

Activité journalière

Les grands brochets ont montré significativement un patron de mouvements journaliers diurne avec 92% des passages aux seuils ayant été effectués durant la journée (Chi^2=161,62; p<0,01; n=114).

Comparaison des succès de passage entre deux conditions de débit

La comparaison du succès de montaison du grand brochet entre les débits testés montre que les succès de passage étaient significativement plus élevés pour les essais à débit faible que pour les essais à débit fort dans les tronçons à seuils en trapèze non-enroché (Chi^2=7,12; p=0,008; n=38) et en brèche (Chi^2= 8,76; p=0,003; n=39) (Fig. 5.5). Dans le cas des trapèzes enrochés, le succès de passage est de 100% pour les deux débits (un faible effectif de grand brochet a cependant été utilisé dans le tronçon à seuils en trapèze enroché) et dans le cas des brèches et des trapèzes non-enrochés, le succès de passage est près de 100% à débit faible et varie de 40% à 50% à débit fort.

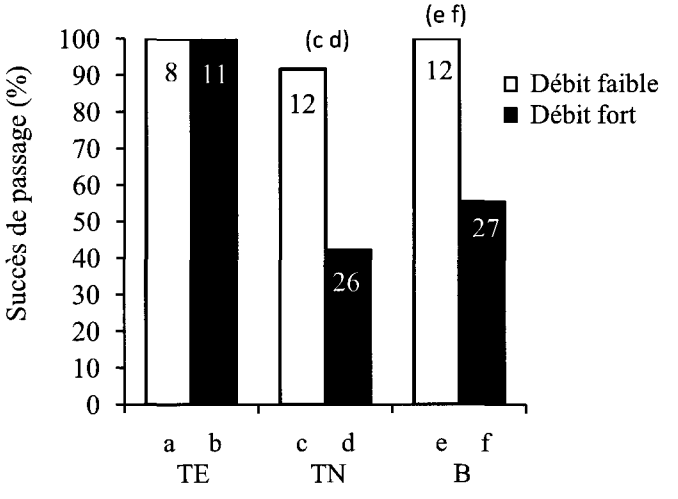


Figure 5.5 Succès de passage moyen d'un seuil des grands brochets entre les essais à débit fort et à débit faible, aux seuils en trapèze enroché (TE), en trapèze non-enroché (TN) et en brèches (B). Le nombre de poissons total utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les deux débits, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Comparaison des succès de passage entre les trois types de seuil

À faible débit, le succès de passage de deux seuils était significativement moins élevé dans le tronçon des seuils en brèche que dans le tronçon à seuils en trapèze enroché (Chi^2=7,5; p=0,01; n_{TE}=8; n_{TB}=12) et que dans le tronçon avec seuils en trapèzes non-enroché (Chi^2=6,00; p=0,01; n_{TN}=12; n_{TB}=12) (fig. 5.6 a). On remarque aussi qu'à débit faible, les succès de passage de un ou de deux seuils dans les tronçons à seuils en trapèze enroché et non-enroché étaient toujours d'au moins 75% (fig. 5.6 a). À débit fort, le succès de passage d'un seuil dans les seuils en trapèze enroché était significativement plus élevé que dans les seuils en trapèzes non-enrochés (Chi^2=9,53; p<0,01; n_{TE}=11; n_{TN}=16) et dans les seuils en brèche (Chi^2=7,15; p=0,01; n_{TE}=11; n_{TB}=27) (fig. 5.6 b). Toujours à débit fort, le succès de passage de deux seuils dans le tronçon des seuils en trapèze enroché était significativement plus élevé que celui des seuils en trapèze non-enroché (Chi^2=9,53; p<0,01; n_{TE}=11; n_{TN}=26) et celui des seuils en brèche (Chi^2=7,15; p=0,01; n_{TE}=11; n_{TB} =27) (fig. 5.6 b).

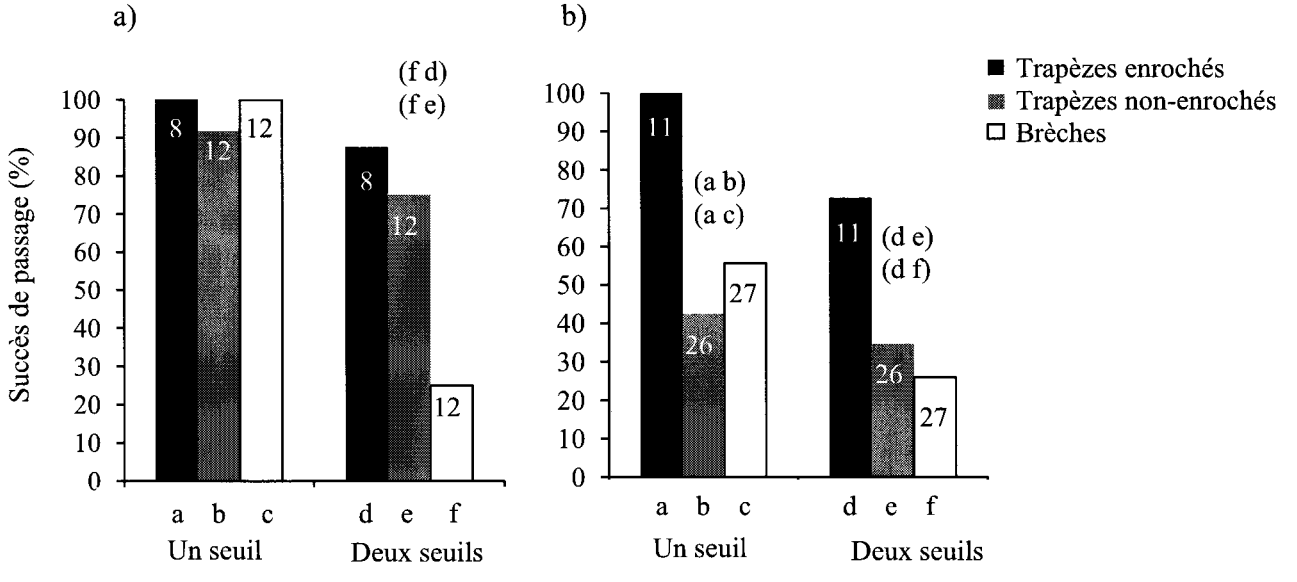


Figure 5.6 Succès de passage moyen des grands brochets d'un seuil et de deux seuils de différentes formes a) à débit faible et b) à débit fort. Le nombre total de poissons utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les types de seuil, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Influence de la dénivellation interbassin sur le succès de passage

Les essais sur le grand brochet ont eu lieu du 19 au 28 avril. Durant cette période, les tronçons à seuils en trapèze enroché et non-enrochés étaient sous l'influence d'une inondation. Lors des essais à débit faible, la dénivellation interbassin a varié de 0,0 à 2,5 cm dans le tronçon à seuils en trapèze enroché, de 9,2 à 15 cm dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché et de 11,5 à 16,5 cm dans le tronçon à seuils en brèche. À débit fort, la dénivellation interbassin a varié de 0,0 à 4,0 cm dans le tronçon à seuils en trapèze enroché, de 5,0 à 15,0 cm dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché et de 13,0 à 16,0 cm dans le tronçon à seuils en brèche (annexe 2a).

Durant leur période d'essais, les grands brochets ont dû franchir des dénivellations interbassin variant de 0 à 16,5 cm. Les dénivellations inférieures à 5 cm ont toutes été observées dans le tronçon avec seuil à trapèze enroché, soit le plus en aval. L'analyse statistique n'a pas révélé de relation significative entre la dénivellation interbassin et le taux de passage des grands brochets (r^2= 0,15; p=0,09; n=20) (fig. 5.7). Cependant, aucun grand brochet n'a réussi à franchir un dénivelé de 16 cm et plus, ce qui a été observée à trois reprises lors des essais dans le tronçon avec seuils en brèche. Le succès de passage demeure dans la grande majorité des cas supérieure à 50%.

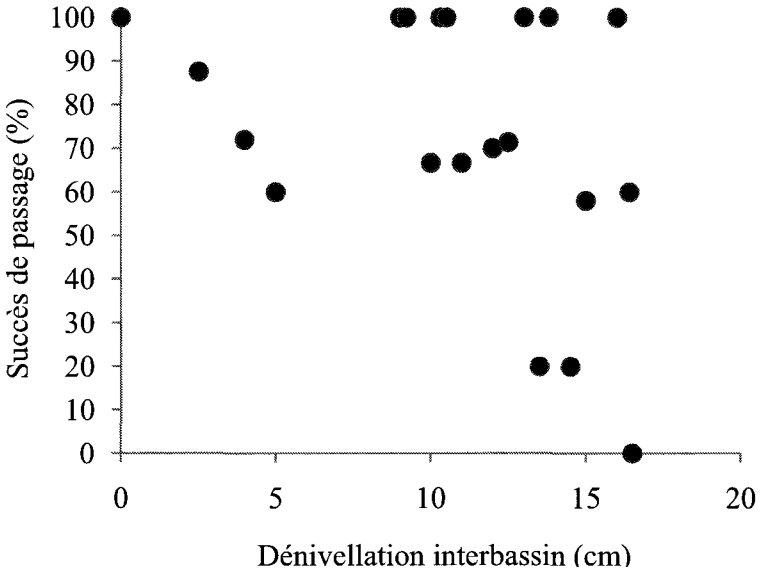


Figure 5.7 Succès de passage des grands brochets en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus.

Influence de la vitesse du courant aux seuils sur le succès de passage

Durant leur période d'essais, les grands brochets ont dû franchir des vitesses du courant aux seuils variant de 0,39 à 0,68 ms^{-1}. Aucune relation significative entre la vitesse du courant aux seuils et le succès de passage n'a été observée (r^2=0,12; p=0,40; n=8) (fig. 5.8). Des succès de passage inférieur à 50% ont été observés à deux reprises soit pour les valeurs de vitesse du courant de 0,52 (20%) et 0,66 ms^{-1} (20%) mais un succès de passage de 100% a été observé à une vitesse du courant de 0,68 ms^{-1}. Le nombre d'observations est plus faible que pour l'évaluation du succès de passage en fonction de la dénivellation interbassin car les vitesses du courant ont été mesurées seulement à partir du 23 avril.

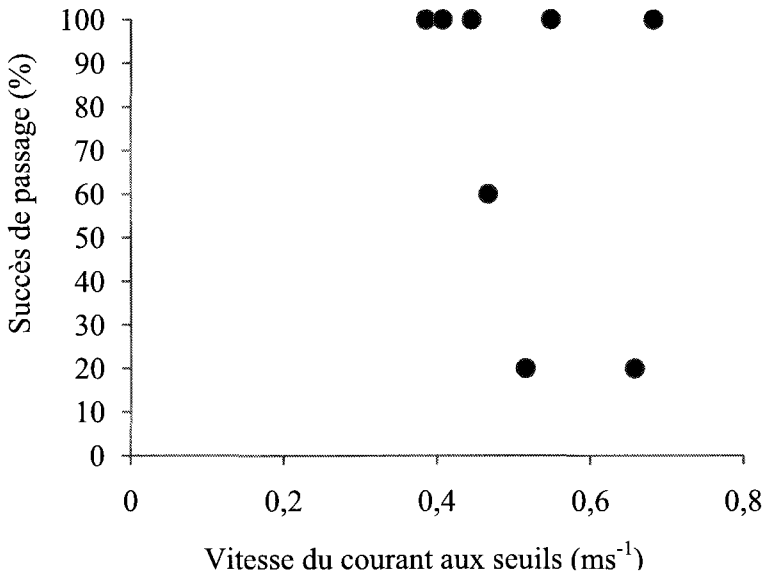


Figure 5.8 Succès de passage des grands brochets en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus.

5.2.2 Perchaude

Les perchaudes ont été testées du 19 au 28 avril. Il est à noter qu'au court de cette période, le tronçon à seuils en trapèze enroché et le tronçon à seuils en trapèze non-enrochés étaient sous l'influence des inondations.

Activité journalière

Les perchaudes ont montré un patron de mouvement journalier significativement diurne avec 81% des passages aux seuils ayant été effectués durant la journée (Chi=21,43; $p<0,01$; n=27).

Comparaison des succès de passage entre deux conditions de débit

La comparaison des succès de passage entre les deux conditions de débits a démontré que le succès de passage à débit faible était significativement plus élevé qu'à débit fort dans le tronçon des seuils en forme de brèche ($Chi^2=9,66$; $p<0,01$; n=36) (fig. 5.9). Aucune différence significative entre les succès de passage à débit fort et à débit faible n'a été observée pour les deux autres formes de seuils ($Chi^2\leq1,3$; $p>0,25$; $n_{TE}=8$; $n_{TN}=33$),

cependant, un faible effectif de perchaudes a été utilisé dans le tronçon avec seuils en trapèze enroché (fig. 5.9).

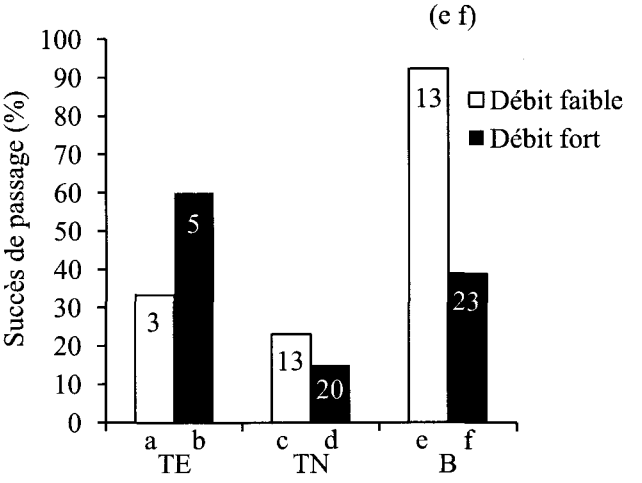


Figure 5.9 Succès de passage moyen d'un seuil des perchaudes entre les essais à débit fort et à débit faible, aux seuils en trapèze enroché (TE), en trapèze non-enroché (TN) et en brèche (B). Le nombre de poissons total utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les deux débits, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Comparaison des succès de passage entre trois types de seuil

À débit faible, le succès de passage d'un seuil était significativement plus élevé dans les seuils en brèche, avec un taux de 92%, que dans les seuils en trapèze enroché (Chi^2=5,56; p=0,02; n_{TE}=3; n_{TB}=13) et dans les seuils à trapèze non-enroché (Chi^2=12,76; p<0,01; n_{TN}=13; n_{TB}=13) (fig. 5.10a). Aucune différence significative n'a été à notée entre les différents tronçons pour le passage de deux seuils ($Chi^2 \leq 3,61$; $p \geq 0,06$; n_{TE}=3; n_{TN}=13; n_{TB}=13) (fig. 5.10a). Une seule perchaude a réussi à franchir deux seuils, soit dans le tronçon des seuils en trapèze enroché. À débit fort, le succès de passage d'un seuil était significativement plus élevé pour les seuils en trapèze enroché, que pour les seuils en trapèze non-enroché (Chi^2=6,25; p=0,01; n_{TE}=5; n_{TN}=20) et pour les seuils en brèche (Chi^2=4,77; p=0,03; n_{TE}=5; n_{TB}=23) (fig. 5.10 b). À ce même débit, aucune différence significative dans le succès de passage de deux seuils n'a été observée entre les différents

tronçons et peu de poissons ont réussi à franchir le deuxième seuil ($Chi^2 \leq 0,89$; $p \geq 0,35$; $n_{TE}=5$; $n_{TN}=20$; $n_{TB}=23$) (fig. 5.10b).

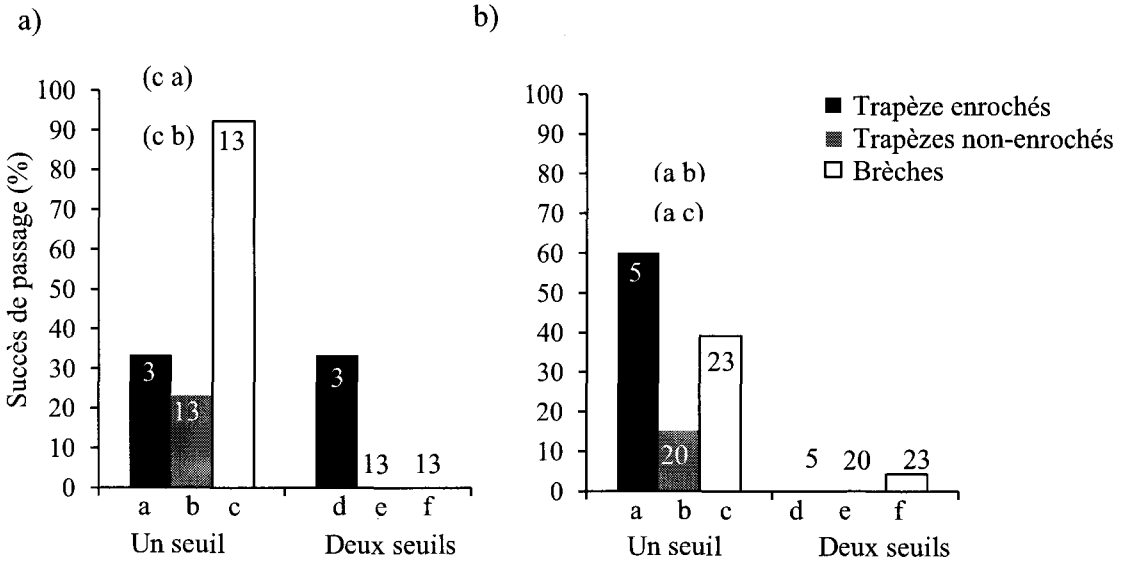


Figure 5.10 Succès de passage moyen des perchaudes d'un seuil et de deux seuils de différentes formes a) à débit faible et b) à débit fort. Le nombre total de poissons utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les types de seuil, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Influence de la dénivellation interbassin sur le succès de passage

Les essais sur la perchaude ont été réalisés simultanément avec celles du grand brochet. Les dénivellations interbassins mesurées sont donc les même que pour le grand brochet (annexe 2a).

Durant leur période d'essais, les perchaudes ont dû franchir des dénivellations interbassin variant de 0 à 16,5 cm. Les dénivellations inférieures à 5 cm ont toutes été observées dans le tronçon avec seuil à trapèze enroché, soit le plus en aval. Les résultats de l'analyse statistique ne révèlent aucune relation significative entre la dénivellation interbassin et le succès de passage des perchaudes (r^2 =0,05 ; p=0,34; n=20) (fig. 5.11). Il est intéressant

de noter qu'aucune perchaude n'ait réussi à franchir le deuxième seuil dans le tronçon des seuils en brèche, alors que 92% des perchaudes avaient réussi à franchir le premier seuil. Lors de ces essais, la dénivellation du premier seuil variait de 13,0 à 13,8 cm, alors que celle du deuxième seuil variait de 16,4 à 16,5 cm.

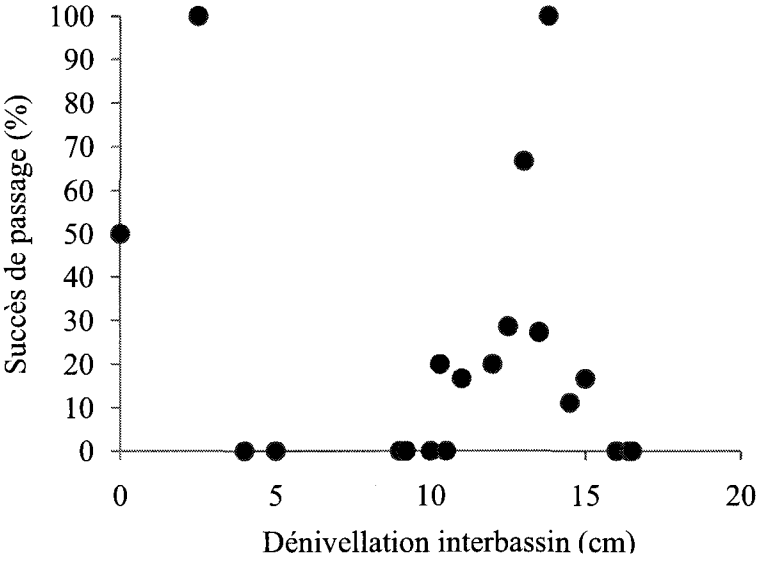


Figure 5.11 Succès de passage des perchaudes en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus.

Influence de la vitesse du courant aux seuils sur le succès de passage

Durant toute leur période d'essais, les perchaudes ont dû franchir des vitesses du courant aux seuils variant de 0,39 à 0,68 ms^{-1}. L'analyse statistique n'a révélé aucune relation significative entre la vitesse du courant aux seuils et le succès de passage des perchaudes (r^2=0,08; p=0,06; n=8) (fig. 5.12).

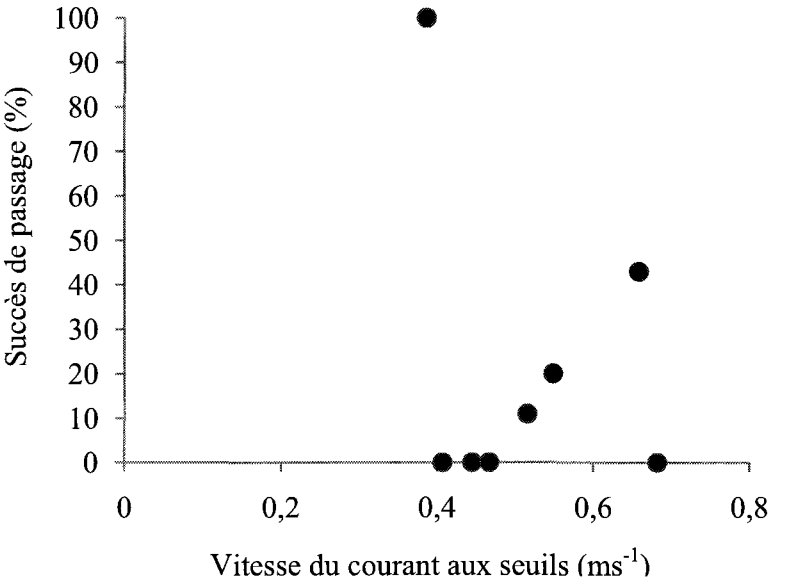


Figure 5.12 Succès de passage des perchaudes en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus.

5.2.3 Barbotte brune

Les barbottes brunes ont été testés du 1er au 11 mai. Il est à noter qu'au court de cette période, le tronçon à seuils en trapèze non-enrochés était sous l'influence des inondations seulement lors du premier essai à débit faible (du 1er au 2 mai) et lors du premier essai à débit fort (du 2 au 3 mai).

Activité journalière

Les barbottes brunes ont montré un patron de mouvement journalier significativement nocturne car 63% des passages aux seuils ont été effectués durant la nuit (Chi^2=25,52; $p<0,01$; n=132).

Comparaison des succès de passage entre deux conditions de débit

La comparaison des succès de passage d'un seuil à débit faible et à débit fort, pour chacune des formes de seuils, a montré un succès significativement plus élevé à débit faible qu'à débit fort dans le tronçon des seuils en trapèze enroché (Chi^2=17,44; $p<0,01$;

n=59) (fig. 5.13). Il n'y avait pas de différence entre les deux conditions de débit pour les deux autres types de seuils ($Chi^2 \leq 0,74$; $p>0,40$; $n_{TN}=30$; $n_{TB}=30$).

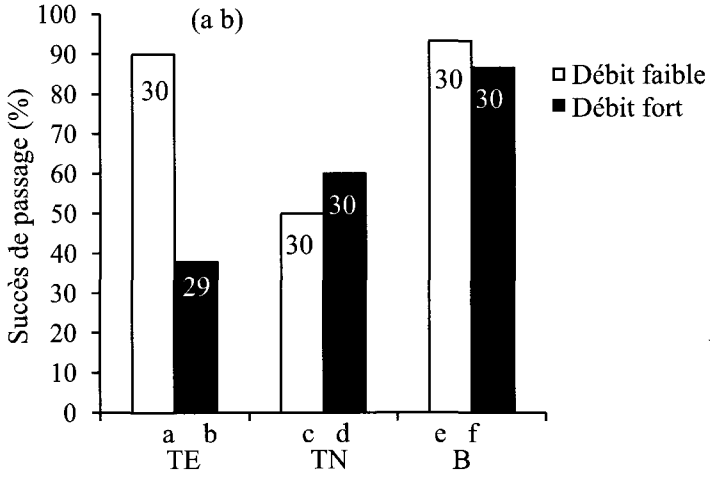


Figure 5.13 Succès de passage moyen d'un seuil des barbottes brunes entre les essais à débit fort et à débit faible, aux seuils en trapèze enroché (TE), en trapèze non-enroché (TN) et en brèche (B). Le nombre de poissons total utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les deux débits, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Comparaison des succès de passage entre trois types de seuil

À débit faible, les succès de passage étaient significativement plus élevés dans le tronçon des seuils en trapèze enroché que dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché pour le passage d'un seuil ($Chi^2=11,43$; $p<0,01$; $n_{TE}=29$; $n_{TN}=30$) et le passage de deux seuils ($Chi^2=17,14$; $p<0,01$; $n_{TE}=29$; $n_{TN}=30$). Le succès de passage était significativement plus élevé dans le tronçon à seuils en brèche que dans le tronçon à seuil en trapèze non-enroché pour le passage de un seuil ($Chi^2=13,87$; $p<0,01$; $n_{TN}=30$; $n_{TB}=30$) et de deux seuils ($Chi^2=6,79$; $p=0,01$; $n_{TN}=30$; $n_{TB}=30$) (fig. 5.14a). À débit fort, le succès de passage dans le tronçon des seuils en brèche est significativement plus élevé que dans le tronçon à seuil en trapèze enroché pour le passage d'un seuil ($Chi^2=15,86$; $p<0,01$; $n_{TE}=30$; $n_{TB}=30$) et pour de deux seuils ($Chi^2=13,70$; $p<0,021$; $n_{TE}=30$; $n_{TB}=30$). À cette même condition de débit, le succès de passage dans le tronçon des seuils en brèche était significativement plus élevé que dans le tronçon à seuil en trapèze non-enroché pour le passage d'un seuil ($Chi^2=5,45$; $p<0,01$; $n_{TN}=30$; $n_{TB}=30$) et de deux seuils ($Chi^2=11,28$; $p<0,01$; $n_{TN}=30$; $n_{TB}=30$) (fig. 5.14b).

Si l'on retire les données prises lors de la période d'inondation à l'intérieur du tronçon avec seuils en trapèze enrochés, on obtient un succès de passage de un seuil de 85% (n=20) à débit faible et un succès de passage de 45% (n=20) à débit fort et un passage de deux seuils de 85% à débit faible (n=20) et de 30% à débit fort (n=20). À débit faible, lorsque l'on compare ces valeurs avec celles du tronçon à seuils en trapèze non-enroché, on observe une différence significative entre les succès de passage de un seuil (Chi^2=6,38; p=0,01; n_{TE}=20; n_{TN}=30) et de deux seuils (Chi^2=16,33; p<0,01; n_{TE}=20; n_{TN}=30). À ce même débit, aucune différence significative n'a été observée avec les succès de passage du tronçon à seuils en brèche ($Chi^2 \leq 3,60$; $p \geq 0,06$; n_{TE}=20; n_{TB}=30). À débit fort, lorsque l'on compare ces valeurs avec celles du tronçon à seuils en brèche, on observe une différence significative entre les succès de passage de un seuil (Chi^2=9,92; p<0,01; n_{TE}=20; n_{TB}=30) et de deux seuils (Chi^2=10,73; p<0,01; n_{TE}=20; n_{TB}=30). À ce même débit, aucune différence significative n'a été observée avec les succès de passage du tronçon à seuils en brèche ($Chi^2 \leq 1,10$; $p \geq 0,30$; n_{TE}=20; n_{TB}=30).

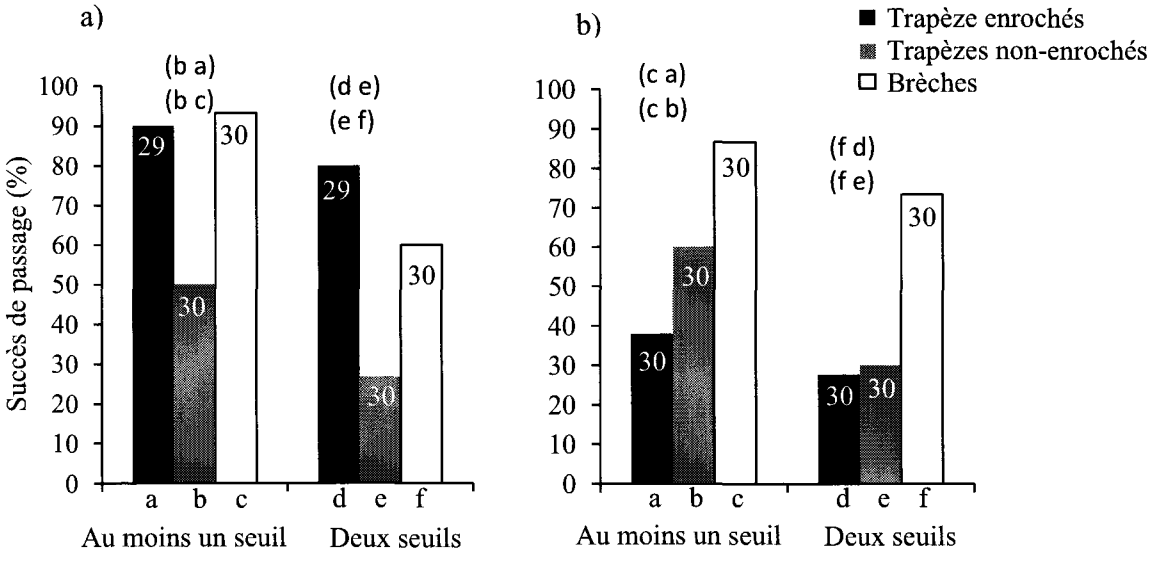


Figure 5.14 Succès de passage moyen des barbottes brunes d'un seuil et de deux seuils de différentes formes a) à débit faible et b) à débit fort. Le nombre total de poissons utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les types de seuil, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Influence de la dénivellation interbassin sur le succès de passage

Lors des essais à débit faible, dans le tronçon à seuils en trapèze enroché, la dénivellation interbassin a varié de 0,0 à 8,7 cm durant le premier essai, puis de 12,5 à 16,5 cm pour les deux autres essais. Durant toute la période d'essais, la dénivellation interbassin a varié de 9,8 à 16,8 cm dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché, et de 12,2 à 16,4 cm dans le tronçon à seuils en brèche. À débit fort, dans le tronçon à seuils en trapèze enroché, la dénivellation interbassin a varié de 2,5 à 9,6 cm. lors du premier essai et de 12,5 à 16,5 lors des deux autres essais. Durant toute la période d'essais, la dénivellation interbassin a varié de 10,2 à 16,5 cm dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché et de 13,1 à 15,6 cm dans le tronçon à seuils en brèche (annexe 2c).

Durant leur période d'essais, les barbottes brunes ont dû franchir des dénivelés interbassin variant de 0 à 16,8 cm. Aucune relation significative entre la dénivellation interbassin et le succès de passage des barbottes n'a été observée (r^2 = 0,002; p=0,83; n=23) (fig. 5.15).

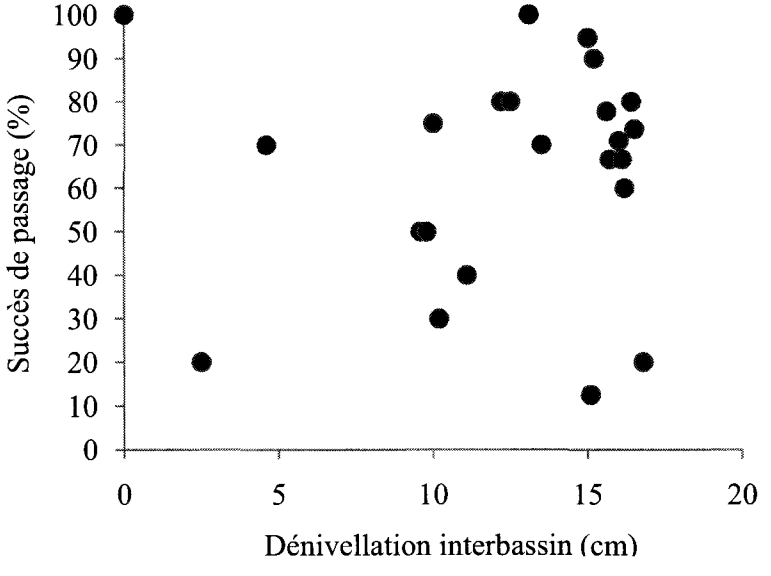


Figure 5.15 Succès de passage des barbottes brunes en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus.

Influence de la vitesse du courant aux seuils sur le succès de passage

Durant leur période d'essais, les barbottes brunes ont dû franchir des vitesses du courant aux seuils variant de 0,19 à 0,68 ms^{-1}. Il n'y avait aucune relation significative entre la vitesse du courant aux seuils et le succès de passage des barbottes brunes (r^2=0,02; p=0,50; n=29) (fig. 5.16). Seulement quatre valeurs de vitesse du courant sur 29 ont montré des valeurs inférieures à 50%, soit 0,29 ms^{-1} (succès de 20%), 0,35 ms^{-1} (succès de 38%), 0,45 ms^{-1} (succès de 20%) et 0,46 ms^{-1} (succès de 0%).

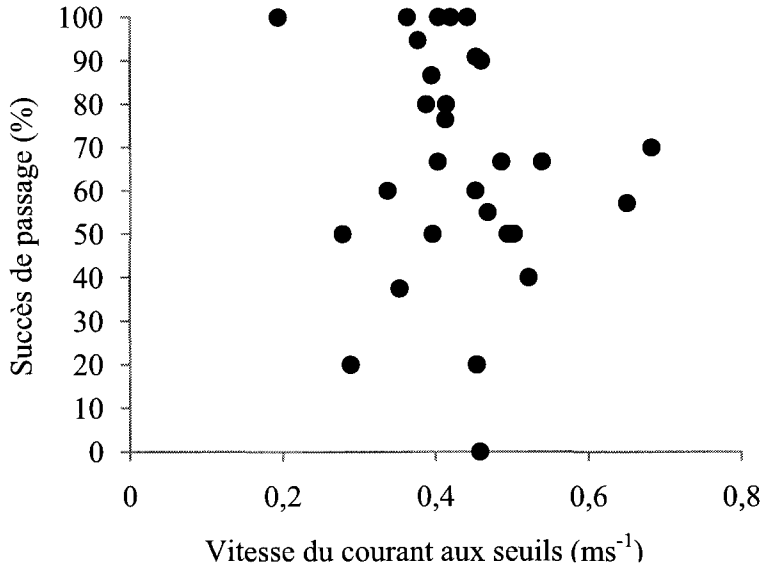


Figure 5.16 Succès de passage des barbottes brunes en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus.

5.2.4 Achigan à petite bouche

Les achigans à petite bouche ont été testés du 23 avril au mai. Il est à noter qu'au court de cette période, le tronçon à seuils en trapèze enroché était sous l'influence des inondations et le tronçon à seuil non-enroché a été sous l'influence des inondations au cours d'un seul essai (à débit faible) qui a eu lieu du 23 au 24 avril.

Activité journalière

Les achigans à petite bouche ont montré un patron de mouvement journalier significativement diurne car 90% des passages aux seuils ont été effectués durant la journée (Chi^2=85,67; p<0,01; n=68).

Comparaison des succès de passage entre deux conditions de débit

L'analyse des succès de passage de l'achigan à petite bouche ne montre aucune différence significative entre les débits fort et faible, et ce pour les deux conditions de débit et les trois configurations de seuil ($Chi^2 \leq 1,5$; $p \geq 0,22$; $n_{TE}=8$; $n_{TN}=21$; $n_{TB}=20$) cependant, il est à noter qu'un faible effectif d'achigan à petite bouche a été utilisé dans le tronçon à seuil en trapèze enroché (fig. 5.17). Les taux de passage ont toujours été supérieurs à 50%.

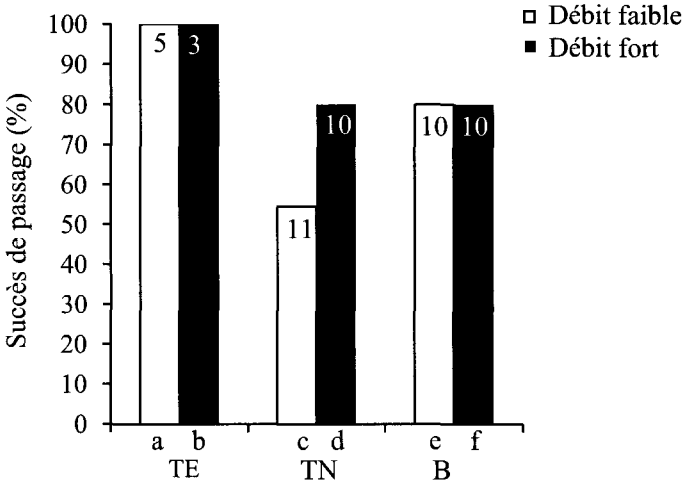


Figure 5.17 Succès de passage moyen d'un seuil des achigans à petite bouche entre les essais à débit fort et à débit faible, aux seuils en trapèze enroché (TE), en trapèze non-enroché (TN) et en brèche (B). Le nombre de poissons total utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les deux débits, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Comparaison des succès de passage entre trois types de seuil

Les analyses statistiques n'ont montré aucune différence significative du succès de passage de l'achigan à petite bouche entre les différents types de seuil à débit faible pour le passage de un seuil ($Chi^2 \leq 3{,}30$; $p \geq 0{,}07$; $n_{TE}=5$; $n_{TN}=11$; $n_{TB}=10$) et de deux seuils ($Chi^2 \leq 1{,}00$; $p \geq 0{,}33$; $n_{TE}=5$; $n_{TN}=11$; $n_{TB}=10$) (fig. 5.18a). Cependant, les succès de passages d'un seuil et de deux seuils dans le tronçon des seuils en trapèze non-enroché, montrent une tendance à être moins élevés que dans les deux autres tronçons. Il n'y avait aucune différence significative entre les différents types de seuil à débit fort pour le passage de un seuil ($Chi^2 \leq 0{,}71$; $p \geq 0{,}71$; $n_{TE}=3$; $n_{TN}=10$; $n_{TB}=10$) et de deux seuils ($Chi^2 \leq 0{,}04$; $p \geq 0{,}84$; $n_{TE}=3$; $n_{TN}=10$; $n_{TB}=10$) (fig. 5.18b).

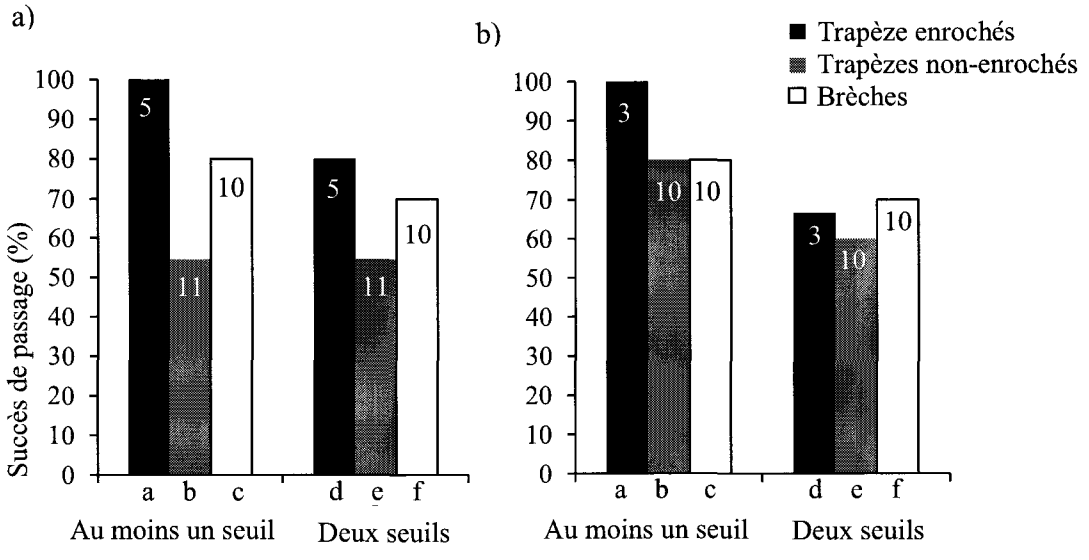


Figure 5.18 Succès de passage moyen des achigans à petite bouche d'un seuil et de deux seuils de différentes formes a) à débit faible et b) à débit fort. Le nombre total de poissons utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les types de seuil, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Influence de la dénivellation interbassin sur le succès de passage

Les essais sur l'achigan à petite bouche ont eu lieu du 24 avril au 3 mai. Le tronçon à seuils en trapèze enroché et le tronçon à seuil non-enrochés ont été sous influence de l'inondation durant toute cette période excepté pour le dernier essai dans le tronçon à seuil non-enroché qui a eu lieu du 1er au 2 mai. Lors des essais à débit faible, la dénivellation interbassin a varié de 0,0 à 4,6 cm dans le tronçon à seuils en trapèze enroché, de 9,2 à 16,8 cm dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché et de 12,2 à 16,4 cm dans le tronçon à seuils en brèche. À débit fort, la dénivellation interbassin a varié de 0,0 à 9,6 cm dans le tronçon à seuils en trapèze enroché, de 10,0 à 16,5 cm dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché et de 13,0 à 16,0 cm dans le tronçon à seuils en brèche (annexe 2c).

Durant leur période d'essais, les achigans à petite bouche ont dû franchir des dénivellations interbassin variant de 0 à 16,8 cm. Cette étendue de valeur est similaire à ce qui a été observé chez le grand brochet et la perchaude, car la moitié des essais sur l'achigan à petite bouche (le premier essai à débit faible et le premier essai à débit fort) ont été réalisés simultanément avec ces deux espèces. Les dénivellations inférieures à 5 cm ont toutes été observées dans le tronçon avec seuils en trapèze enroché, soit le plus en aval. L'analyse statistique ne révèle aucune relation significative entre la dénivellation interbassin et le succès de passage des achigans à petite bouche (r^2= 0,13; p=0,131; n=19) (fig. 5.19).

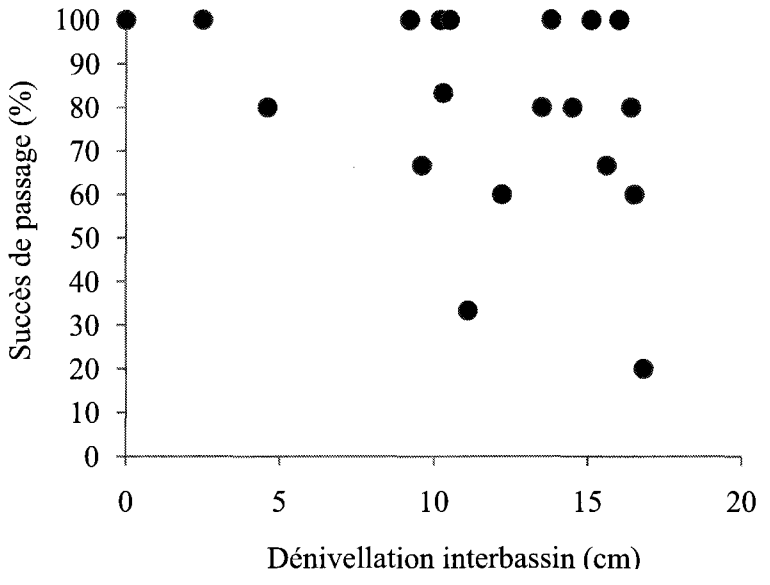


Figure 5.19 Succès de passage des achigans à petite bouche en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus.

Influence de la vitesse du courant aux seuils sur le succès de passage

Durant leur période d'essais, les achigans à petite bouche ont dû franchir des vitesses du courant aux seuils variant de 0,19 à 0,68 ms^{-1}. Aucune relation entre la vitesse de courant aux seuils et le succès de passage des achigans à petite bouche n'a été observée (r^2 =0,01; p=0,13; n=19) (fig. 5.20). Des succès inférieurs à 50% ont été observés 'à deux reprises sur les 19 valeurs observées, soit pour les vitesses de courant de 0,45 ms^{-1} (20% de succès de passage) et 0,52 ms^{-1} (33% de succès de passage).

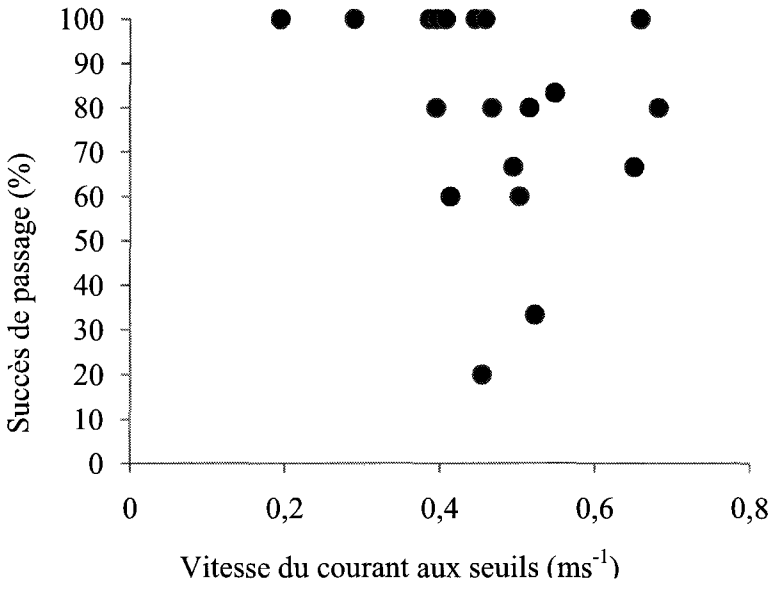


Figure 5.20 Succès de passage des achigans à petite bouche en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus.

5.2.5 Crapet-soleil

Les crapets-soleil ont été testés du 9 au 14 mai. Il est à noter qu'au court de cette période, aucun tronçon n'était sous influence d'une inondation.

Activité journalière

Les crapets-soleil n'ont pas montré de patron de mouvement journalier précis car le taux de passages effectués le jour (45%) n'est pas significativement du taux de passages effectués la nuit (55%) (Chi^2=0,40; p=0,53; n=20).

Comparaison des succès de passage entre deux conditions de débit

Aucune différence significative entre les succès de passage du crapet-soleil à débit fort et à débit faible n'a été observée, et ce pour tous les types de seuil ($Chi^2 \leq 0,71$; $p \geq 0,10$; n_{TE}=32; n_{TN}=43; n_{TB}=38) (fig.5.21). Le succès de passage des crapets-soleil a été inférieur à 40% dans tous les cas.

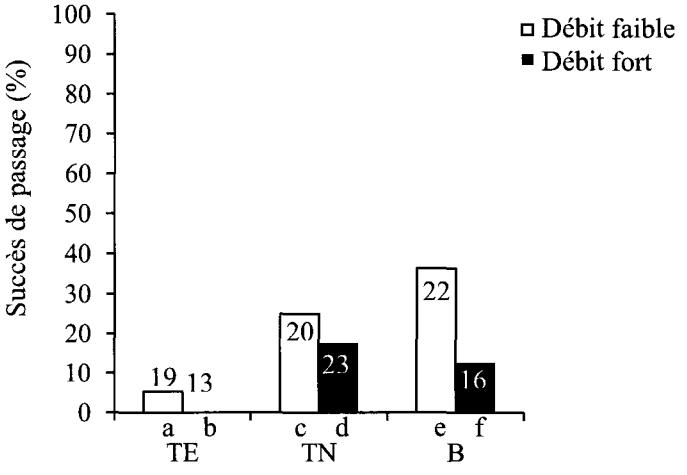


Figure 5.21 Succès de passage moyen d'un seuil des crapets-soleil entre les essais à débit fort et à débit faible, aux seuils en trapèze enroché (TE), en trapèze non-enroché (TN) et en brèche (B). Le nombre de poissons total utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les deux débits, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Comparaison des succès de passage entre trois types de seuil

À débit faible, le succès de passage d'un seuil était significativement plus faible dans le tronçon des seuils en trapèze enroché que dans le tronçon à seuils en brèche (Chi^2=5,76; p=0,02; n_{TE}=19; n_{TB}=22) (fig. 5.22a). À débit fort, aucune différence significative n'a été notée entre les succès de passage d'un seuil des différents tronçons ($Chi^2 \leq 2,54$; $p \geq 0,11$; n_{TE}=13; n_{TN}=23; n_{TB}=16) (fig. 5.22b). Aucun crapet-soleil n'a réussi à franchir deux seuils à débit faible ou à débit fort.

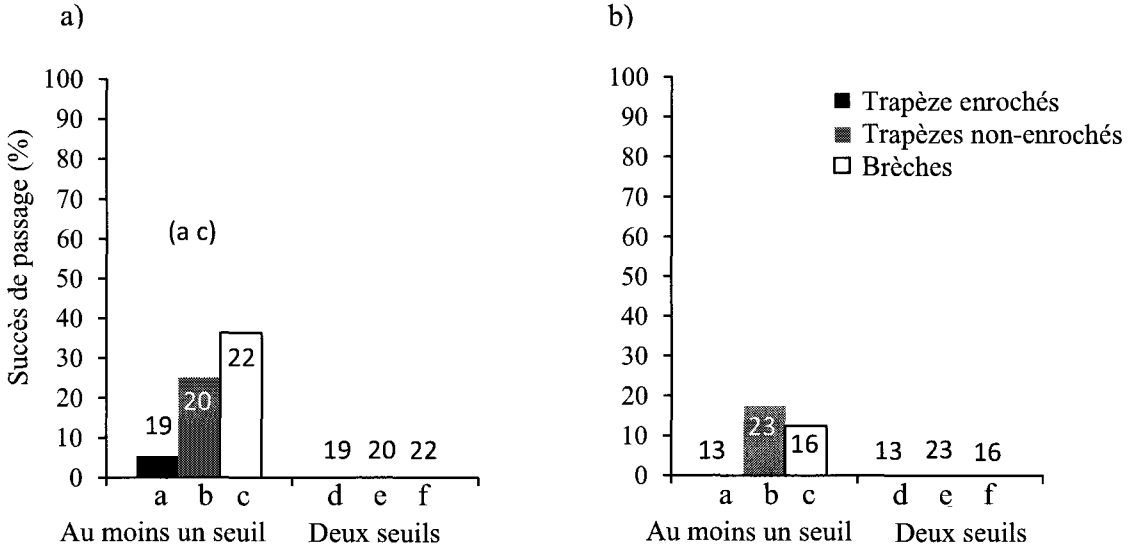


Figure 5.22 Succès de passage moyen des crapets-soleil d'un seuil et de deux seuils de différentes formes a) à débit faible et b) à débit fort. Le nombre total de poissons utilisés dans chaque cas est également présenté. Les différences significatives entre les types de seuil, identifiées par une lettre, sont indiquées entre parenthèses.

Influence de la dénivellation interbassin sur le succès de passage

Les essais sur le crapet-soleil ont eu lieu du 9 au 14 mai. Durant cette période, aucun tronçon n'était sous l'influence de l'inondation. Lors des essais à débit faible, la dénivellation interbassin a varié de 15,2 à 16,5 cm dans le tronçon à seuils en trapèze enroché, de 9,8 à 16,2 cm dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché et de 12,5 à 15,6 cm dans le tronçon à seuils en brèche. À débit fort, la dénivellation interbassin a varié de 15,7 à 16,1 cm dans le tronçon à seuils en trapèze enroché, de 10,2 à 16,4 cm dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché et de 13,1 à 15,6 cm dans le tronçon à seuils en brèche (annexe 2d).

Durant leur période d'essais, les crapets-soleil ont dû franchir des dénivellations interbassin variant de 9,8 à 16,5 cm. Très peu de crapets-soleil ont réussi à franchir les

seuils. On ne peut établir de relation significative entre les dénivellations interbassin et le succès de passage des crapets-soleil (r^2 =0,00; p=0,95; n=11) (fig. 5.23).

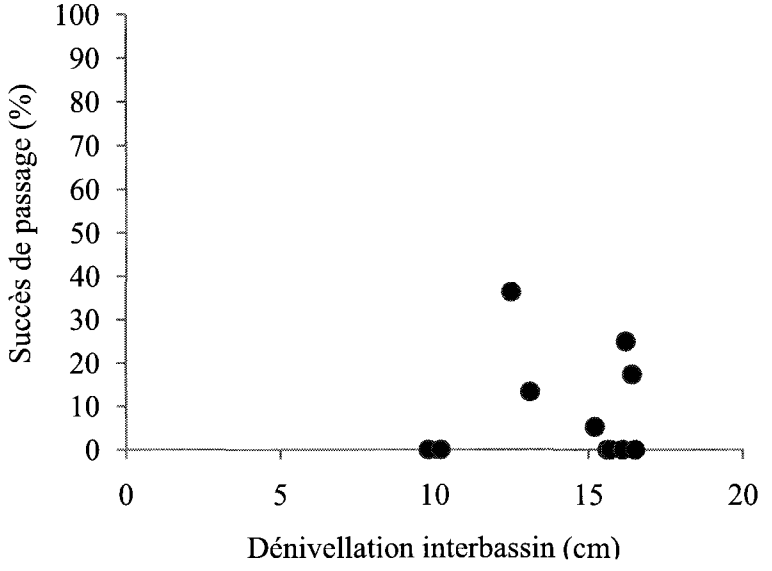


Figure 5.23 Succès de passage des crapets-soleil en fonction de la dénivellation interbassin, tout type de seuil et débit confondus.

Influence de la vitesse du courant aux seuils sur le succès de passage

Durant toute leur période d'essais, les crapets-soleil ont dû franchir des vitesses du courant aux seuils variant de 0,28 à 0,54 ms^{-1}. Peu de crapets-soleil ont réussit à franchir les seuils au cours de l'expérimentation et aucune relation entre la vitesse de courant aux seuils et le succès de passage des crapets-soleil n'a été observée (r^2 =0,00; p=0,78; n=12) (fig. 5.24).

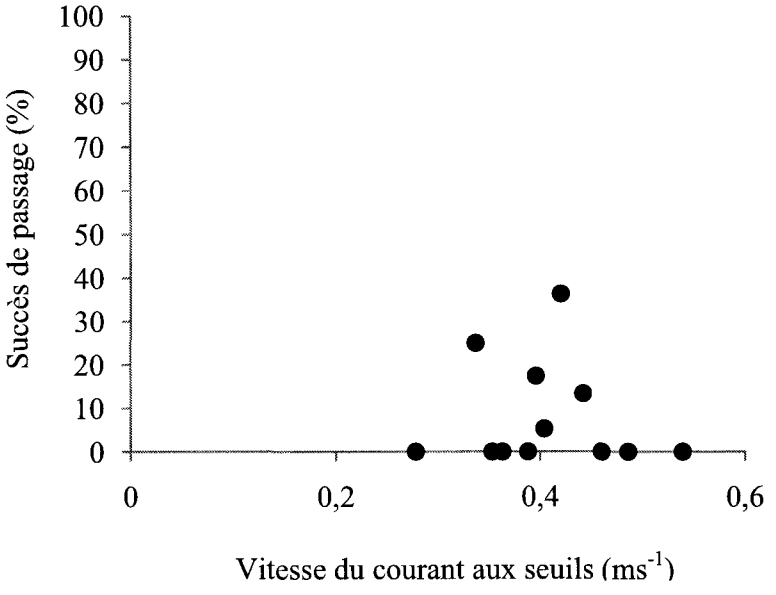


Figure 5.24 Succès de passage des crapet-soleils en fonction de la vitesse du courant aux seuils, tout type de seuil et débit confondus.

Chapitre VI : Discussion

Au cours de l'étude de la passe migratoire multi-spécifique du ruisseau de Feu, nous avons testé plusieurs configurations de seuils et deux conditions de débit afin de déterminer la combinaison qui permettrait le meilleur succès de passage pour chacune des espèces à l'étude. Les variables telles que la forme des seuils et le débit étaient contrôlées pendant l'expérience. D'autres variables non-contrôlées, telles que la dénivellation interbassin, la vitesse du courant, la température et la turbidité, étaient suivies en continu pour en tracer l'évolution. De façon générale, il est apparu que les espèces testées franchissaient plus facilement les seuils en condition de débit faible que de débit fort et que leur succès de passage variait entre les trois configurations de seuil.

6.1 Effet des conditions hydrauliques et environnementales

L'analyse univariée de l'influence des facteurs hydrauliques et environnementaux sur le succès de passage n'a révélé aucune relation significative. Ce résultat suggère que de multiples facteurs ou combinaisons de facteurs agissent sur la capacité d'un poisson à franchir une structure ainsi qu'une forte variabilité compte-tenu de la petite taille de l'échantillon et il est difficile de les considérer individuellement. Cependant, certaines tendances ont été détectées et seront discutées dans les prochaines sections. L'analyse de ces tendances permet entre autres d'identifier les meilleures configurations pour les conditions hydrauliques les plus limitantes et de raffiner les concepts testés dans la présente étude.

6.1.1 Dénivellation interbassin

Durant l'expérimentation, le niveau d'eau de la rivière des Prairies a grandement varié. Cette fluctuation a influencé les dénivellations interbassin, particulièrement pour les seuils localisés dans la portion aval de la passe migratoire. À son plus haut niveau, la rivière a complètement inondé le tronçon des seuils en trapèze enroché, le rendant inutilisable pour l'expérimentation du 21 au 30 avril L'inondation qui a eu lieu du 19 avril au 6 mai dans le tronçon à seuils en trapèze enroché et du 19 au 27 avril dans le tronçon à seuils en trapèze non-enroché, a élargit l'étendue des valeur de dénivellation

interbassin et de vitesse de courant lors des essais sur les différentes espèces testées, à l'exception des crapets-soleil, qui ont été testés après le retrait des inondations.

Selon Jungwirth (1996) la dénivellation interbassin est un facteur déterminant pour le succès de passage des poissons et une plus grande étendue des valeurs de dénivellation interbassin permet de mieux déterminer la valeur seuil limitant le passage des différentes espèces dans la passe.

Dans le cas des grands brochets, les tronçons avec seuils en trapèze enroché et non-enrochés ont été sous l'influence des inondations durant toute la période d'étude, ce qui a permis d'observer une grande étendue des valeurs de dénivellation interbassin (de 0,0 à 16,5 cm). Cependant, aucune relation significative n'a pu être déterminée entre la dénivellation interbassin et le succès de passage. Étant donné que les grands brochets ont réussi à franchir parmi les plus hautes dénivellations observées dans la passe (100% de succès pour une dénivellation de 16,0 cm et 60% de succès pour une dénivellation de 16,4 cm) il semble que les dénivellations interbassin dans la passe n'aient pas atteint le seuil limitant le passage chez cette espèce. Aucun brochet n'a franchi la dénivellation de 16,5 cm observée dans le tronçon en trapèze enroché. On ne peut cependant pas affirmer qu'il s'agit de la valeur seuil limitant le passage des grands brochets, car cette valeur est très proche de la dénivellation de 16,4 cm qui a permis un succès de passage de 60%.

Au cours des essais sur la perchaude, les tronçons avec seuils en trapèze enroché et non-enroché ont été sous l'influence des inondations, ce qui a permis d'observer une grande étendue des valeurs de dénivellation interbassin (de 0,0 à 16,5 cm). Aucune relation significative n'a été établie entre la dénivellation interbassin et le succès de franchissement des seuils par la perchaude. Cependant lors des essais à débit faible dans le tronçon des seuils en brèche, on remarque que 12 perchaudes sur 13 (92%) ont réussi à franchir le premier seuil, alors qu'aucune n'a franchi le deuxième seuil du tronçon. Ceci peut s'expliquer par la différence importante entre les dénivellations interbassin de ces deux seuils. Lors de ces essais, la dénivellation du premier seuil variait de 13,0 à 13,8 cm, alors que celle du deuxième seuil variait de 16,4 à 16,5 cm. Ces observations suggèrent que la dénivellation devrait être inférieure à 14 cm pour permettre le passage des

perchaudes, du moins dans le tronçon avec seuils en brèche. D'ailleurs, lorsque des dénivellations interbassin de plus de 14 cm ont été observées, le succès de passage des perchaudes était toujours de moins de 20%. Ces résultats appuient ceux de Jungwirth (1996) voulant que la dénivellation optimale pour le passage des poissons non-salmonidés à capacité natatoire faible soit inférieure ou égale à 10 cm.

Lors des essais sur la barbotte brune, le tronçon à seuil en trapèze enroché était sous influence de l'inondation, mais seulement lors du premier essai à débit faible et du premier essai à débit fort. Cependant, aucune relation significative n'a été observée entre la dénivellation interbassin et le succès de passage des barbottes brunes. De plus, les barbottes brunes ont réussi à franchir en grand nombre les seuils, indépendamment de la dénivellation. Lors des essais, l'inondation ne semble pas avoir eu d'influence sur le succès de passage de cette espèce. De plus, il semble que les dénivellations interbassin à l'intérieur de la passe n'atteignent pas la valeur limitant le passage de cette espèce et sont donc adéquates.

Durant les essais sur les achigans à petite bouche, le tronçon à seuils en trapèze enroché et le tronçon à seuils en trapèze non-enroché étaient sous influence de l'inondation, à l'exception du dernier essai dans le tronçon à seuil non-enroché qui a eu lieu du 1er au 2 mai, après le retrait de l'inondation. Cette inondation a permis d'observer les capacités de l'achigan à petite bouche à franchir une grande étendue de dénivellations interbassin (0,0 à 16,8 cm). Cependant, aucune relation significative n'a été observée entre la dénivellation interbassin et le succès de passage des achigans à petite bouche. Des succès de passage de moins de 60% ont été observés seulement lorsque la dénivellation interbassin était de 11,1 cm (33% de succès) et de 16,8 cm (20% de succès). Dans le premier cas, il est impossible que la dénivellation interbassin soit responsable du faible taux de succès car de hauts taux de succès de passages (60% et plus) ont été observés à des dénivellations plus élevées. Dans le deuxième cas, un succès de passage de 60% a été observé sur une dénivellation de 16,5 cm, ce qui est similaire, il est donc impossible de conclure qu'une dénivellation interbassin de 16,8 cm soit le seuil limitant le passage chez cette espèce. Un plus grand effectif d'achigan à petite bouche et des essais avec une dénivellation plus grande seraient nécessaires afin de déterminer ce seuil. Les

dénivellations interbassin retrouvées dans la passe ne semblent donc pas avoir affecté le succès de passage des achigans à petite bouche et sont adéquates.

Lors des essais sur le crapet-soleil, aucun tronçon n'était sous influence de l'inondation. L'étendue des valeurs de dénivellation était donc faible (9,8 à 16,5 cm). Aucune relation n'a été établie entre le succès de passage et la dénivellation interbassin chez cette espèce. Globalement, très peu de crapets-soleil ont réussi à franchir la passe mais neuf d'entre eux ont tout de même réussi à passer des dénivellations atteignant 16 cm dans le tronçon en trapèze non-enroché. La dénivellation interbassin retrouvée dans la passe n'est donc pas la seule cause du faible succès de passage chez cette espèce. Le mauvais état des poissons et le décalage entre la période de fraie du crapet-soleil (normalement de juin à début août) et la période d'essai sur cette espèce (du 9 au 14 mai) sont des facteurs à considérer.

Comme une dénivellation plus faible demande moins d'énergie aux poissons pour franchir un seuil, il est important de tenir compte de l'effet de l'inondation lors de la comparaison du succès de passage entre les types de seuil. Toutefois, l'absence d'une relation significative entre la dénivellation et le taux de passage montre que d'autres facteurs tels la configuration des seuils, l'état des poissons ou le débit semblent aussi jouer un rôle important.

Bien que la dénivellation aux seuils, théoriquement fixée à 15 cm pour la passe du ruisseau de Feu, ne soit pas le seul critère déterminant le succès de passage, il conviendrait de la réduire afin de tenter d'améliorer le succès de passages, principalement de la perchaude.

6.1.2 Vitesse du courant

La vitesse du courant au seuil constitue un autre facteur susceptible d'influencer le passage des poissons. Elle varie en fonction de la forme des seuils, du débit et de la dénivellation interbassin. Parmi toutes les combinaisons testées dans la présente étude, ce sont les seuils en brèche à débit fort qui ont montré les vitesses de courant les plus élevées comparativement aux seuils avec trapèze (enroché ou non), lorsqu'on retire les

données mesurées au cours de la période où la rivière des Prairies inondait la passe migratoire. Dans ces mêmes conditions, les vitesses du courant les moins élevées ont été mesurées dans le tronçon des seuils en trapèze non-enroché à débit faible.

Afin de permettre leur montaison, la vitesse du courant doit être inférieure à la capacité natatoire des poissons destinés à utiliser la passe. Comme il en a été question dans le chapitre II, c'est la vitesse de nage critique qui est habituellement utilisée pour déterminer la vitesse de courant optimale à l'intérieur d'une passe migratoire (Peake, 2004). La vitesse de nage critique correspond à la vitesse de nage pour laquelle le poisson consomme le maximum d'oxygène (Tudorache et al., 2008). À cette vitesse, le poisson se fatigue s'il y a une augmentation de l'activité (Moyle et Cech, 2004). Si la vitesse du courant retrouvée à l'intérieur des seuils est inférieure à la vitesse de nage critique des poissons, ceux-ci devraient être en mesure de les traverser. D'ailleurs, la vitesse de nage critique sous-estimerait la capacité natatoire des poissons remontant une passe migratoire (Peake, 2004; Peake et Farrell, 2004). Cette valeur reste donc très conservatrice et un courant circulant à l'intérieur d'une passe migratoire avec une vitesse inférieure à celle-ci ne devrait pas limiter le succès de passage des poissons.

Chez toutes les espèces, aucune relation significative n'a été observée entre la vitesse du courant aux seuils et le succès de passage des poissons. Le faible nombre d'observations ainsi que la faible gamme de variation des vitesses du courant (0,19-0,68 ms^{-1}) dans la passe sont des facteurs qui peuvent expliquer l'absence de relation significative.

Les vitesses aux seuils mesurées lors des essais avec le grand brochet allaient de 0,39 0,68 ms^{-1}. Selon Peake (2008) les grands brochets sont capable de franchir un couloir de 50 m avec des vitesses de courant allant jusqu'à 1,2 ms^{-1}. De plus, selon Harper et Blake (1990), la vitesse de nage maximale (vitesse qui peut être maintenue moins de 20 secondes) des grands brochets est de 7,06 ms^{-1}. Les valeurs mesurées au ruisseau de feu n'ont donc pas limité le succès de passage chez le grand brochet. D'ailleurs le grand brochet, a montré un succès de passage élevé (≥50%) pour la majorité des valeurs de vitesse du courant observées au cours des essais. Le fait qu'aucune relation significative entre la vitesse de courant et le succès de passage des grands brochets n'a pu être

observée peut être dû au fait que l'ensemble des valeurs de vitesse de courant mesurées étaient plus faible que la capacité natatoire des grands brochets.

Les valeurs de vitesses du courant observées lors des essais avec les perchaudes allaient de 0,39 à 0,68 ms^{-1}. Étant donné les faibles succès de passage des perchaudes, il convient de vérifier si les vitesses du courant aux seuils étaient trop élevées par rapport à la capacité natatoire de ces poissons. Selon Nelson (1989), la vitesse de nage critique pour la perchaude varie de 0,30 à 0,46 ms^{-1}. Ceci pourrait expliquer en partie leur faible succès de passage au premier seuil en trapèze non-enroché, dont les vitesses variaient de 0,41 à 0,55 ms^{-1} à débit faible (lors des essais avec la perchaude), et de 0,45 à 0,52 ms^{-1} à débit fort, ainsi que l'absence de passage des perchaudes au deuxième seuil en brèche lors des essais à débit faible, où les vitesses du courant étaient de 0,44 à 0,47 ms^{-1}. Cependant, étant donné que la valeur de la vitesse de nage critique est généralement inférieure à la capacité réelle des poissons (Peake, 2004; Peake 2008), la vitesse aux seuils ne peut être le seul facteur qui ait affecté le succès de passage. Le meilleur succès passage (100%) correspondait à une vitesse du courant de 0,39 ms^{-1}, dans le tronçon avec seuils en brèche. Les vitesses du courant plus élevées ont montré des succès de passage inférieur à 30%. Ces résultats appuient ceux de Knaepkens et al. (2005) qui ont mesuré un succès de passage des perches européennes de seulement 8% à l'intérieur d'une passe migratoire à seuils et à bassins, dont la vitesse du courant atteignait 0,6 ms^{-1} à l'intérieur de certains seuils.

Les valeurs de vitesse du courant observées lors des essais de la barbotte brune allaient de 0,19 à 0,68 ms^{-1}. La barbotte brune a montré un taux de succès élevé (≥50%) pour presque toutes les vitesses testées. Seulement cinq valeurs de vitesse du courant sur 29 ont montré des valeurs inférieures à 50%. Cependant, il est impossible d'affirmer que ces valeurs de vitesse du courant observées étaient la cause de ces faibles succès de passage, car la barbotte brune a montré des succès de passages élevés (≥50%) à toutes les valeurs de vitesse du courant supérieures à celles-ci soit pour les vitesses du courant de plus de 0,46 ms^{-1}. La littérature concernant les capacités natatoires de la barbotte brune est malheureusement très pauvre. Il est donc impossible de comparer ces résultats avec une autre étude. Cependant, le haut succès de passage de la barbotte indique que les valeurs

de vitesse du courant observées au cours de l'expérience ne limitent pas le succès de passage de cette espèce.

L'achigan à petite bouche, qui a rencontré des vitesses de courant allant de 0,19 à 0,68 ms^{-1}, a lui aussi montré un succès de passage élevé (≥50%) pour la majorité des valeurs de vitesse du courant observées. Des succès inférieurs à 50% n'ont été observés qu'à deux reprises sur les 19 valeurs observées. Étant donné que les achigans ont montré des succès de passage de plus de 60% à des vitesses plus élevées (plus de 0,52), il est improbable que la vitesse de courant soit la cause du succès de passage plus faible dans ces deux cas. Les vitesses du courant retrouvées dans la passe lors des essais sur l'achigan à petite bouche sont donc suffisamment basses pour permettre la montaison de cette espèce. Une étendue de vitesse du courant semblable (0,54 à 0,63 ms^{-1}) a été recommandée par Peake (2004) pour les achigans à petite bouche de 27 à 47 cm de long (l'étendue de la longueur des achigans testés dans la passe du ruisseau de Feu était de 32 à 48 cm). Peake (2004) a aussi mentionné que les achigans à petite bouche testés ont réussi à faire l'ascension d'un couloire de 50 m de long à l'intérieur de laquelle la vitesse du courant allait jusqu'à 1,2 ms^{-1}.

Les vitesses du courant observées lors des essais avec le crapet-soleil allaient de 0,28 à 0,54 ms^{-1}. Selon Long et al., (1994), les crapets-soleil peuvent nager à des vitesses correspondant à 2,1 fois la longueur du poisson par seconde. En utilisant cette relation, les crapets-soleil utilisés lors de l'expérimentation seraient en mesure de nager à des vitesses allant de 0,27 ms^{-1} à 0,60 ms^{-1}, selon leur taille. Les plus gros crapets-soleil auraient donc normalement eu une vitesse de nage supérieure à celle mesurée à la majorité des seuils. Cependant, il convient de mentionner que d'autres facteurs comme la turbulence de l'écoulement aux seuils peuvent aussi diminuer la capacité natatoire des poissons et affecter leur aptitude à franchir un seuil (Lupandin, 2005). L'échec de la montaison des crapets-soleil peut aussi être attribué à plusieurs autres facteurs, tels leur mauvais état lors de l'expérimentation et la méthode de marquage qui semblait induire une blessure importante.

6.1.3 Température

La température influence les patrons de mouvement des poissons, entre autres en déclenchant les migrations de fraie. Selon Casselman et Lewis (1996), la migration des grands brochets s'opère lorsque la température de l'eau atteint 8 à 12°C. Mingelbier et al. (2005) ont observé le début de la migration des perchaudes lorsque la température de l'eau avait atteint 4,5 ± 0,9°C. Étant donné que les températures de l'eau mesurées à l'intérieur de la passe variaient de 6,5 à 17,7°C, lors de la période d'essai de la perchaude et du grand brochet, les conditions n'étaient pas limitantes pour ces espèces. La migration de l'achigan à petite bouche se déclenche lorsque la température se situe près de 15°C (Scott et Crossman, 1974) et la température de l'eau mesurée lors des essais avec l'achigan à petite bouche variait de 8,0 à 17,4°C, ce qui n'a pas été limitant pour cette espèce. Chez la barbotte brune et le crapet-soleil, la migration débute lorsque la température de l'eau dépasse 20°C (Scott et Crossman, 1974; Bernatchez et Giroux 2000). Lors des essais avec la barbotte brune, la température de l'eau variait de 8,0 à 17,7°C et elle a varié de 13,1 à 25,7°C lors des essais avec le crapet-soleil. Dans ce contexte, les conditions de température ont pu s'avérer être défavorables au mouvement de la barbotte brune.

6.1.4 Activité journalière des poissons

Chez le grand brochet, 92% des franchissements de seuils ont été effectués le jour, et ceci se produisait principalement le matin, lorsque la température de l'eau était faible. Il est aussi à noter que les grands brochets étaient déposés entre 8h00 et 11h00 pour chaque essai, ce qui a pu engendrer une hausse de leur activité dès le dépôt matinal des poissons. Ces résultats sont appuyés par ceux de Diana (1980) qui a observé moins d'activité chez cette espèce durant la nuit.

La perchaude, est reconnue pour être plus active le jour que la nuit (Thorpe, 1977), ce qui est supporté par nos résultats qui montrent que 81% des franchissements de seuils par les perchaudes ont été effectués le jour.

Les barbottes brunes se sont montrées plus actives durant la nuit (60,2% des franchissements de seuils ont été effectués durant la nuit) que durant la journée. Dedual, (2002) a observé cette même tendance.

Les achigans à petite bouche ont franchi 90% des seuils durant la journée, lorsque la température de l'eau était chaude. Ces poissons ont donc un comportement diurne, tel que décrit par (Scott et Crossman, 1974).

Aucune relation n'a été établie entre le mouvement des crapets-soleil le moment de la journée, ceci étant en grande partie attribuable au très faible succès de passage de cette espèce.

6.1.5 Turbidité

La turbidité de l'eau a été très élevée tout au long de l'expérimentation. Cette condition représente vraisemblablement une difficulté supplémentaire pour le franchissement de seuils par les espèces de poissons visuels, tels que le grand brochet (Casselman et Lewis, 1996), la perchaude (Thorpe, 1977), l'achigan à petite bouche (ainsi que l'achigan à grande bouche) et le crapet-soleil (Scott et Crossman, 1974). La colonisation des berges de la passe par la végétation et la faible turbidité de l'eau anticipée pour le marais devraient favoriser le succès de passage des espèces visuelles après la mise en opération des aménagements.

6.2 Effet du type de seuil et du débit pour chaque espèce

6.2.1 Grand brochet

À la lumière de nos résultats, on peut considérer que la meilleure configuration pour le grand brochet correspond à des seuils en trapèze enroché ou non-enroché avec un débit faible. Ces configurations ont respectivement permis à 88% et 75% des grands brochets de franchir deux seuils. En raison de l'inondation, un seul essai par condition de débit n'a pu être réalisé dans le tronçon avec seuils en trapèze enroché, diminuant ainsi l'effectif de grands brochets utilisés. Ainsi, seulement huit grands brochets ont été testés à l'intérieur de ce tronçon à débit faible. Cependant, malgré ce faible effectif, les succès de passage

élevés (100% pour le passage d'un seul et 88% pour le passage de deux seuils) dans ce tronçon démontrent que les grands brochets sont aptes à franchir ce type de seuil à faible débit.

L'inondation qui a eu lieu à l'intérieur des tronçons avec seuils en trapèze enroché et non-enroché durant la durée des essais sur les grands brochets a diminué la dénivellation interbassin. Malgré le fait qu'il faille considérer ces résultats avec une certaine prudence, aucune relation significative n'a été observée entre la dénivellation et le succès de passage. Il est donc impossible d'affirmer qu'une dénivellation plus élevée dans ce tronçon aurait diminué significativement le succès de passage des grands brochets.

De façon générale, les grands brochets n'ont pas montré de difficulté à traverser les différents types de seuils. Plusieurs d'entre eux ont été aperçus sautant hors de l'eau, essayant de traverser un tronçon plus en amont, après avoir franchi les deux premiers seuils. Par ailleurs, les seuils en brèche offrent des conditions plus difficiles pour le passage des grands brochets, comme en témoignent les plus faibles succès de passage particulièrement du deuxième seuil. Ces résultats appuient ceux de Brodeur et al. (2007) qui avaient montré une amélioration du succès de passage des grands brochets avec l'utilisation d'échancrures élargies dans une passe à seuils et bassins successifs.

6.2.2 Perchaude

Selon nos résultats, la meilleure configuration pour la perchaude correspond à des seuils en brèches avec un débit faible. Par contre, sous ces conditions, aucune perchaude n'a réussi à traverser un deuxième seuil. Cette situation peut être expliquée par la dénivellation présente au deuxième seuil en brèche qui était de l'ordre de 16,5 cm par opposition à 13,5 cm pour le premier. Il est également possible que les seuils en brèche conviennent davantage au passage des perchaudes en raison de la faible turbulence et/ou de l'orientation particulière du jet, mais que leur franchissement nécessite une dépense énergétique supérieure en raison de la vitesse du courant plus élevée qui y est observée. Les vitesses du courant étaient de 0,44 à 0,47 ms^{-1} au deuxième seuil en brèche alors que le meilleur succès passage (100%) a été mesuré lorsque la vitesse du courant était de 0,39 ms^{-1}, dans le tronçon avec seuils en brèche. De plus, 27% des perchaudes utilisées dans

l'expérience avaient subi un long transport et étaient arrivées en mauvais état. Il est à noter qu'en raison de l'inondation, un seul essai par condition de débit n'a pu être réalisé dans le tronçon avec seuils en trapèze enroché, un faible effectif de perchaudes a donc été utilisé dans ce tronçon (trois perchaudes à débit faible et cinq perchaudes à débit fort). Cependant, à débit faible, on observe une tendance claire à un plus grand succès de passage de un seuil dans le tronçon à seuils en brèche que dans le tronçon à seuils en trapèze enroché. Il est donc intéressant de tenir compte de ces résultats, malgré le faible effectif utilisé.

Malgré le retrait des individus moribonds, les perchaudes provenant du pêcheur commercial étaient en moins bon état que celles qui avaient été recueillies dans nos verveux, ce qui a possiblement contribué à diminuer le succès de passage de cette espèce.

6.2.3 Barbotte brune

Les meilleures combinaisons pour la barbotte brune correspondent aux seuils en trapèze enroché à débit faible et aux brèches à débit faible et fort, ces configurations étant associées à des succès de passage de deux seuils de 80% et 73% respectivement. Ce projet devait aussi vérifier si l'augmentation de la profondeur de la fente du seuil pouvait améliorer le succès de passage des barbottes brunes, un poisson de fond. Il semble effectivement que la présence d'une brèche profonde à débit fort ait facilité le passage des poissons, car aucune différence significative entre le succès de passage à débit fort et à débit faible n'a été observée dans le tronçon avec seuils en brèche. L'inondation n'a eu lieu que lors des deux premiers essais effectués avec la barbotte brune (un à débit faible et un à débit fort) dans le tronçon en trapèze enroché. Lorsqu'on enlève les données qui ont été prises lors de ces essais, on observe qu'à débit faible les succès de passage de un seuil sont légèrement plus faible (90% avec inondation et 85% après inondation) et le passage de deux seuils est légèrement plus élevé (80% avant l'inondation et 85% après l'inondation). Les différences significatives lorsque comparé avec les deux autres tronçons sont restés les mêmes. À débit fort, lorsqu'on enlève les données qui ont été prises lors de l'inondation, on observe que les succès de passage de un seuil sont légèrement plus élevés (38% avec inondation et 45% après inondation) et le passage de

deux seuils est aussi légèrement plus élevé (28% avant l'inondation et 30% après l'inondation). Les différences significatives lorsque comparé avec les deux autres tronçons sont restés les mêmes. L'inondation qui n'a donc pas influencé la capacité de la barbotte à franchir les seuils et les meilleurs combinaisons restent les mêmes.

6.2.4 Achigan à petite bouche

Nos résultats démontrent que l'achigan à petite bouche peut s'accommoder de toutes les conditions qui ont été testées au printemps 2008, puisque les succès de passage sont toujours supérieurs à 50% et qu'aucune différence significative n'a été observée entre les différents types de seuil et entre les deux conditions de débit. Pour les mêmes raisons que mentionnées pour le grand brochet et la perchaude, un faible effectif (cinq à débit faible et trois à débit fort) d'achigan à petite bouche a été utilisé dans le tronçon en trapèze enroché, ces résultats sont donc à considérer avec une certaine prudence. Cependant le succès de passage de un seuil de 100% à débit fort et à débit faible et le succès de passage de deux seuils de 80% à débit faible et de 67% à débit fort démontrent que les achigans à petite bouche sont aptes à franchir ce type de seuil. Les inondations ont eut lieu au cours de tous les essais dans les tronçons à seuils en trapèze enroché et non-enroché, à l'exception du dernier essai dans le tronçon à seuils en trapèze enroché. Aucune relation significative entre la dénivellation et le succès de passage et aucune valeur de dénivellation limitant le passage n'ont pu être observées. Il est donc impossible d'affirmer qu'une dénivellation plus élevée dans ce tronçon aurait diminué significativement le succès de passage des achigans à petite bouche.

6.2.5 Crapet-soleil

Les meilleures configurations pour le crapet-soleil seraient les seuils en trapèzes non-enrochés et les seuils en brèche, à débit faible. Ces résultats doivent cependant être considérés avec prudence car les succès de passage des crapets-soleil ont été très faibles pour toutes les conditions testées. Le mauvais état des individus, qui avaient subi un long transport avant d'arriver au site, la méthode particulière d'insertion des transpondeurs,

qui différait des autres espèces, ainsi que le décalage entre la période de fraie du crapet-soleil (juin à août) et la période des essais (mi-mai) ont vraisemblablement contribué au faible succès de passage de cette espèce.

6.3 Comparaison des résultats avec d'autres projets

Une amélioration du succès de passage du grand brochet (trois fois plus élevé), de la barbotte brune (deux fois plus élevé) et de l'achigan à petite bouche a été notée, en comparaison avec l'étude de Brodeur et al. (2007) menée à la passe à seuils et bassins successifs de la rivière aux Pins. Par contre, il est important de tenir compte du fait que les données de la rivière aux Pins représentent les succès de passages de la passe en entier alors que celles du ruisseau de Feu représentent les succès de passage de seulement deux seuils en trapèzes enrochés, à débit faible. Cependant, le succès de passage pour la perchaude s'est avéré semblable à celui obtenu en 2006 à la rivière aux Pins, et le succès de passage de deux seuils par les crapets-soleil ruisseau de Feu s'est avéré être nul. Malgré les problèmes dus à l'approvisionnement en poissons et à la méthode de marquage, des efforts devront encore être faits pour améliorer le succès de passage de ces deux espèces. Une avenue à tester serait de réduire la dénivellation interbassin afin de diminuer les vitesses du courant près des seuils.

On peut aussi comparer les résultats du projet ruisseau de Feu avec ceux du canal de contournement naturel testé par Calles et Greenberg. (2007). Les succès de passage des perchaudes obtenus au ruisseau de Feu sont semblables à ceux de la perche européenne dans le canal de contournement naturel. Cependant, le grand brochet a montré un meilleur succès de passage dans la passe de ruisseau de Feu.

6.4 Synthèse des résultats

L'efficacité des diverses configurations a varié en fonction de l'espèce. Afin de faire un choix éclairé sur la meilleure combinaison seuil/débit, le tableau 6.1 présente l'efficacité relative de chaque seuil pour chaque espèce, pour chaque condition de débit. On note que les meilleurs succès de passage sont souvent obtenus dans les tronçons à seuils en trapèzes enrochés à débit faible. Les seuils en brèche offrent également des conditions intéressantes pour certaines espèces, mais la perchaude y a démontré des difficultés à franchir un deuxième seuil. De plus, la configuration en trapèze enroché offre des conditions qui se sont avérées plus efficaces à débit fort, principalement chez le brochet et la perchaude, qui migrent peu après la débâcle. En effet, il est probable que des pointes de débit soient fréquemment observées après la fonte des neiges ou après une pluie importante. La configuration de seuils en trapèze enroché à débit faible serait donc celle qui conviendrait au plus grand nombre d'espèces, parmi celles utilisées dans cette étude, et qui offre la plus grande versatilité en fonction des conditions de débit. Il s'agit également de la seule configuration qui, en étant modifiée légèrement, pourrait permettre de réduire davantage la dénivellation au seuil, un élément qui s'avère être essentiel à l'amélioration du succès de passage de la perchaude et du crapet-soleil (voir section suivante). Les inondations qui ont eu lieu durant l'expérimentation ont diminué la dénivellation et la vitesse de courant à l'intérieur de ce tronçon, particulièrement lors des essais du grand brochet, de la perchaude et de l'achigan à petite bouche, par contre, le grand brochet et l'achigan à petite bouche ont montré de la facilité à franchir des dénivellations et des vitesses élevées. On peut donc estimer qu'une dénivellation interbassin plus grande ne limiterait pas le passage de ces espèces. Cependant, les seuils de plus de 14 cm semblent limiter le passage de la perchaude et en dehors des périodes d'inondation, la dénivellation interbassin dans les seuils en trapèze enrochés variait entre 12,5 et 16,5 cm à débit faible. Il faudra donc s'assurer de diminuer la dénivellation interbassin pour s'assurer du succès de passage chez cette espèce.

a)

Débit faible	Trapèzes enrochés	Trapèzes non-enrochés	Brèches
Grand brochet	88	75	25
Perchaude	33	0	0
Barbotte brune	80	27	60
Achigan à petite bouche	80	55	70
Crapet soleil	0	0	0

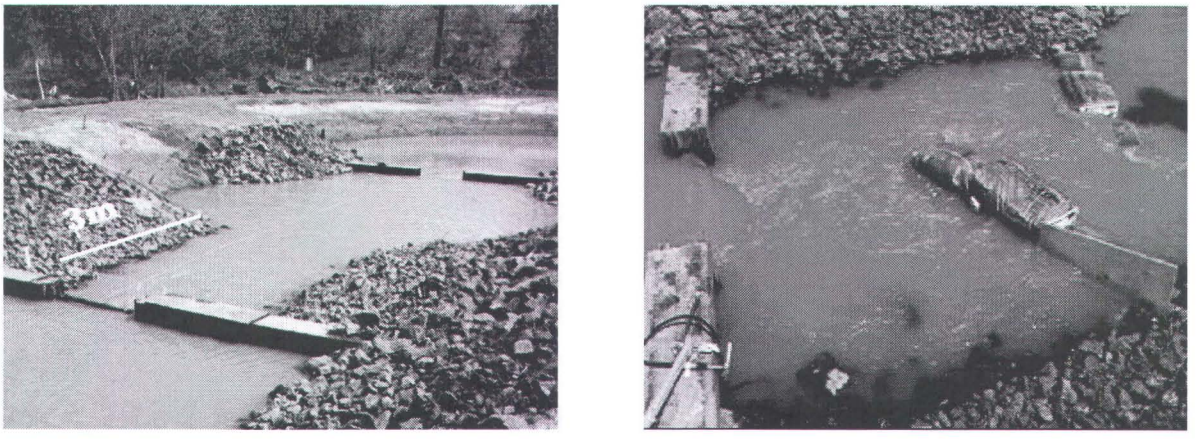
b)

Débit fort	Trapèzes enrochés	Trapèzes non-enrochés	Brèches
Grand brochet	73	35	26
Perchaude	0	0	0
Barbotte brune	28	30	73
Achigan à petite bouche	67	60	70
Crapet soleil	0	0	0

Tableau 6.1 Résumé de l'efficacité de chaque forme de seuil pour chaque espèce, a) à débit fort et b) à débit faible. En noir, les formes de seuils ayant un succès de passage significativement plus élevé que les autres. En blanc, les formes de seuils montrant des succès de passage significativement plus faible que les autres. En gris, les formes de seuils qui ne montrent pas de différences significatives entre elles, mais dont le succès de passage est de plus de 50%. Les succès de passages d'un seuil (en %) sont indiqués dans chaque cas.

6.5 Perspectives

Puisque les seuils en trapèzes enrochés semblent offrir les meilleurs compromis pour l'ensemble des espèces, nous proposons de tester une variante de cette configuration en ajoutant des déflecteurs à l'enrochement actuel et en rehaussant celui-ci jusqu'à la base de l'ouverture du seuil (voir fig. 6.2). Cette modification permettrait de répartir la dénivellation interbassin de 15 cm le long d'une pente douce en méandre, comprenant des zones de repos. En plus de diminuer la dénivellation au seuil, cette variante permettrait également de réduire les vitesses d'écoulement. Lors d'une première expérimentation réalisée à la fin des travaux de 2008, les vitesses mesurées sans déflecteur variaient de 0,44 à 0,62 ms^{-1} avec une moyenne de 0,53 ± 0,13 ms^{-1} et les vitesses mesurées après avoir ajouté des déflecteurs variaient de 0,45 à 0,48 ms^{-1} avec une moyenne de 0,47 ± 0,14 ms^{-1}. Cette modification pourrait vraisemblablement améliorer le succès de passage et mériterait donc d'être explorée plus en détail dans le futur.



a) b)

Figure 6.1 Seuils en trapèze enroché : a) sans déflecteur, vue d'amont et b) avec déflecteur, vue du dessus.

Chapitre VII : Conclusion

Dans un premier temps, cette étude a permis de déterminer quel était le débit optimal afin de maximiser le passage de cinq espèces de poissons non-salmonidés présents à proximité de la passe migratoire du ruisseau de Feu et dont les caractéristiques physiques sont très contrastées. Dans l'ensemble, les espèces testées ont montré un meilleur succès de passage à un débit faible de 0,03 m^3s^{-1} comparativement à un débit fort de 0,05 m^3s^{-1}. Ce résultat permettra de choisir et d'ajuster correctement la pompe qui acheminera l'eau de la rivière des Prairies au marais lorsque l'aménagement sera opérationnel. De plus, la présente étude a permis de tester différentes configurations de seuils afin de déterminer celle qui offre le meilleur succès de passage pour la majorité des espèces non-salmonidés qui fréquenteront la passe. Parmi les trois configurations qui ont été testées, celle utilisant le seuil en trapèze enroché a permis le succès de passage le plus élevé chez la plupart des espèces.

Dans un deuxième temps, le projet a permis de déterminer comment les facteurs hydrauliques (tels que la dénivellation interbassin, la vitesse du courant et le débit) et environnementaux (tels que la température de l'eau et la turbidité) influencent le comportement des poissons et déterminent l'efficacité de la passe migratoire du ruisseau de Feu. Bien que nous n'ayons pas obtenu de relation significative entre le succès de passage et les facteurs hydrauliques et environnementaux, l'analyse révèle que la dénivellation interbassin et la vitesse du courant peuvent devenir limitantes pour le passage des perchaudes et des crapets-soleil, et que le débit, qui a une influence significative sur la vitesse du courant au seuil, est déterminant pour le passage de la plupart des espèces. L'absence de relation claire entre les variables hydrauliques et environnementales suggère que de multiples facteurs ou combinaisons de facteurs agissent simultanément sur la capacité d'un poisson à franchir une structure et qu'il est difficile de filtrer leurs effets individuellement.

La forte turbidité de l'eau observée tout au long de l'étude a également pu défavoriser le succès de passage des espèces visuelles.

L'ensemble des résultats de la configuration «débit faible et seuils en trapèzes enrochés», suggère une amélioration importante du succès de passage des poissons par rapport à ce qui avait été observé dans la passe migratoire de la rivière aux Pins, particulièrement en ce qui concerne le grand brochet, la barbotte brune et l'achigan à petite bouche. De plus amples études plus poussées seront nécessaires afin de quantifier le taux de passage des poissons dans l'ensemble de la passe du ruisseau de Feu.

En comparant l'efficacité de trois configurations de seuils soumis à deux débits différents, ce projet contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine des passes migratoires multi-spécifiques. Le concept développé au ruisseau de Feu possède un fort potentiel d'exportation pour d'autres projets ailleurs au Québec. Le faible coût de construction de la passe (environ 15 000$/seuil ou moins si on n'utilise que des enrochements) constitue également un avantage qui devrait la rendre attrayante.

Nous croyons que des améliorations pourraient encore être apportées à la configuration avec les trapèzes-enrochés en ajoutant des déflecteurs à l'enrochement et en rehaussant celui-ci jusqu'à la base de l'ouverture du seuil. Ceci devrait permettre de diminuer à la fois la dénivellation interbassin et la vitesse du courant au niveau du seuil. Une fois le concept final établi, il sera nécessaire de valider l'attractivité et l'efficacité de l'ensemble de la passe en condition naturelle afin de déterminer si les espèces visées sont capables de trouver l'entrée de la passe et de la franchir sur toute sa longueur afin d'accéder à la zone de marais où elles pourront se reproduire.

Annexe 1 : Classification des milieux humides du Québec

(Buteau et al., 1994; Grondin, 1996)

ANNEXE 2 Dénivellations interbassin

Date	Débit	Tronçon	Dénivelé seuil 1 (cm)	Dénivelé seuil 2 (cm)
20-04-08	Faible	TE	0,0	2,5
21-04-08	Faible	TE	0,0	2,5
24-04-08	Faible	TE	0,0	0,0
25-04-08	Faible	TE	0,0	0,0
20-04-08	Faible	TN	15,0	10,0
21-04-08	Faible	TN	13,1	10,4
24-04-08	Faible	TN	9,7	9,5
25-04-08	Faible	TN	10,3	9,2
20-04-08	Faible	B	13,0	16,5
21-04-08	Faible	B	11,5	15,5
24-04-08	Faible	B	12,9	15,3
25-04-08	Faible	B	13,8	16,4
19-04-08	Fort	TE	0,0	4,0
20-04-08	Fort	TE	0,0	4,0
22-04-08	Fort	TE	0,0	0,0
23-04-08	Fort	TE	0,0	0,0
27-04-08	Fort	TE	0,0	5,5
28-04-08	Fort	TE	0,0	8,9
19-04-08	Fort	TN	5,0	10,0
20-04-08	Fort	TN	5,0	10,0
22-04-08	Fort	TN	11,0	9,0
23-04-08	Fort	TN	11,0	9,0
27-04-08	Fort	TN	14,5	10,5
28-04-08	Fort	TN	15,0	10,0
19-04-08	Fort	B	12,0	15,0
20-04-08	Fort	B	12,0	15,0
22-04-08	Fort	B	12,5	15,0
23-04-08	Fort	B	12,5	15,0
27-04-08	Fort	B	13,5	16,0
28-04-08	Fort	B	13,0	14,0

a) Dénivellation interbassin mesurées au cours des essais sur le grand brochet et la perchaude, du 19 au 27 avril 2008, dans les tronçons avec seuils en trapèze enroché (TE), avec seuils non-enroché (TN) et avec seuil en brèche (B). Les données ont été mesurées au début et à la fin de chaque essai.

Date (jj-mm-aa)	Débit	Tronçon	Dénivelé seuil 1 (cm)	Dénivelé seuil 2 (cm)
01-05-08	Faible	TE	0,0	4,6
02-05-08	Faible	TE	1,2	8,7
06-05-08	Faible	TE	12,5	16,0
07-05-08	Faible	TE	15,3	16,2
09-05-08	Faible	TE	15,2	16,5
10-05-08	Faible	TE	15,2	16,5
01-05-08	Faible	TN	16,8	10,2
02-05-08	Faible	TN	16,1	9,8
06-05-08	Faible	TN	16,6	10,0
07-05-08	Faible	TN	16,2	10,5
09-05-08	Faible	TN	16,2	9,8
10-05-08	Faible	TN	16,2	9,8
01-05-08	Faible	B	12,2	15,1
02-05-08	Faible	B	13,1	16,4
06-05-08	Faible	B	12,5	15,0
07-05-08	Faible	B	12,8	15,6
09-05-08	Faible	B	12,5	15,6
10-05-08	Faible	B	12,5	15,6
02-05-08	Fort	TE	2,5	9,6
03-05-08	Fort	TE	2,5	9,6
07-05-08	Fort	TE	15,9	15,8
08-05-08	Fort	TE	15,9	15,8
10-05-08	Fort	TE	16,1	15,7
11-05-08	Fort	TE	16,1	15,7
02-05-08	Fort	TN	16,5	11,1
03-05-08	Fort	TN	16,5	11,1
07-05-08	Fort	TN	16,2	10,2
08-05-08	Fort	TN	16,2	10,2
10-05-08	Fort	TN	16,4	10,2
11-05-08	Fort	TN	16,4	10,2
02-05-08	Fort	B	13,5	15,6
03-05-08	Fort	B	13,5	15,6
07-05-08	Fort	B	13,1	15,6
08-05-08	Fort	B	13,1	15,6
10-05-08	Fort	B	13,1	15,6
11-05-08	Fort	B	13,1	15,6

b) Dénivellation interbassin mesurées au cours des essais sur la barbotte brune, du 1er au 11 mai 2008, dans les tronçons avec seuils en trapèze enroché (TE), avec seuils non-enroché (TN) et avec seuil en brèche (B). Les données ont été mesurées au début et à la fin de chaque essai.

Date (jj-mm-aa)	Débit	Tronçon	Dénivelé seuil 1 (cm)	Dénivelé seuil 2 (cm)
24-04-08	Faible	TE	0,0	0,0
25-04-08	Faible	TE	0,0	0,0
01-05-08	Faible	TE	0,0	4,6
02-05-08	Faible	TE	1,2	8,7
24-04-08	Faible	TN	9,7	9,5
25-04-08	Faible	TN	10,3	9,2
01-05-08	Faible	TN	16,8	10,2
02-05-08	Faible	TN	16,1	9,8
24-04-08	Faible	B	12,9	15,3
25-04-08	Faible	B	13,8	16,4
01-05-08	Faible	B	12,2	15,1
02-05-08	Faible	B	13,1	16,4
27-04-08	Fort	TE	0,0	5,5
28-04-08	Fort	TE	0,0	8,9
02-05-08	Fort	TE	2,5	9,6
03-05-08	Fort	TE	2,5	9,6
27-04-08	Fort	TN	14,5	10,5
28-04-08	Fort	TN	15,0	10,0
02-05-08	Fort	TN	16,5	11,1
03-05-08	Fort	TN	16,5	11,1
27-04-08	Fort	B	13,5	16,0
28-04-08	Fort	B	13,0	14,0
02-05-08	Fort	B	13,5	15,6
03-05-08	Fort	B	13,5	15,6

c) Dénivellation interbassin mesurées au cours des essais sur l'achigan à petite bouche, du 24 avril au 3 mai 2008, dans les tronçons avec seuils en trapèze enroché (TE), avec seuils non-enroché (TN) et avec seuil en brèche (B). Les données ont été mesurées au début et à la fin de chaque essai.

Date (jj-mm-aa)	Débit	Tronçon	Dénivelé seuil 1 (cm)	Dénivelé seuil 2 (cm)
09-05-08	Faible	TE	15,2	16,5
10-05-08	Faible	TE	15,2	16,5
12-05-08	Faible	TE	15,2	16,5
13-05-08	Faible	TE	15,2	16,5
09-05-08	Faible	TN	16,2	9,8
10-05-08	Faible	TN	16,2	9,8
12-05-08	Faible	TN	16,2	9,8
13-05-08	Faible	TN	16,2	9,8
09-05-08	Faible	B	12,5	15,6
10-05-08	Faible	B	12,5	15,6
12-05-08	Faible	B	12,5	15,6
13-05-08	Faible	B	12,5	15,6
10-05-08	Fort	TE	16,1	15,7
11-05-08	Fort	TE	16,1	15,7
13-05-08	Fort	TE	16,1	15,7
14-05-08	Fort	TE	16,1	15,7
10-05-08	Fort	TN	16,4	10,2
11-05-08	Fort	TN	16,4	10,2
13-05-08	Fort	TN	16,4	10,2
14-05-08	Fort	TN	16,4	10,2
10-05-08	Fort	B	13,1	15,6
11-05-08	Fort	B	13,1	15,6
13-05-08	Fort	B	13,1	15,6
14-05-08	Fort	B	13,1	15,6

d) Dénivellation interbassin mesurées au cours des essais sur le crapet-soleil, du 9 au 14 mai 2008, dans les tronçons avec seuils en trapèze enroché (TE), avec seuils non-enroché (TN) et avec seuil en brèche (B). Les données ont été mesurées au début et à la fin de chaque essai.

Bibliographie

AALTO S. I. & NEWSOME G. E. (BUCK). (1990). Additional evidence supporting demic behaviour of a yellow perch (*Perca flavescens*) population. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **47**: 1 959-1 962.

AARESTRUP K., LUCAS M. C. & HANSEN J. A. (2003). Efficiency of a nature-like bypass channel for sea trout (*Salmo trutta*) ascending a small Danish stream studied by PIT telemetry. *Ecology of Freshwater Fish* **12:** 160-168.

ALVAREZ-VAZQUEZ L.J., MARTINEZ A., VAZQUEZ-MENDEZ M.E. & VILAR M.A. (2008). An optimal shape problem related to the realistic design of river fishways, *Ecological Engineering* **32**: 293–300.

ASCE HYDROPOWER TASK COMMITTEE (2007). Civil works for hydroelectric facilities. *American Society of Civil Engineers Publication,* p.172-185.

BARNAUD G. & FUSTEC E. (2007). Conserver les zones humides: pourquoi? Comment?. *Ed. Educagri*, 295p.

BARTHEL B. L., COOKE S. J., SVECK J. H., SUSKI C. D., BUNT C. M., PHELAN F. J. S. & PHILIPP D. P. (2008). Divergent life histories among smallmouth bass *Micropterus dolomieu* inhabiting a connected river–lake system. *Journal of Fish Biology* **73**: 829–852.

BATZER D. P. & SHARITZ R. R. (2006). Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands. *University of California Press*, Berkeley and Los Angeles, 568 p.

BAUMGARTNER LEE J. ET HARRIS JOHN H. (2007). Passade of non-salmonid fish through a deelder lock on a lowland river. *River Research and Applications* **23**: 1058–1069.

BEAMISH F. W. H. (1978). Swimming capacity. In *Fish Physiology: Locomotion*, Vol. 7 (ed. Hoar, W. S. & Randall, D. J.,) *New York: Academic Press*, p. 101–187.

BERNATCHEZ L. & GIROUX M. (2000). Les poissons d'eau douce du Québec et leur répartition dans l'est du Canada. *Ed. Broquet*, Ottawa, p. 210-211.

BRODEUR P., MINGELBIER M., & MORIN J. (2004). Impacts des variations hydrologiques sur les poissons des marais aménagés du Saint-Laurent fluvial. *Le Naturaliste Canadien* **128** : 66-77.

BRODEUR P., MINGELBIER M. & BERGERON N. (2007). Attractiveness and passage efficiency of two vertical slot fishways for non-salmonids in a temperate

system, St. Lawrence River, Canada. *Proceedings of the 6th International Symposium on Ecohydraulics, Christchurch, New-Zealand.*

BURNS J. R. (1976). The Reproductive Cycle and Its Environmental Control in the Pumpkinseed, *Lepomis gibbosus* (Pisces: *Centrarchidae*). *American Society of Ichthyologists and Herpetologists* **3**: 449-455.

BUTEAU P., DIGNARD N. & GRONDIN P. (1994). Système de classification des milieux humides du Québec. *Ministère de l'énergie, des mines et des ressources du Canada et Ministère des ressources naturelles du Québec*, 25 p.

CASSELMAN J. M. & LEWIS C. A. (1996). Habitat requirements of northern pike (*Esox lucius*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* **53**: 161-174.

CALLES E. O. & GREENBERG L. A. (2007). The use of two nature-like fishways by some fish species in the Swedish River Eman. *Ecology of Freshwater Fish* **16**: 183-190.

CASTRO-SANTOS T., HAROS A. & WALK S. (1996). A passive integrated transponder (Pit) tag system for monitoring fishways. *Fisheries Research* **28**: 253-261.

CECH M., PETERKA J., RIHA M., JUZA T. & KUBECK J. (2009). Distribution of egg strands of perch (*Perca fluviatilis* L.) with respect to depth and spawning substrate. *Hydrobiologia* **630**: 105–114.

CHAMPAGNE J. & MELANÇON M. (1985). Milieux humides de la région de Montréal 1966-1981. *Direction Générale des Terres, Environnement Canada, Ottawa,* 21 p.

COOKE S. J., KASSLER T. W. & PHILIPP D. P. (2001) Physiological performance of largemouth bass related to local adaptation and interstock hybridization: implications for conservation and management *Journal of Fish Biology,* **59:** 248-268.

COUILLARD L. & GRONDIN P. (1986). La végétation des milieux humides du Québec. *Les Publication du Québec*, 400 p.

CRAIG J. F. (2008). A short review of pike ecology. *Hydrobiologia* **601** : 5-16.

DEDUAL M. (2002). Vertical distribution and movements of brown bullhead (*Ameiurus nebulosus* Lesueur 1819) in Motuoapa Bay, southern Lake Taupo, New Zealand. *Hydrobiologia* **483**: 129–135.

DENIL G., 1909. Les échelles à poissons et leur application aux barrages de Meuse et d'Ourthe. *Bull. Acad. Sci. Belg.*, p. 1221-1224.

DEPARTMENT OF INDUSTRY & INVESTMENT OF NEW SOUTH WALES, AUSTRALIA (2005). Fishways. http://www.dpi.nsw.gov.au/fisheries/habitat/rehabilitating/fishways.

DIANA J. S. (1980). Diel activity pattern and swimming speeds of northern pike *(Esox lucius*) in Lac Ste. Anne, Alberta. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* **37:** 1454-1458.

GIBBON J. W. & ANDREWS K. M. (2004). Pit Tagging : Simple Technology at its best. *BioScience* **54**: 447- 454.

GLOVER D. C., DETTMERS J. M., WAHL D. H. & CLAPP D. F. (2008). Yellow perch (*Perca flavescens)* stock structure in Lake Michigan: an analysis using mark-recapture data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* **65**: 1919-1930.

GRONDIN P. (1996). Les milieux humides du Québec, Document de support au bilan de la biodiversité du milieu forestier. *Ministère des Ressources naturelles du Québec*, 30 p.

HAMMER C. (1995). Fatigue and exercise tests with fish. *Camp. Biochem. Physiol.* **112A**: 1-20.

HANSON K.C., HASLER C.T., COOKE S.J., SUSKI C.D., & PHILIPP D.P. (2008). Intersexual variation in the seasonal behavior and depth distribution of a freshwater temperate fish, the largemouth bass. *Canadian Journal of Zoology* **86**: 801–811.

HARPER D.G. & BLAKE R. W. (1990). Fast-start performance of rainbow trout *Salmo gairdneri* and northern pike *Esox lucius*. *The Journal of Experimental Biology* **150:** 321-342.

HARO A., ODEH M., CASTRO-SANTOS T. & NOREIKA J. (1999). Effect of slope and headpond on passage of American shad and blueback herring through simple Denil and deepened Alaska steeppass fishway. *North American Journal of Fisheries Management* **19**: 51-58.

HEJNY S. & SEGAL S. (1998). General Ecology of Wetland in: Westlake D.F, Kvet, J., ET SZCZEPANSKI, S.: The Production Ecology of Wetland. *Cambridge University Press*, 568 p.

JEAN M., CHAMPOUX O. & MORIN J. (2001). Impacts of water level fluctuations on wetlands: Repentigny to Trois-Rivières. *Environnement Canada,* 69 p.

JEPSEN N., BECK S., SKOV C. & KOED A. (2001). Behavior of pike (*Esox lucius* L.) >50 cm in a turbid reservoir and in a clearwater lake. *Ecology of Freshwater Fish* **10**: 26–34.

JOHNSTON P., BERGERON N. E., BÉRUBÉ M. & ROY R. (2009). Revue des méthodes de suivi du déplacement des poissons en rivière. *Rapport interne,* 47 p.

JOHNSTON P., BÉRUBÉ F. & BERGERON N. E. (2009b). Development of a flatbed passive integrated transponder antenna grid for continuous monitoring of fishes. *Journal of Fish Biology* **74**: 1651–1661.

JUNGWIRTH M. (1996) Bypass channels at weirs as appropriate aids for fish migration in rhithral rivers. *Regulated Rivers-Research & Management* **12**: 483-492.

KAMULA, R. (2001). Flow over weirs with application to fish passage facilities. *Academic Dissertation to be presented with the assent of the Faculty of Technology, University of Oulu, for public discussion in Kajaaninsali, Linnanmaa,* 113 p.

KNEAPKEN G., BAEKLANDT K. & EENS M. (2006). Fish pass effectiveness for bullhead (*Cottus gobio*), perch (*Perca fluviatilis*) and roach (*Rutilus rutilus*)in a regulated lowland river. *Ecology of Freshwater Fish* **15:** 20-29.

KOED A., BALLEBY K., MEJLHEDE P. & AARESTRUP K. (2006). Annual movement of adult pike (*Esox lucius* L.) in a lowland river. *Ecology of Freshwater Fish* **15**: 191-199.

KOBLER A., KLEFOTH T. & ARLINGHAUS R. (2008). Site fidelity and seasonal changes in activity centre size of female pike *Esox lucius* in a small lake. *Journal of Fish Biology* **73**: 584–596.

LECLERC, J. (1984). Marquage et repérage télémétriques de 11 espèces de poisson du territoire central du projet Archipel entre octobre 1982 et août 1983. Synthèse des résultats. Collection Poissons 5. *Ministère du Loisir, de la Chasse et de la pêche,* Montréal, 63 p.

LECLERC É., MAILHOT Y., MINGELBIER M. & BERNATCHEZ L. (2008). The landscape genetics of yellow perch (*Perca flavescens*) in a large fluvial ecosystem. *Molecular Ecology* **17**: 1702–1717.

LONG J. H., MCHENRY M. J. Jr & BOETTICHER N. C. (1994). Undulatory swimming: how traveling waves are produced and modulated in sunfish (*Lepomis gibbosus). Journal of Experimental Biology* **192**: 129–145.

LUCAS M. C., MERCER T., ARMSTRONG J. D., McGINTY S. & RYCROFT P. (1999). Use of a flat-bed passive integrated transponder antenna array to study the

migration and behavior of lowland river fishes at a pass. *Fisheries Research* **44**: 183-191.

LUPANDIN A. I. (2005). Effect of Flow Turbulence on Swimming Speed of Fish, *Biology Bulletin* **32**: 461–466.

MAGNHAGEN C. & BORCHERDING J. (2008). Risk-taking behaviour in foraging perch: does predation pressure influence age-specific boldness? *Animal Behaviour* **75**: 509-517.

MALLEN-COOPER M. & BRAND D.A. (2007). Non-salmonids in a salmonid fishway: what do 50 years of data tell us about past and future fish passage. *Fisheries Management and Ecology* **14** : 319–332.

MASSÉ, G., R. FORTIN, P. DUMONT et J. FERRARIS, 1988. Étude et aménagementde la frayère multispécifique de la rivière aux Pins et dynamique de la population de Grand brochet *Esox lucius* L., du fleuve Saint-Laurent, Boucherville, Québec. *Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche*, Montréal, 224 p.

MELANÇON C. (2006). Les poisons de nos eaux, 4iem édition. *Guérin, Montréal*, 455 p.

MICHAUD A. (2007). Design Biologique du Marais de la Branche 7. *Rapport interne pour Canards Illimités*, 9 p.

MINGELBIER M., BRODEUR P., & MORIN J. (2005). Recommandations concernant les poissons et leurs habitats dans le Saint-Laurent fluvial et évaluation des critères de régularisation du système lac Ontario – Saint-Laurent. *Ministère des Ressources naturelles et de la faune, Direction de la recherche sur la faune*, 141 p.

MINGELBIER, M., P. BRODEUR & J. MORIN. 2008. Spatially explicit model predicting the spawning habitat and early stage mortality of Northern pike (*Esox lucius*) in a large system: the St. Lawrence River between 1960 and 2000. Hydrobiologia 601 : 55-69.

MITSCH W. J. & GOSSELINK J. G. (1993). Wetlands. *New York, International Thomson Publishing*, 722 p.

MITSCH W. J., ZHANG L., ANDERSON C. J., ALTOR A. E. & HERNANDEZ M. E. (2005). Creating riverine wetlands: Ecological succession, nutrient retention, and pulsing effects. *Ecological Engineering* **25**: 510–527.

MOYLE P. B. & CECH J. J. Jr (2004). Fishes, an introduction to ichthyology *Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New-Jersey*, p.31-35.

NELSON J. A. (1989). Critical swimming speeds of yellow perch *Perca flavescens:* comparaison of populations from a naturally acidic lake and a circumneutral lake in acid and neutral water *Journal of Experimental Biology* **145**: 239-254.

OUELLET V. (2005). Modélisation des impacts des fluctuations de niveau d'eau sur la survie hivernale du rat musqué (*Ondatra zibethicus*), espèce déterminante dans la dynamique des milieux humides. *Mémoire de maîtrise, INRS-ETE*, 203 p.

PAVLOV D.S., SBIKIN Y.N., VASHCHINNIKOV A.E. & MOCHEK A.D. (1972). The effect of light intensity and water temperature on current velocities critical to fish. *Voprosy Ikhtiologii* **12**: 769–778.

PEAKE S. (2004). An Evaluation of the Use of Critical Swimming Speed for Determination of Culvert Water Velocity Criteria for Smallmouth Bass. *Transactions of the American Fisheries Society* **133**: 1472–1479.

PEAKE S. (2008). Behavior and Passage Performance of Northern Pike, Walleyes,and White Suckers in an Experimental Raceway. North American Journal of Fisheries Management **28**:321–327.

PEAKE S., FARRELL A. P. (2004). Locomotory behaviour and post-exercise physiology in relation to swimming speed, gait transition and metabolism in free-swimming smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*). *The Journal of Experimental Biology* **207**: 1563-1575.

PROGRAMME DE SURVEILLANCE DE L'UTILISATION DES TERRES (PSUT) (1985). Milieux humides le long du fleuve Saint-Laurent 1950-1978. *Direction Générale des terres, Environnement Canada*, 29 p.

PODDUBNY A. G., MALININA L. K. & V. V. GAIDUK (1970). Experiment in telemetric observations under ice of the behavior of wintering fish. *Biol. Vnutr. Vod Inf. Byull.* **6**: 65-70. *(Fish. Res. Board Can. Transl. Ser. No. 1817).*

SANTOS J. M., FERREIRA M. T., GODINHO F. N. & BOCHECHAS J. (2005). Efficacy of a nature-like bypass channel in a Portuguese lowland river. *Journal of Applied Ichthyology* **21**: 381–388.

SCOTT W. B. & CROSSMAN E. J. (1974). Poissons d'eau douce du Canada. *Ministère de l'Environnement, Service des Pêches et des Sciences de la Mer, Ottawa*, 1026 p.

SHERMAN M. L. & MOORE P. A. (2001). Chemical orientation of brown bullheads, *Ameiurus nebulosus*, under different flow conditions. *Journal of Chemical Ecology* **27**: 2301-2318.

STAKENAS S., COPP G. H. & SCOTT D. M. (2009). Tagging effects on three non-native fish species in England (*Lepomis gibbosus, Pseudorasbora parva, Sander lucioperca*) and of native *Salmo trutta*. *Ecology of Freshwater Fish* **18**: 167–176.

TARDIF D., GLÉMET H., BRODEUR P., ET MINGELBIER M. (2005). RNA/DNA ratio and total length of yellow perch (*Perca flavescens)* in managed and natural wetlands of a large fluvial lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatics Sciences* **62**: 2211–2218.

THORPE J.E., 1977 Morphology, physiology, behavior, and ecology of *Perca fluviatilis* L. and *P. flavescens* Mitchill. *Journal of the Fisheries and Research Board of Canada* **34**: 1504-1514.

TUDORACHE C., VIAENE P., BLUST R., VEREECKEN H. & DE BOECK L. G. (2008). A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species, *Ecology of Freshwater Fish* **17**: 284–291.

VEHANEN T., HYVARINEN P., JOHANSSON K. & LAAKSONEN T. (2006). Patterns of movement of adult northern pike (*Esox lucius* L.) in a regulated river. *Ecology of Freshwater Fish* **15**: 154–160.

VILLE DE TERREBONNE (2008). Plan de conservation et de mise en valeur du ruisseau de Feu. *Rapport interne*, 72 p.

WILDMAN L., PARASIEWICZ P., KATOPODIS C. & DUMONT U. (2003). An Illustrative Handbook on Nature-Like Fishway-Summarized Version. *American River Publication,* 21 p.