



Université François Rabelais
UFR SCIENCES ET TECHNIQUES
Parc de Grandmont
Avenue Monge 37041 TOURS cedex 1

Comparaison d'efficacité de montaison pour différentes configurations dans une passe à poissons à fentes verticales

**Rapport de stage réalisé par François-Marie Chambon pour l'obtention du
master professionnel Géo-hydrosystèmes Continentaux en Europe**



LEA

Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques

CNRS-UMR 6609

SP2MI Téléport 2

Boulevard Marie et Pierre Curie-BP 30179

86962 Futuroscope Chasseneuil



ONEMA

Délégation Interrégionale de Poitiers

112, Faubourg de la Cueilie

86000 Poitiers

Maître de stage

Laurent David

Professeur à l'Université de Poitiers

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon responsable de stage, Laurent David, Professeur à l'Université de Poitiers, pour son aide précieuse tout au long de mon stage.

Merci aussi à Philippe Baran, ingénieur au pôle écohydraulique de l'ONEMA et Michel Larinier, Docteur-Ingénieur à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse pour leurs remarques pertinentes concernant les expériences, et le stockage des poissons.

Je tiens également à remercier Alain Texier, Professeur à l'Université de Poitiers pour ses conseils avisés.

Merci à Alain Lemoine et Claude Boisson, pour leur gentillesse et leur aide pour la recherche de poissons.

Merci à Jean-Paul Boureau, pour l'approvisionnement en poissons tout au long des expériences.

Merci à toute l'équipe des techniciens du laboratoire qui ont conçu et réalisé le montage expérimental sur lequel j'ai effectué mes mesures. Je remercie aussi Sébastien, Vincent et Francis. Merci pour leur aide et leur patience.

Je remercie enfin tous les doctorants et stagiaires, Julien, Joseph, Romain, Malik, Jérôme, Christophe, Hicham, Boni, David, Jean-Charles, Marie et Michel pour leur accueil au sein du laboratoire et pour les excellents moments passés ensemble.

Sommaire

RESUME

ABSTRACT

INTRODUCTION

I) RESTAURATION ET REGLEMENTATION DE LA CONTINUITE ECOLOGIQUE

- I) 1) Connectivité, continuité écologique et fonctionnement des écosystèmes**
- I) 2) Impacts des aménagements sur la continuité écologique des cours d'eau**
- I) 3) Notions de restauration de la continuité et d'atténuation des impacts**
- I) 4) Continuité écologique et réglementation**

II) CONTEXTE ET PRESENTATION DU MODELE PHYSIQUE

- II) 1) Principe de fonctionnement des dispositifs de franchissement**
- II) 2) Présentation du pilote**

III) METHODOLOGIE

- III) 1) Paramètres expérimentaux**
- III) 2) Matériels biologiques**
- III) 4) Expériences**
- III) 5) Présentation et analyse des résultats**

IV) RESULTATS

- IV) 1) Comportement des poissons**
- IV) 2) Analyse descriptive**
- IV) 3) Analyse statistique des données**

V) DISCUSSION

CONCLUSION GENERALE

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Résumé

La continuité écologique est un élément essentiel du fonctionnement des écosystèmes d'eau courante. Cette notion a été reprise dans différentes réglementations dont la Directive Cadre sur l'Eau et la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques de décembre 2006. Elle a été définie comme la libre circulation des sédiments et des espèces biologiques. Ce sont les barrages qui constituent aujourd'hui les principaux obstacles à la continuité écologique. Afin d'assurer l'atténuation de leurs impacts, différentes solutions techniques ont été développées permettant le passage des poissons, notamment les passes à bassins de type fente verticale. Afin de faire progresser les connaissances sur l'efficacité de ce type de dispositif, des recherches croisant l'hydraulique et la biologie des poissons sont conduites sur des prototypes à échelle réduite notamment au sein du Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques de Poitiers.

Une série d'expérimentations a été conduite sur le prototype. Elles ont permis de quantifier l'influence de différentes configurations sur le franchissement par les poissons. Le nombre de passages de poissons au travers des bassins de la passe ainsi que les temps de passage ont représenté les variables biologiques analysées. La réduction de la largeur des bassins constitue un élément très défavorable au franchissement de la passe. En revanche, l'installation de cylindres dans les bassins influence assez peu l'efficacité du dispositif. Seule la présence d'un gros cylindre en aval du jet de la fente permet-elle de diminuer le temps de passage des poissons. L'installation de 3 petits cylindres dans des positionnements choisis (en ligne et en triangle) perturbe le franchissement des poissons.

Des difficultés expérimentales tant du point de vue du stockage des poissons que du comportement (mouvements de dévalaison dans la passe) ont été observées.

Les recherches doivent être poursuivies en travaillant plus précisément sur les comportements des poissons et sur le positionnement des cylindres, en vue d'améliorer l'efficacité des dispositifs de franchissement.

Mots clés : continuité écologique, passe à poissons à fente verticale

Abstract

The ecological continuity is a key-factor for the health of river ecosystem. This concept was integrated into the European Water Framework Directive and the French Law for Water and Aquatic Ecosystems. It corresponds to the free passage of sediment and biological species. Dams are the most important problem for the ecological continuity. The mitigation measures of these impacts exist with the built of fish pass and particularly the vertical slot fish passes. These technologies need researches crossing hydraulic knowledge and the biology of fish conducting in experimental flume like in the Laboratory of Aerodynamic studies of Poitiers.

Different experiments were conducted on this flume. The influence of the different configurations was tested on the number and time of fish passages across the flume. The reduction of width had a great influence on the fish pass efficiency. In contrast, the presence of different cylinders did not greatly modify the fish passages only for the time with a big cylinder configuration. When three small cylinders were installed, the efficiency for fish passage strongly decreased.

Experimental difficulties with the harvest of fish and also with the behaviour (particularly with the downstream movements of fish in the ladder) were observed.

Researches need to follow with more attention on the fish behaviour and also on the position of the cylinders to improve the fish pass efficiency.

Key words : ecological continuity, vertical slot fishways.

Introduction

Le bon état écologique des cours d'eau, visé par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), intègre la notion essentielle de continuité écologique entre les habitats, indispensable au bon déroulement du cycle biologique des espèces. Au sens de la directive, la continuité écologique est définie comme étant la libre circulation des organismes aquatiques et des sédiments.

Les cours d'eau sont des axes de circulation continus où l'eau constitue le support de l'essentiel des transferts et déplacements participant au fonctionnement et à l'équilibre des milieux aquatiques. La connectivité des habitats aquatiques intervient largement dans le déplacement des organismes vivants (généralement actifs) mais aussi dans toutes les autres formes de transport (généralement passives) : sédiments, éléments trophiques, substances toxiques. Ainsi la continuité écologique du réseau joue un rôle déterminant dans tous les processus qui régissent le fonctionnement de l'écosystème aquatique. La définition la plus conforme intègre donc l'ensemble des organismes aquatiques concernés par la continuité au sens large : les macro-invertébrés, les poissons, les batraciens et les crustacés.

La continuité écologique et la connectivité des habitats au sein du système fluvial jouent un rôle important dans le maintien de la diversité génétique des populations. Il s'agit également d'un facteur essentiel pour la survie et le maintien des communautés vivantes face aux perturbations accidentelles. Cette fonctionnalité du milieu permet aux poissons, mais aussi à d'autres organismes vivants, de répondre aux modifications d'habitats et aux altérations anthropiques : accès à des habitats refuges et possibilité de recolonisation du milieu après les épisodes de crise (pollution, sécheresse, crues ...).

Les ouvrages transversaux aménagés dans le lit des cours d'eau ont des effets cumulés très importants sur l'état et le fonctionnement des milieux aquatiques. Ces ouvrages font obstacle au libre écoulement des eaux et des sédiments, à la dynamique fluviale, à la libre circulation des espèces aquatiques. Outre leurs effets d'obstacles, ces ouvrages de retenues accentuent l'eutrophisation, le réchauffement des eaux et réduisent fortement la richesse des habitats et peuplements aquatiques (banalisation, perte de diversité hydrodynamique, colmatage...).

Dans le domaine biologique, les poissons sont des indicateurs privilégiés de la connectivité et de la continuité du milieu aquatique. En effet, pour accomplir leur cycle vital, ceux-ci évoluent à l'échelle d'une entité hydrographique plus ou moins étendue, allant de la dimension des contextes piscicoles des peuplements holobiotiques (improprement qualifiés de « sédentaires »), jusqu'au bassin entier pour les peuplements de grands migrateurs. Toutes les espèces piscicoles se déplacent à la recherche du bon habitat pour se nourrir, pour s'abriter et pour se reproduire. Leurs exigences de milieux et leur sensibilité aux ruptures de continuité sont particulièrement fortes en période de reproduction. Qu'il s'agisse de la connectivité des zones inondables dans les contextes aval occupés par les peuplements cyprino-ésocicoles (cyprinidés et brochet) ou de la continuité longitudinale impliquant le chevelu hydrographique dans les contextes salmonicoles, la fonctionnalité des connexions conditionne la survie des populations les plus fragiles (truites, saumons, brochets...). Ces espèces indicatrices sont d'autant plus dépendantes de la qualité de leurs habitats de reproduction qu'elles sont moins

fécondes que les autres, d'où le caractère vital de la continuité du réseau pour leur maintien et leur développement.

Parmi la population piscicole, les témoins privilégiés de ces effets sont les poissons migrateurs, indicateurs de l'état de santé des cours d'eau et de l'intégrité des bassins versants. En effet, outre l'accessibilité de leurs habitats de croissance et de reproduction, la restauration des populations de poissons migrateurs est avant tout conditionnée par la disponibilité, la qualité et la fonctionnalité des habitats au sein du continuum fluvial. A cet égard, les milieux essentiels correspondent en particulier au lit des cours d'eau à écoulement libre pour les espèces qui se reproduisent en eau douce ainsi qu'en zones humides. C'est à ce titre que les poissons migrateurs constituent des indicateurs caractéristiques de l'intégrité et du bon état de l'écosystème fluvial. Reconstituer les effectifs à travers la restauration de la continuité écologique et de la qualité des cours d'eau, voire empêcher la disparition totale de certains des migrateurs sont donc des enjeux essentiels.

Ces objectifs peuvent être en partie réalisés grâce aux dispositifs de franchissement. Ceux-ci visent à minimiser les impacts de l'équipement hydraulique sur le cycle biologique des migrateurs. L'un de ces dispositifs, la passe à fentes verticales, est étudié au Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques (LEA), afin de déterminer l'efficacité relative de diverses configurations.

Le Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques exerce dans le domaine de la mécanique des fluides et de l'aérodynamique dans l'hypothèse d'incompressibilité ou au contraire avec effets de compressibilité. Ses activités de recherche s'appuient sur des installations expérimentales conséquentes et font appel à des techniques de mesure et d'analyse variées et sophistiquées.

Les travaux du mécanicien des fluides et de l'aérodynamicien dans ces secteurs sont associés à des enjeux de société importants. On peut notamment citer les thèmes fondamentaux que représentent la sécurité des passagers et le respect de l'environnement par la réduction des émissions polluantes et des nuisances sonores dans les transports.

A ce titre, le LEA est fortement impliqué dans différents programmes de recherche nationaux et internationaux ainsi que dans les pôles de compétitivité, et mène des activités de recherche participant à des axes prioritaires affichés dans le cadre de la politique régionale de recherche.

Les activités du laboratoire sont ainsi organisées depuis le 1er janvier 2004 sur la base de 7 opérations de recherche (OP). L'OP 2, concernant l'Aéro-Hydrodynamique, est celle au sein de laquelle j'ai réalisé mon étude, en partenariat avec l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).

L'objectif de ce travail fut de réaliser des tests d'efficacité de montaison sur une passe à poissons à échelle réduite, possédant des caractéristiques géométriques variables, telles que la largeur des bassins ou bien encore la présence ou l'absence de cylindres en nombre et taille variables. Ces tests furent réalisés à l'aide de différentes espèces de poissons, ciblées par rapport à leurs caractères morphologiques. Ces tests ont permis d'une part de valider les résultats obtenus dans des études réalisées préalablement (Tarrade, 2007 ; Boisson, 2006) à l'aide d'un nombre de poissons plus important, d'autre part de tester de nouvelles configurations, déterminées à l'aide de la méthode de visualisation par traceurs solides.

La première partie de mon travail a consisté à considérer les différentes composantes de la continuité, définie et imposée par la DCE.

Par la suite, j'ai consulté les documents existants sur les différents modèles de passes à poissons, me permettant ainsi de comprendre leur fonctionnement et leurs caractéristiques.

Connaissant les spécificités du type de passe à poisson présente dans le laboratoire, une méthodologie concernant le déroulement des expérimentations et le stockage des poissons fut ensuite proposée. Cette méthodologie s'est avérée nécessaire face à la gestion d'un nombre considérable de poissons, et à la sensibilité de ceux-ci en présence de conditions expérimentales différentes.

A l'issue de cette phase de recherche de conditions optimales, des tests à l'aide de poissons ont été réalisés sur plusieurs configurations. L'obtention des poissons nécessaires aux tests s'est faite d'une part par l'intermédiaire d'un pisciculteur pour l'approvisionnement en truites, d'autre part par des pêches électriques, contrôlées par le personnel de l'ONEMA. Outre les espèces, les tailles des individus furent considérées, afin de proposer des solutions non seulement pour les individus de taille relativement grande favorisés lors du franchissement d'obstacle, mais aussi pour les petits individus, les plus affectés par les atteintes à la continuité écologique.

A l'issue des tests, les données acquises ont été recensées, traitées puis analysées, dans l'objectif d'être en mesure de comparer clairement les différentes solutions proposées, afin de déterminer les plus favorables pour le franchissement des poissons.

I) Restauration et réglementation de la continuité écologique

Le fonctionnement des écosystèmes d'eaux courantes repose sur un ensemble de relations physiques et biologiques qui s'établissent au sein même du cours d'eau mais également avec le bassin versant et la plaine alluviale à des échelles spatiales et temporelles très différentes (Hynes, 1970 ; Junk *et al.*, 1989, Ward et Stanford, 1989). Ces relations, indispensables au maintien et à l'équilibre des communautés biologiques, s'appuient entre autre sur le déplacement d'éléments physiques ou d'organismes vivants.

La notion de continuité, définie dans la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, permet d'appréhender ces déplacements tant du point de vue de leurs mécanismes que de leurs conséquences écologiques.

Au vu des enjeux associés à cette notion de continuité écologique en terme de conservation des espèces et d'atteinte du bon état des masses d'eau, il apparaît nécessaire de rappeler les fondements hydromorphologiques et biologiques liés à cette notion.

Les notions de connectivité et de continuité sont abordées, en relation avec le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Par la suite, la continuité des éléments physiques et des organismes biologiques seront considérés, les perturbations de la continuité et les mesures d'atténuation et de restauration seront décrites. L'approche réglementaire de la continuité écologique clôturera ce chapitre.

I) 1) Connectivité, continuité écologique et fonctionnement des écosystèmes

La diversité des biotopes joue un rôle capital non seulement vis-à-vis de la richesse biologique des écosystèmes mais aussi et surtout vis-à-vis de leur capacité de résilience face aux changements qu'ils soient d'origine climatique ou anthropique (Allan, 1995; Palmer *et al.*; 1996; Palmer et Poff, 1997).

I) 1) 1) Composantes de la connectivité

La connectivité correspond aux relations et aux déplacements des éléments physiques ou biologiques au cours du temps et à différentes échelles d'espace (Ward et Stanford, 1989). Elle peut être séparée en deux composantes (Baudry *et al.*, 1998) :

- la composante structurelle qui correspond à la forme, la taille et la position relative des biotopes,
- la composante fonctionnelle qui décrit la réponse des individus à cette diversité de structure en terme de mouvement et de dispersion.

I) 1) 1) 1) Composante structurelle

La composante structurelle de la connectivité repose donc sur :

- un réseau diversifié et plus ou moins continu de biotopes reliés par des corridors favorables aux déplacements des espèces,
- des mécanismes physiques capables d'assurer le renouvellement de cette diversité de biotopes.

I) 1) 1) 2) Composante fonctionnelle

La composante fonctionnelle s'appuie, elle, sur les possibilités d'accès pour les espèces à cette diversité d'habitats c'est-à-dire sur les possibilités de déplacements à différentes échelles d'espace et de temps.

La connectivité constitue donc un terme général recoupant à la fois la diversité des habitats, leurs organisations spatiales, leur degré de fragmentation et de relation, leurs mécanismes de renouvellement ainsi que les déplacements des organismes vivants.

I) 1) 2) Les différents types de continuité

La continuité peut être, elle, restreinte aux seuls déplacements des éléments abiotiques et des organismes vivants.

En terme de milieux aquatiques d'eau courante, le besoin de diversité et d'accès aux habitats passe prioritairement par la continuité :

- du flux hydrique,
- des flux solides à l'origine du renouvellement des habitats,
- des ressources trophiques.

Elle réclame des successions d'habitats au sein même du cours d'eau, de la plaine alluviale ainsi que des corridors rivulaires.

L'analyse du fonctionnement des écosystèmes d'eaux courantes a d'ailleurs amené à définir la notion d'hydrosystème (Amoros et Petts, 1993) afin de qualifier le très fort niveau de relations existant entre le cours d'eau et son bassin versant ainsi que celles qui s'établissent au sein même de celui-ci que ce soit au niveau longitudinal, vertical ou transversal.

I) 1) 2) 1) Continuité des éléments physiques

Au sein des écosystèmes, différents éléments physiques se déplacent, dont l'eau, qui constitue le principal moteur du mouvement des autres composantes. Le flux énergétique constitué du flux hydrique et du flux de sédiments et de débris organiques constitue le facteur primaire contrôlant les formes du chenal et l'hétérogénéité spatiale des habitats (Forman et Godron, 1986 ; Naiman *et al.*, 1988).

I) 1) 2) 1) 1) Continuité hydrique

A l'échelle du bassin versant, la continuité s'établit au travers des écoulements de surface, de sub-surface (dans les sols) et souterrains. Au sein des cours d'eau, les déplacements de l'eau ont lieu longitudinalement (amont-aval), latéralement (lit mineur - plaine inondable – nappe alluviale) et verticalement (colonne d'eau – substrat).

Cette continuité hydrique et surtout sa variabilité saisonnière sont essentielles au fonctionnement des écosystèmes aquatiques d'eau courante. Le degré d'inondation de la plaine alluviale participe fortement à la richesse biologique des grands cours d'eau (Welcomme, 1979 ; Junk *et al.*, 1989) et surtout aux cycles biogéochimiques.

Les écoulements hyporhéïques au travers des substrats sont indispensables à la faune benthique, au cycle de transformation de la matière organique et à de nombreux processus biogéochimiques (Standford et Ward ; 1993).

I) 1) 2) 1) 2) Continuité des matériaux solides

Les caractéristiques hydrauliques du flux liquide vont conditionner le déplacement de matériaux solides. Toute vitesse d'écoulement exercée dans une géométrie donnée (largeur du cours d'eau, pente des fonds) va conduire par les forces tractrices qu'elle génère et son niveau de turbulence à un déplacement de matériaux.

Ce déplacement peut s'exercer de diverses manières : soit sur le fond (mécanismes de charriage) soit dans la veine liquide (mise en suspension). Ce fonctionnement permet d'ajuster la morphologie du cours d'eau à la puissance du flux liquide en maintenant notamment une pente qui assure le transit des matériaux de l'amont vers l'aval.

Cette continuité « liquide-solide », très interdépendante, induit des gradients de valeurs des paramètres physiques (profondeur, vitesse, largeur, diamètre du substrat) qui se traduisent par des successions de formes fluviales (lit en tresses, méandres...). De cette continuité dépendra

la distribution des habitats favorables aux différentes espèces, aboutissant à une mosaïque des biotopes dans laquelle les organismes aquatiques devront effectuer leur cycle biologique.

Le bassin versant, la plaine inondable et surtout la rypisylve constituent des producteurs de végétaux essentiels pour le fonctionnement des écosystèmes. Comme pour le cas des sédiments, des végétaux seront récupérés et transportés par le flux liquide en bénéficiant notamment des périodes de hautes eaux et d'inondation.

I) 1) 2) 2) Continuité écologique et organismes vivants

I) 1) 2) 2) 1) Déplacements des organismes vivants

Les déplacements des organismes aquatiques s'effectuent grâce à :

- leur capacité de nage,
- le déplacement d'un hôte ou d'un support,
- la force du flux hydrique.

Ces différents types de déplacement constituent les composantes fonctionnelles de la connectivité d'une population. Ils participent aux processus démographiques qui conditionnent avec la mortalité, la croissance et le recrutement, les éléments clés de la dynamique des populations (Andrewartha et Birch, 1954). Chaque mécanisme est relié à une échelle d'espace particulière (bassin-région pour les migrations, région pour la dispersion, locale pour les mouvements (Palmer *et al.*, 1996)).

Les besoins en terme de continuité sont indispensables non seulement à la réalisation du cycle biologique des espèces, à la résilience des populations mais aussi au maintien de dimensions spatiales suffisantes pour le domaine vital de ces espèces afin de garantir des tailles minimales de populations assurant un brassage génétique suffisant (Meffe, 1990 ; Vrijenhoek, 1998 ; Meldgaard *et al.*, 2003 ; Laroche et Durand, 2004).

I) 1) 2) 2) 1) 1) Déterminisme des déplacements

La distribution en mosaïque plus ou moins continue des habitats ainsi que leur renouvellement en fonction des ajustements de la morphologie à la variabilité hydrologique obligent les espèces à se déplacer afin d'accomplir leur cycle biologique. Ces déplacements, qui se déroulent à différentes échelles de temps et d'espace sont indispensables à la réalisation du cycle biologique des espèces (Harden Jones, 1968).

Chez les poissons, l'amplitude des déplacements sera très variable selon les exigences en terme d'habitat et de capacités de nage (Jungwirth, 1998). Ceux-ci seront toujours conditionnés par le croisement entre une exigence biologique à un instant donné (reproduction, nutrition, repos), la disponibilité des habitats à cet instant et la présence éventuelle d'autres organismes (prédateur, compétiteur)(Northcote, 1978).

Les déplacements ont lieu dans les cas suivants (Schlosser, 1991):

- lorsque l'habitat nécessaire à une phase du cycle biologique n'est pas disponible dans l'environnement proche. C'est très souvent le cas pour la reproduction qui nécessite, pour de nombreuses espèces, des supports de ponte et des conditions hydrauliques spécifiques que l'on ne rencontre que dans certains tronçons de cours d'eau,
- lorsque les conditions environnementales se dégradent et ne correspondent plus aux exigences de l'espèce que cela soit pour se nourrir ou s'abriter. Cette situation s'observe lors de réchauffement ou de refroidissement des eaux, d'épisodes hydrologiques particuliers (étiages, crues) ou lors de dégradations brutales de la qualité des eaux ou des habitats,

- lorsque des prédateurs ou des compétiteurs sont présents en fortes densités dans une zone donnée.

I) 1) 2) 2) 1) 2) Déplacement de la matière organique et continuum du fonctionnement trophique

La matière organique se déplace au sein des cours d'eau en même temps qu'elle est transformée par les organismes vivants (bactéries, champignons, invertébrés). Cette continuité dépend du débit liquide mais également de la distribution des ressources disponibles et des conditions mésologiques (température de l'eau notamment). Le déplacement de la matière organique avec les conditions hydrauliques influence directement la distribution des invertébrés benthiques qui s'organisent en un continuum d'espèces, selon leur aptitude à résister aux conditions de vitesse de courant et surtout à dégrader les différentes formes de matière organique. Les apports de matières organiques allochtones de l'amont qui constituent la principale ressource trophique primaire se retrouvent en aval sous forme de carbone organique dissout et d'éléments fertilisants (azote, phosphore), qui seront utilisés dès que les conditions hydrauliques permettront le développement des végétaux et notamment des formes planctoniques.

La continuité hydrologique latérale joue également un rôle important dans la transformation de la matière organique. Lors des débordements, les annexes fluviales stockent les apports de matières allochtones (carbone organique particulaire). Ceux-ci sont ensuite transformés dans les annexes qui restituent dans des conditions de débits différentes de la chlorophylle et du carbone organique.

I) 1) 2) 2) 1) 3) Déplacements du plancton

Le phytoplancton et surtout le zooplancton, éléments indispensables de la chaîne alimentaire des cours d'eau à faible énergie, sont susceptibles de se déplacer entre différents types d'habitats et notamment entre les annexes fluviales, zones de forte productivité, et le cours principal.

I) 1) 2) 2) 1) 4) Déplacements des invertébrés benthiques, des crustacés et des mollusques

La dispersion est un phénomène commun chez les peuplements d'invertébrés benthiques (Palmer *et al.*, 1996). Elle peut fortement modifier la structure des communautés (Frid et Townsend, 1989). Elle permet d'expliquer les fortes capacités de recolonisation des habitats après une perturbation (pollution, crue, assec) (Townsend, 1989 ; Cushing et Gaines, 1989).

Il existe deux modes de déplacements des invertébrés benthiques, des crustacés et des mollusques au sein des cours d'eau (Bilton *et al.*, 2001) :

- une dispersion passive par entraînement soit par le flux liquide ou par d'autres organismes (poissons, oiseaux),
- une dispersion active par nage ou vol des adultes.

I) 1) 2) 2) 1) 5) Déplacements des poissons d'eaux douces

Les flux migratoires de poissons peuvent être relativement importants comme le montrent les comptages de poissons empruntant les ouvrages de franchissement (enregistrés par les systèmes vidéo) et les opérations ponctuelles de piégeage, qui permettent également d'évaluer l'importance des flux, en relation avec les populations autochtones.

La compréhension des déplacements constitue un élément essentiel de l'écologie des peuplements piscicoles (Schlosser, 1991). Les poissons présentent des distributions de répartition très influencées par l'hétérogénéité des habitats. Elles s'expriment d'amont en aval (Huet, 1959; Verneaux, 1973) ou latéralement (Welcomme, 1985). Toutefois, ces

distributions sont très dynamiques avec de nombreux déplacements que cela soit pour se reproduire, ou pour le développement des juvéniles (Copp, 1989 ; Northcote, 1978 ; Schlosser, 1987).

I) 1) 2) 2) 1) 5) 1) Espèces amphihalines

Les migrateurs amphihalins présentent souvent de grands domaines vitaux et de fortes amplitudes de déplacement. Celles-ci dépendent directement de leurs exigences en terme d'habitat et de la position des habitats les plus favorables dans le réseau hydrographique. Les besoins en matière de reproduction et de développement des juvéniles obligent les saumons atlantiques à gagner des zones très apicales pour se reproduire. Dès l'instant où les axes migratoires sont dépourvus d'obstacles, beaucoup d'espèces amphihalines colonisent des parties très en amont des bassins.

Les poissons migrateurs amphihalins représentent un enjeu en terme de biodiversité et de conservation d'espèce (Directive Habitat). Ce sont des espèces dont le cycle biologique se déroule à de très larges échelles avec des exigences d'habitats bien spécifiques les obligeant à des migrations importantes pour satisfaire l'ensemble de leurs besoins.

La restauration et/ou le maintien de la continuité écologique doit permettre à la fois la disponibilité en habitats favorables à ces espèces (apport de substrat pour la reproduction notamment) et des possibilités d'accès aux habitats favorables.

I) 1) 2) 2) 1) 5) 2) Espèces holobiotiques

Chez les espèces holobiotiques, les dimensions des domaines vitaux sont extrêmement variables. La question de la sédentarité est réellement au centre des problématiques écologiques concernant ces espèces.

Beaucoup d'espèces de poissons ont développé des stratégies de ségrégation spatiale à l'échelle d'un bassin entre alevins, juvéniles et adultes (Schlosser, 1991). Cette ségrégation s'appuie à la fois sur l'hétérogénéité de l'environnement et surtout sur les capacités de déplacements des individus. C'est le cas de la truite commune dans de nombreux bassins de plaine et de moyenne montagne où les alevins et les juvéniles dominent numériquement les populations des ruisseaux affluents tandis que les adultes sont principalement installés dans les cours principaux (Baglinière, 1991).

I) 2) Impacts des aménagements sur la continuité écologique des cours d'eau

Les aménagements transversaux impactent la continuité écologique des cours d'eau :

- en modifiant les conditions hydrauliques du flux liquide en amont et en aval de l'aménagement, entraînant un blocage du flux solide et un changement dans la dynamique des habitats,
- en bloquant l'accès aux habitats favorables pour les espèces situées en aval comme pour celles situées en amont.

Au niveau d'un aménagement, la rupture de continuité pourra donc être induite à la fois :

- à l'obstacle transversal (barrages, seuils, radiers...) ;
- à la présence en amont d'un habitat artificiel (retenue, bief) ;
- à la détérioration des conditions physico-chimiques en aval et en amont de l'obstacle.

Cette rupture s'exercera aussi bien dans le sens amont/aval (transport solide, dévalaison des espèces) que aval/amont (montaison des espèces).

L'intensité de ces impacts sera fonction :

- de l'emprise de l'aménagement (hauteur),
- des modalités de gestion des aménagements et notamment des ouvrages d'évacuation,
- de l'importance des modifications du flux liquide associées (réduction du débit en aval, fonctionnement par éclusées, stockage/destockage),
- de la position de l'impact vis-à-vis des habitats clés pour les espèces et notamment les espèces patrimoniales.

A l'échelle d'une masse d'eau et d'un bassin, il est indispensable de raisonner en terme de cumul des impacts propres à chaque ouvrage.

Certains aménagements ont profondément modifié les processus physiques et écologiques. Certains cas provoquent une rupture totale de la continuité écologique tant du point de vue des sédiments que des espèces.

I) 2) 1) Impacts sur le transport sédimentaire

Le ralentissement des conditions d'écoulement en amont de l'ouvrage entraîne des phénomènes de dépôts. Plus la hauteur de l'ouvrage et le temps de séjour de l'eau en amont sont importants, plus les sédiments seront stockés et difficilement mobilisables à nouveau, même par des gestions de vannes ou de clapets.

En aval de l'ouvrage, les blocages de sédiments conduisent à une reprise du transport par les apports du fond du cours d'eau et des berges. La morphologie du lit évolue avec une forte incision et une érosion latérale amplifiée. Ces processus aboutissent à l'entraînement des matériaux meubles du fond et à l'apparition des affleurements du socle géologique dont les caractéristiques biogènes sont nettement moins intéressantes.

D'autres évolutions du substrat peuvent être observées lorsque le blocage du transport est corrélé avec une modification de l'hydrologie et notamment l'écêtement des crues. En effet, l'entraînement des fractions granulométriques intermédiaires (petits galets, graviers) et l'absence de fortes crues conduit à un colmatage des fonds, ce qui perturbe fortement les fonctions biologiques des substrats.

Le blocage du transport solide couplé très souvent à des perturbations du cycle hydrologique induit de profondes modifications de la morphologie telles qu'une incision marquée du lit, la perte du tressage, un comblement accéléré des annexes hydrauliques et une forte progression de la forêt alluviale.

I) 2) 2) Impacts sur les espèces

I) 2) 2) 1) Restriction des domaines vitaux des migrateurs amphihalins

A l'échelle de la France, les domaines vitaux utilisés par les grands migrateurs amphihalins que sont le saumon atlantique, la lamproie marine, l'aloise et l'anguille sont essentiellement aujourd'hui définis dans leurs parties amont par des grands ouvrages infranchissables pour les différentes espèces. La succession d'ouvrages peut également aboutir à réduire l'aire des espèces dans un bassin.

D'un point de vue historique, la limitation de l'accès à certains habitats essentiels (notamment les zones de reproduction) pour le saumon par des barrages infranchissables a largement participé à la disparition de l'espèce sur de nombreux bassins.

I) 2) 2) 2) Perturbations de la migration

Même lorsqu'ils sont franchissables, les obstacles transversaux peuvent pénaliser les poissons lors de leur migration en générant des retards parfois très importants tout en affaiblissant les

poissons, soit lors de la période d'attente en aval, soit lors du franchissement. Ces retards peuvent obliger les espèces à séjourner dans des tronçons de rivières défavorables (notamment en terme de température et de qualité des eaux) et donc générer des mortalités importantes.

I) 2) 2) 3) Impacts sur la dynamique des populations

Le blocage des migrations peut avoir des conséquences importantes en terme de fonctionnement des populations en limitant l'accès aux habitats de reproduction. Pour la truite commune, la multiplication des obstacles à la fois dans les cours principaux mais surtout sur les petits ruisseaux affluents est un facteur essentiel expliquant l'état des populations dans de nombreuses régions de moyenne montagne. Même dans les cours d'eau de montagne, les blocages de la dévalaison pénalisent une utilisation optimale de l'habitat par les truites adultes (Baran, 1995).

I) 2) 2) 4) Modifications directes des habitats

Le ralentissement des conditions d'écoulement en amont des ouvrages transversaux modifie les habitats avec des conséquences importantes sur la qualité des peuplements piscicoles. De nombreuses études ont permis de montrer que l'état des peuplements piscicoles était significativement altéré dans les zones situées dans l'emprise des seuils et barrages par rapport à des zones à écoulement non perturbés (Baran et Parussati, 2002 ; Baran, 2007 ; Baran *et al.*, 2007).

I) 2) 2) 5) Modifications liées aux perturbations du transport solide

Le blocage du transport solide en aval des ouvrages modifie les habitats notamment ceux liés aux fractions fines de la granulométrie. A l'aval des grands ouvrages, la disparition de ces fractions granulométriques perturbe la reproduction des espèces lithophiles, comme les salmonidés.

Des perturbations importantes peuvent également être liées aux opérations de destockage de matériaux des retenues (vidanges ou chasses). Même si ces opérations pour certaines retenues de petites dimensions aboutissent à la restitution d'une grande partie des matériaux accumulés, les impacts sur les habitats en aval sont très importants, avec notamment des colmatages. La succession de ces opérations dans le temps peut aboutir à une très forte dégradation de l'état piscicole des masses d'eau.

I) 2) 2) 6) Impacts sur le fonctionnement trophique

Les ruptures générées par la présence d'un ouvrage transversal se traduisent par un piégeage des matières organiques qui transitent ainsi que des éléments minéraux. Les changements de conditions mésologiques (température de l'eau, vitesse d'écoulement) en amont de l'ouvrage aboutissent à de profonds changements de la faune d'invertébrés, avec le remplacement d'une chaîne alimentaire basée sur les apports allochtones par une chaîne alimentaire reposant sur une production primaire algale.

I) 2) 2) 7) Impacts sur la qualité des eaux

Le ralentissement des écoulements participe avec les changements de chaîne alimentaire à d'importantes modifications de la qualité des eaux. Le réchauffement en amont des ouvrages entraîne la modification des capacités d'accueil pour les espèces et constitue également un facteur très fort de discontinuités au sein du corridor fluvial, notamment pour les poissons migrateurs.

En aval, les changements de qualité des eaux, leur réchauffement ou leur refroidissement pénalisent le potentiel d'accueil et peut constituer une barrière importante pour les migrations des espèces.

I) 3) Notions de restauration de la continuité et d'atténuation des impacts

En référence aux processus physiques et biologiques mis en jeu dans la continuité écologique et à l'interaction entre ces processus, seul l'effacement des ouvrages transversaux constitue une mesure de restauration complète. En effet, cet effacement constitue la seule garantie de suppression de l'ensemble des impacts (propres à l'obstacle ou inhérents aux modifications d'habitat engendrées).

En présence des aménagements, il reste possible d'atténuer les impacts par des mesures correctives qui peuvent porter sur :

- la construction d'ouvrages de franchissement pour la montaison et la dévalaison de certaines espèces ;
- la conception de certains organes du génie civil ou l'installation de dispositif répulsifs limitant l'entraînement des espèces (espacement de grille, déflecteurs)
- les modalités de gestion des aménagements (arrêt de fonctionnement, gestion des vannes),
- une gestion hydrologique favorisant la restauration morphologique du cours d'eau en aval,
- des aménagements permettant de corriger les dysfonctionnements hydromorphologiques pénalisant la disponibilité des habitats favorables.

La mise en œuvre de ces mesures dépend directement des espèces constituant les cibles biologiques sur lesquelles les efforts doivent porter.

I) 4) Continuité écologique et réglementation

La continuité est un élément fort du fonctionnement hydromorphologique et donc de la dynamique des habitats. Au travers de ces habitats, elle joue un rôle sur le fonctionnement des populations et donc, par voie de conséquence, sur les indicateurs biologiques définissant l'état des masses d'eau. La restauration de la continuité constitue donc un moyen d'agir sur l'hydromorphologie et/ou l'accès aux habitats favorables. Sa restauration doit s'appuyer sur un diagnostic permettant d'identifier les problèmes posés par la fragmentation des habitats et les difficultés d'accès à ces différents habitats.

La continuité écologique est devenue un élément important en terme de gestion des écosystèmes d'eau courante. Plusieurs textes réglementaires reprennent cette notion, tels que la Directive Cadre sur l'Eau, la Loi sur l'Eau, ou encore le Décret n° 2006-881 du 17 juillet 2006.

I) 4) 1) Directive cadre

La continuité écologique est présentée dans le paragraphe 1.2.1 de l'annexe V. Elle concerne la circulation des espèces vivantes et le transit sédimentaire. Dans le cas des masses d'eau en très bon état, la migration des organismes aquatiques et du transport des sédiments ne doit pas être perturbée. En situation de bon état, de légères perturbations sont tolérées.

I) 4) 2) Loi sur l'eau et les milieux aquatiques

L'article 214-17 concerne le classement des cours d'eau et fait référence à la continuité.

D) 4) 3) Loi sur l'eau

La continuité écologique est mentionnée dans la nomenclature de la loi sur l'eau (Décret n° 2006-881 du 17 juillet 2006).

La rubrique 3.1.1.0. considère les installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau, constituant:

- 1) Un obstacle à l'écoulement des crues
- 2) Un obstacle à la continuité écologique:
 - entraînant une différence de niveau supérieure ou égale à 50 cm, pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation.
 - entraînant une différence de niveau supérieure à 20 cm mais inférieure à 50 cm pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation.

II) Contexte et présentation du modèle physique

Afin de respecter les mesures citées précédemment, les obstacles présents sur les cours d'eau doivent présenter des dispositifs de franchissement. De multiples solutions technologiques existent : les passes à bassins successifs, les prébarrages et rivières artificielles, les passes à ralentisseurs ou bien encore les écluses et ascenseurs à poissons.

II) 1) Principe de fonctionnement des dispositifs de franchissement

Les dispositifs de franchissement sont basés sur plusieurs principes :

- une décomposition de la chute d'eau totale liée au barrage ou au seuil en plusieurs chutes dont les hauteurs et les vitesses d'écoulement sont compatibles avec les capacités de nage et/ou de saut des poissons,
- une succession de bassins de volume et de forme déterminés permettant de dissiper l'énergie créée par les chutes d'eau. Les caractéristiques hydrauliques dans ces bassins (vitesses, turbulences) doivent être compatibles avec les capacités de nage des poissons.
- En complément, il est également possible d'ajouter dans les différents bassins une rugosité de fond permettant d'améliorer la dissipation de l'énergie et de créer des conditions de vitesses compatibles avec la nage ou le repos de certaines espèces.

Le dimensionnement d'un ouvrage de franchissement sera donc basé sur le croisement entre les caractéristiques du barrage à aménager (hauteur, débit de la rivière) et les exigences biologiques des espèces, surtout en terme de capacités de nage.

Ce croisement entre hydraulique et biologie nécessite des études et des recherches afin de disposer de solutions technologiques pertinentes. Tous les dispositifs existant ont donc fait l'objet de recherche sur modèle réduit, notamment dans le cadre de l'appréhension des conditions d'écoulement. La validation biologique par des tests de franchissement d'espèces a également été effectuée, mais de manière moins systématique.

C'est dans ce cadre que le Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques a conçu un pilote basé sur une passe à poissons à fente verticale. Les caractéristiques générales et particulières au pilote sont décrites dans ce chapitre.

Ce type de passe a été mis au point suite à plusieurs études sur modèles réduits pour permettre au saumon de franchir les rapides de Hell's Gate sur la rivière Fraser au Canada. Le modèle original consistait en une succession de vastes bassins de 5,5 m de longueur et 6,1 m de largeur comportant deux fentes verticales de 60 cm de largeur. Les jets issus des fentes convergent et se rencontrent dans la partie centrale, procurant une dissipation d'énergie efficace et créant des zones calmes sur chaque côté du bassin et à l'aval immédiat des cloisons. De nombreuses passes, basées sur le même principe mais ne comportant le plus souvent qu'une seule fente (figure 1), ont été construites un peu partout dans le monde (Larinier *et al.*, 1998).



Figure 1 : Passe à poissons à fentes verticales

II) 1) 1) Avantages et inconvénient d'une passe à poissons à fentes verticales

Le principal avantage de la passe à fentes verticales (figure 2) est qu'elle supporte des variations importantes du niveau amont, à condition que le niveau aval subisse des variations du même ordre de grandeur (Larinier *et al.*, 1998). En effet, ces passes sont adaptées pour des dénivelés et des débits importants en grands cours d'eau et sont peu sensibles au blocage des flottants. D'autre part, ce type de passe est peu sélectif, adaptable pour toutes les espèces migratrices. Cette caractéristique est liée au fait que les vitesses présentes dans ce type d'ouvrage sont raisonnables, par rapport aux capacités de nage des poissons. Il est à noter qu'elles permettent une bonne dissipation de l'énergie de l'écoulement dans chaque bassin, tout en assurant des zones de repos aux poissons (Tarrade, 2007).

Ces raisons en font un dispositif de franchissement répandu en France et intéressant dans le cadre d'une étude visant à adapter les passes à poissons aux petites espèces afin de faciliter leur passage.

L'inconvénient est le coût élevé, en raison du nombre et de la dimension des bassins. (Conseil Supérieur de la Pêche, 2000)

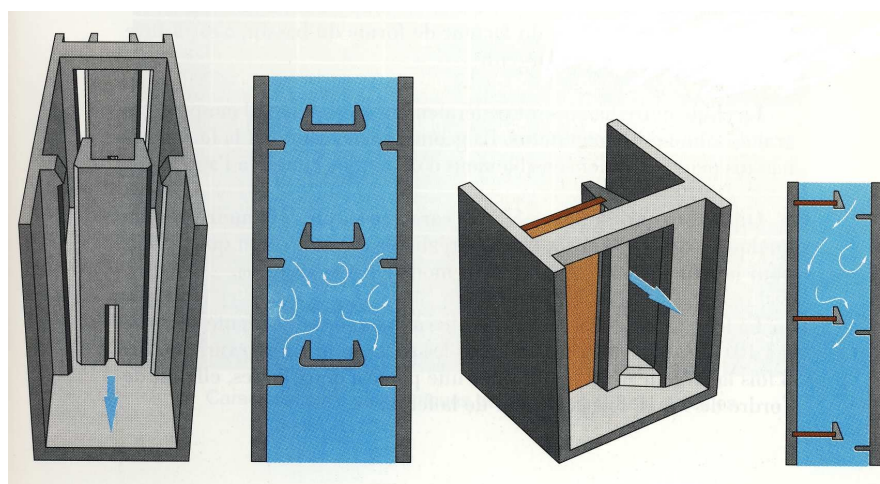


Figure 2 : Schéma de passes à poissons à fentes verticales (Larinier *et al.*, 1998)

II) 2) Présentation du pilote

La passe à poissons présente dans le laboratoire (figure 3) est une passe à fente verticale à l'échelle 1/4. Comme spécifié sur la figure 4, l'eau présente dans le bassin de redistribution (de 3,3 m³) est renvoyée grâce à une pompe vers le bassin supérieur, d'où celle-ci s'écoule dans les différentes passes avant de s'écouler à nouveau vers le bassin de réception (de 2,2 m³), en liaison avec le bassin de redistribution. L'aspiration est réalisée par une pompe centrifuge de type M2C 90-30 de la société Guinard pouvant atteindre une vitesse de rotation de 2950 tours/min (puissance absorbée de 15 kW). Elle délivre un débit maximal théorique d'environ 30 L/s. Ce dernier est contrôlé par un débitmètre électromagnétique, dont la précision de mesure est de 0.5%. Le variateur de la marque Siemens permet de faire varier le débit. Un système de tuyaux en PVC permet l'acheminement de l'eau pompée dans le bassin de récupération vers la cuve amont. L'aspiration et le déversement de l'eau se font par deux crépines munies de clapet anti-retour.

Un dispositif expérimental assez similaire fut étudié pour une étude réalisée en Espagne (Rodriguez *et al.*, 2006). On constate sur la figure 6 qu'une passe à poissons à l'échelle réduite fut également utilisée, afin d'étudier différents designs, testés pour différentes pentes, différentes températures, et des tailles différentes de poissons. Une passe à poissons en plexiglas à l'échelle réduite fut ainsi construite, de 12 m de long, 0,99m de large et 1 m de haut. La pente peut varier en élevant une extrémité de la passe.

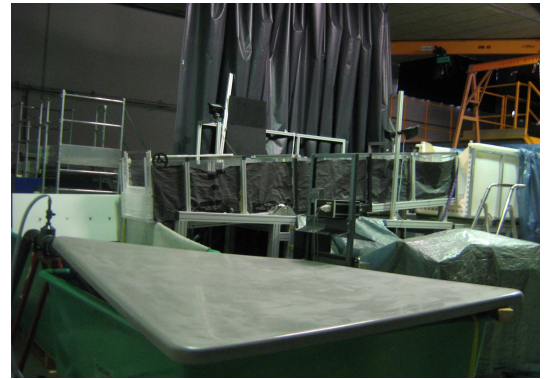


Figure 3 : Vue d'ensemble de la passe à poissons du laboratoire

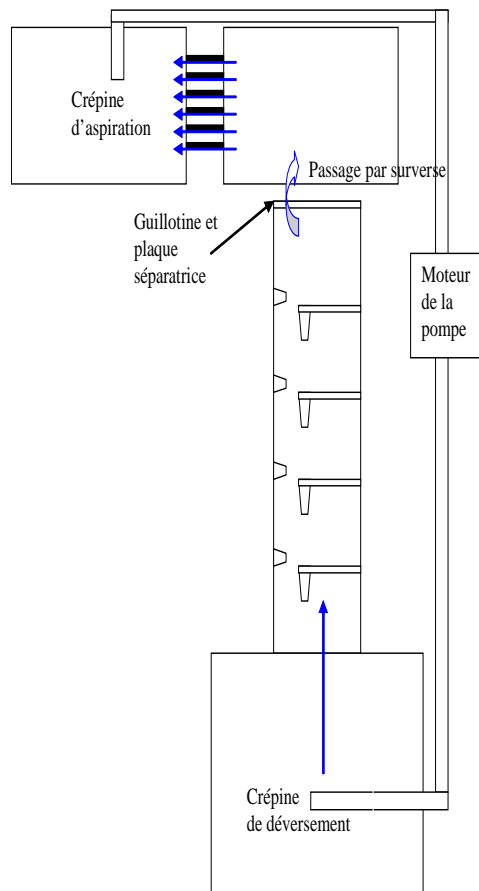


Figure 4 : Schéma de fonctionnement de la passe à poissons du laboratoire

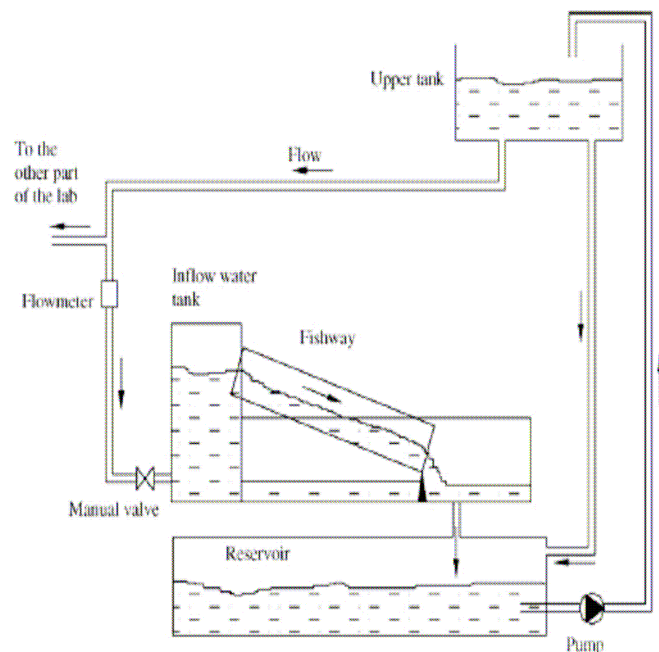


Figure 5 : Exemple d'un dispositif expérimental similaire utilisé en Espagne

Les formules usuelles d'hydraulique permettent de déterminer le débit Q à travers une fente verticale en fonction de la chute d'eau Δh entre bassins, de la hauteur d'eau dans la fente Z_b , du coefficient de débit C_d et de la largeur de la fente b :

$$Q = C_d b Z_b \sqrt{2g\Delta h}$$

Les principaux facteurs affectant le coefficient de débit sont la forme et le profil de la fente. La courbure des arêtes des déflecteurs se traduit par une augmentation du coefficient de débit. Celui-ci varie généralement de 0,65 à 0,85 (Larinier et al., 1998).

La chute entre bassins Δh est généralement aux alentours de 0,3 m et inférieure à 0,6 m.

Les différentes caractéristiques de la passe sont résumées dans le tableau 1 :

Caractéristiques générales du modèle	Similitude géométrique	1/4
	Echelle des vitesses et puissances volumiques	1/2
	Echelle des débits	1/32
Caractéristiques géométriques d'un bassin	Largeur de la fente	$b = 0.075$ m
	Longueur du bassin	$L = 0.75$ m
	Largeur du bassin	$B = 0.500$ m et $B = 0.675$ m
	Pente modulable	5, 7.5, 10, 12.5 et 15%
Principales grandeurs	Puissance volumique dissipée	$P_v = 120$ W/m ³ ($B = 0.500$ m) $P_v = 170$ W/m ³ ($B = 0.675$ m)
	Vitesse maximale	$V_{max} = 1.2$ m/s
	Vitesse débitante dans la fente	$V_f = 0.975$ m/s ($B = 0.500$ m)
		$V_f = 0.950$ m/s ($B = 0.675$ m)
	Nombre de Froude	$Fr < 1$ (régime fluvial)
	Nombre de Reynolds	$Re \approx 77000$ (régime turbulent)

Tableau 1 : Grandeurs caractéristiques de la passe à poissons du laboratoire

Dans la suite de l'étude et pour des raisons de commodité, toutes les grandeurs mentionnées sont converties à l'échelle 1/1, afin d'effectuer directement le lien avec le comportement biologique des poissons.

II) 2) 1) Caractéristiques des bassins

Les principales grandeurs caractéristiques d'un bassin d'une passe à poissons à fentes verticales sont représentées sur la figure 6.

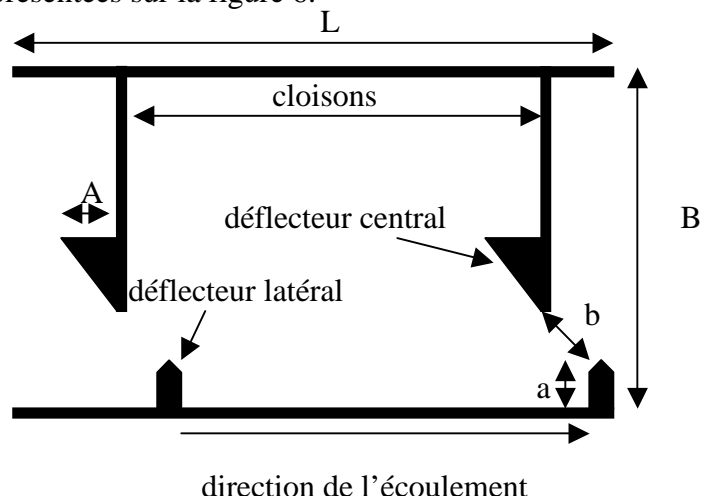


Figure 6 : Schéma d'un bassin d'une passe à poissons à fente verticale

Il existe une vingtaine de passes à fentes verticales en France. Bien que basées sur le même principe (passage de l'écoulement au travers d'une ou deux fentes disposées latéralement), leur géométrie peut varier sensiblement, principalement en fonction des contraintes liées au site et aux espèces migratrices considérées. Les caractéristiques adimensionnelles caractérisant la géométrie des passes sont :

- le rapport entre la largeur du bassin et la largeur de la fente B/b : 6,63 en moyenne (variant de 5 à 10).
- le rapport entre la longueur du déflecteur central et la largeur de la fente A/b : 1,78 en moyenne (variant de 1 à 2,33).
- le rapport entre la longueur du bassin et la largeur de la fente L/b : 8,11 en moyenne (variant de 6,7 à 10,3).
- le rapport entre la longueur du déflecteur latéral et la largeur de la fente a/b : 1,15 en moyenne (de 0,75 à 2,2)

Ces références sont confirmées par les données fournies sur la figure 7.

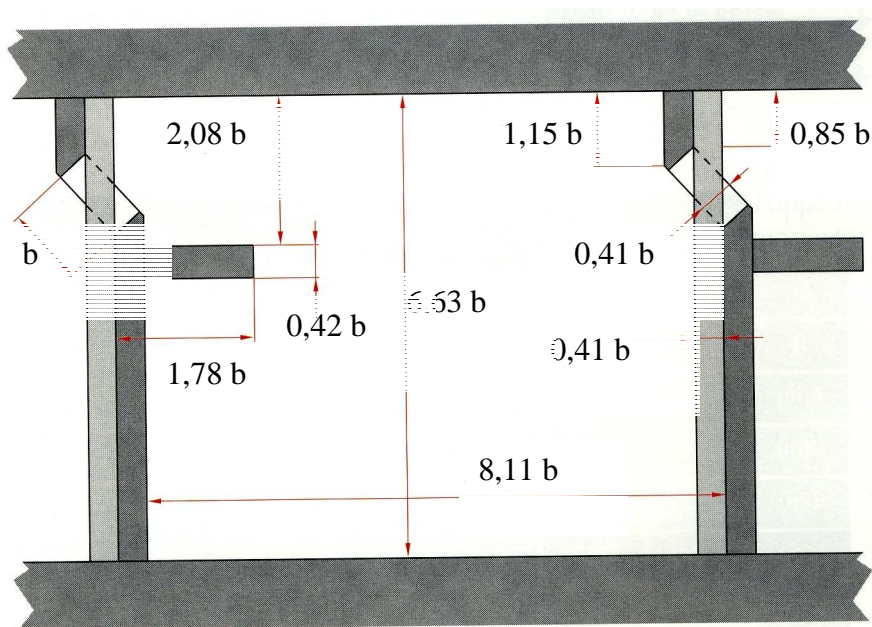


Figure 7 : Valeurs caractéristiques des dimensions d'un bassin de passe à fente vertical (d'après Larinier *et al.*, 1998)

En se référant à ces données moyennes des passes à fentes verticales et en restant dans le domaine des géométries permettant des conditions biologiquement acceptables pour les poissons, les caractéristiques du prototype de la passe à l'échelle 1/1 qui a servi pour le modèle du laboratoire ont été définies : une largeur de fente fixe b de 0,3 m et une longueur de bassin fixe L de 3 m ($L/b = 10$). La longueur du déflecteur central est $A = 0,6$ m. ($A/b = 2$) et celle du déflecteur latéral est $a = 0,4$ m ($a/b = 1,3$).

Quatre largeurs de bassin ($B = 2,7, 2,3, 2$ et $1,7$ m) ont été retenues afin de faire varier le rapport B/b entre la largeur du bassin et celle de la fente (respectivement $B/b = 9, 7,66, 6,66$ et $5,66$). Dans le modèle, le réglage de la largeur des bassins se fait au moyen de plaques latérales qui s'insèrent dans le canal et, par glissement, permettent d'obtenir les valeurs de largeur souhaitées.

II) 2) 2) Pente de la passe

Les pentes des passes à bassins à fentes verticales rencontrées sur les cours d'eau sont toujours inférieures à 15%, la majorité des pentes se situant entre 7 et 10%. La pente du radier du canal du modèle est réglable en cinq inclinaisons afin de pouvoir faire varier (sans modifier la géométrie du modèle) la chute entre les bassins et la puissance dissipée volumique dans les cellules (ainsi que les caractéristiques turbulentes). Le radier peut être incliné sur les cinq pentes 5, 7.5, 10, 12.5 et 15%. Les cloisons intermédiaires des bassins de la maquette sont installées verticalement pour la pente de 10% mais ne sont plus verticales lorsque la pente varie, avec un angle cependant faible par rapport à la verticale, de l'ordre de plus ou moins 3°.

III) Méthodologie

L'étude conduite a pour objectif de tester l'incidence de la géométrie des bassins (largeur et présence de cylindres) sur le franchissement par les poissons. Il est donc essentiel de choisir un ou plusieurs descripteurs et une méthode de suivi du franchissement par les poissons.

Nous décrivons donc :

- les configurations testées,
- la méthode de suivi des franchissements,
- les méthodes de suivi des paramètres environnementaux,
- les méthodes de description et d'analyse statistique des données.

Après une première phase de recherche de documentation concernant les passes à poissons et leur fonctionnement, de nombreux essais ont été réalisés, afin de déterminer les conditions optimales, que cela soit pour l'expérimentation et l'analyse des solutions ou pour le stockage des poissons.

III) 1) Paramètres expérimentaux

III) 1) 1) Choix des configurations

III) 1) 1) 1) Configurations préalablement testées

Les configurations testées ont tout d'abord été celles expérimentées lors des travaux précédents. Ces configurations sont visibles sur les figures 8, 9, 10 et 11. L'intérêt de réitérer ces tests est de vérifier que les résultats obtenus lors des études précédentes (Tarrade, 2007 ; Boisson, 2006) sont observables avec un nombre d'individus plus important. Un cylindre de diamètre de 30 centimètres, égal à la largeur de la fente, a été positionné (à l'échelle 1/1) en $X = 0.65$ m et $Y = 0.9$ m quand $B = 2.7$ m et en $X = 0.65$ m et $Y = 0.95$ m quand $B = 2$ m, soit à une distance de l'échancrure au moins égale à sa largeur afin de permettre le passage de tout élément ayant franchi la fente. La différence de positionnement en Y s'explique par la nécessité d'installer le cylindre dans le jet, qui est plus incurvé quand la largeur du bassin diminue.

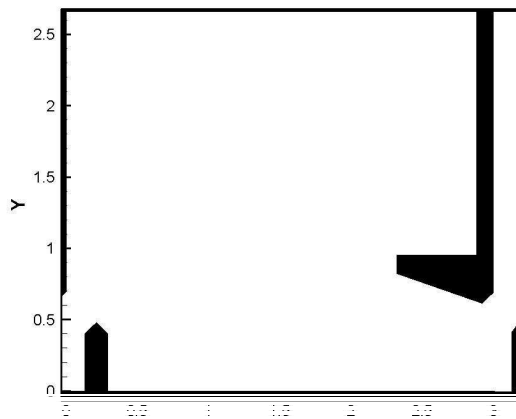


Figure 8 : Schéma de la configuration de grande largeur sans cylindre

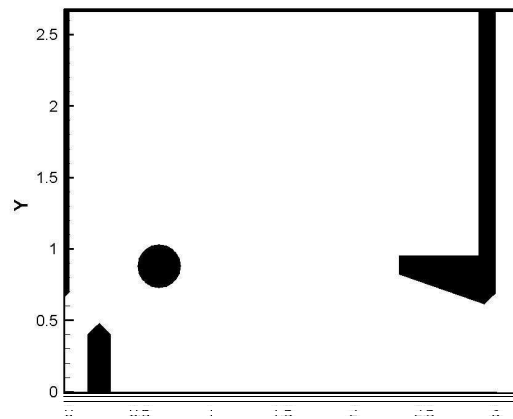


Figure 9 : Schéma de la configuration de grande largeur avec un cylindre

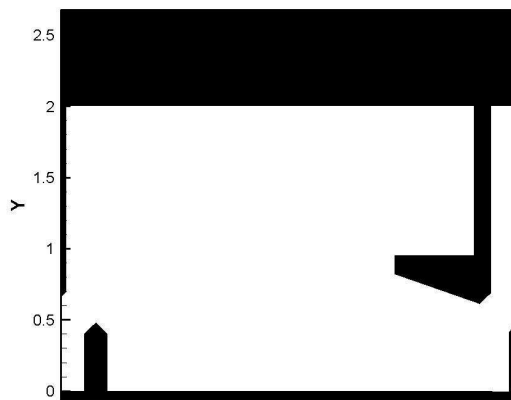


Figure 10 : Schéma de la configuration de petite largeur sans cylindre

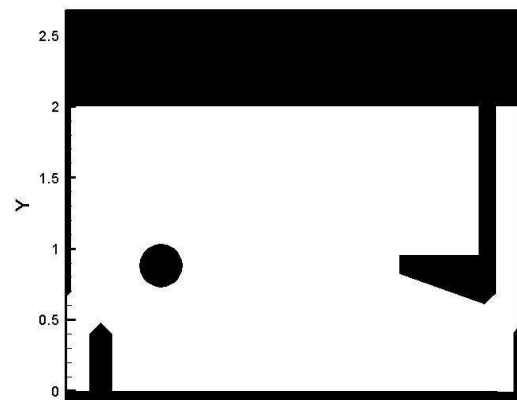


Figure 11 : Schéma de la configuration de petite largeur avec un cylindre

III) 1) 2) Nouvelles configurations

De nouvelles configurations ont également été sélectionnées à l'aide de la méthode de visualisation par traceurs solides (P.S.V, Particle Streak Velocimetry).

Cette méthode permet de réaliser une évaluation topologique de l'écoulement, à travers des clichés de visualisation par traceurs solides. Le principe de cette méthode est d'observer, dans un plan lumineux créé par un laser, la structure d'un écoulement préalablementensemencé de petites particules diffusantes, qui se substituent aux particules fluides (figure 12). L'écoulement est enregistré par l'intermédiaire d'un appareil photographique ou vidéo dans des sections du domaine d'étude éclairées par une nappe laser. Pendant le temps de pose t_p de l'appareil, chaque traceur décrit un mouvement correspondant à celui de la particule fluide qu'il remplace, mettant ainsi en évidence la topologie de l'écoulement.

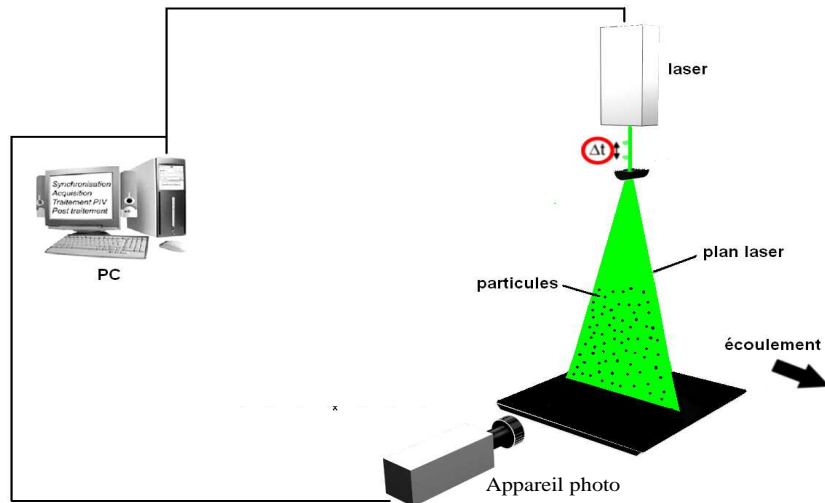


Figure 12 : Dispositif utilisé lors de l'étude topologique par P.S.V.

Cette méthode permet d'acquérir une visualisation convenable pour considérer l'écoulement (figures 13 et 14). Les cylindres ont ainsi été disposés de manière à obtenir un battement du jet et à empêcher les poissons de rester piégés dans les zones de repos. Ces zones de repos observées sont celles illustrées sur la figure 15.

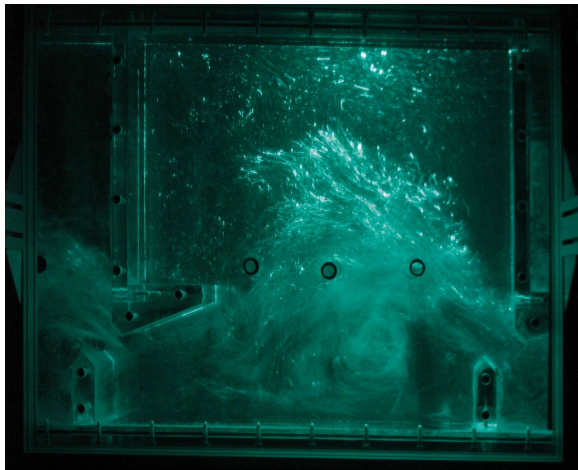


Figure13 : Exemple d'image obtenue par P.S.V. pour le cas de la configuration à 3 cylindres alignés

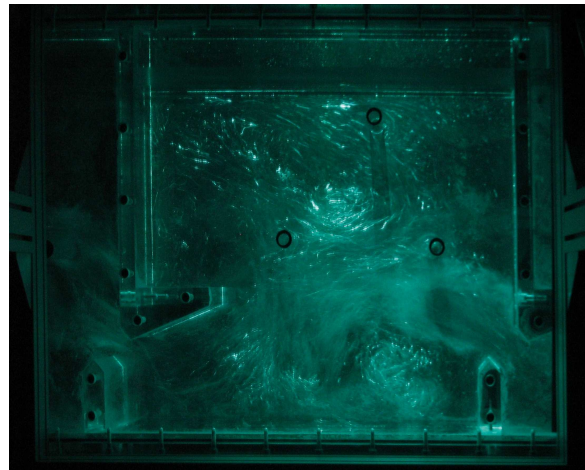


Figure 14 : Exemple d'image obtenue par P.S.V. pour le cas de la configuration à 3 cylindres non alignés

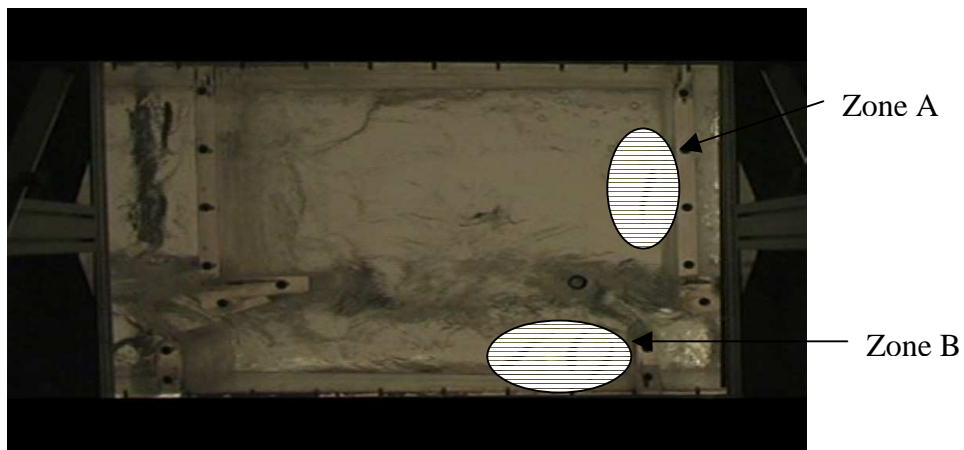


Figure 15 : Illustration des zones de repos privilégiées des poissons

Le choix d'un cylindre de taille réduite par rapport aux expériences réalisées précédemment s'explique par le fait que les cylindres utilisés précédemment représentent un diamètre relativement important, dans le cadre d'un aménagement sur passe existante. En effet, le diamètre de ce cylindre serait de 30 cm. Les nouvelles configurations présentent des cylindres de 10 cm. Dans l'optique d'une adaptation de passes existantes, ce diamètre pourrait ainsi présenter un avantage, par rapport aux configurations préalablement testées.

Les nouvelles configurations à tester, issues des observations faites grâce à la méthode de visualisations par traceurs solides sont résumées sur les figures 16, 17, 18, 19 et 20:

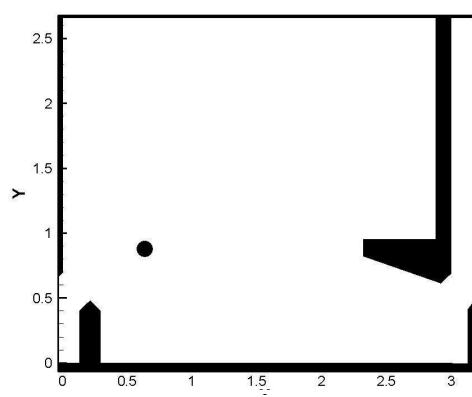


Figure 16 : Schéma de la configuration de grande largeur avec un petit cylindre

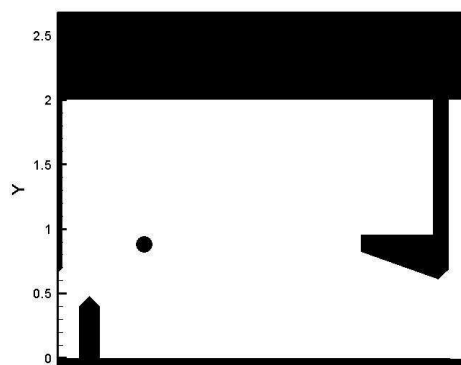


Figure 17 : Schéma de la configuration de petite largeur avec un petit cylindre

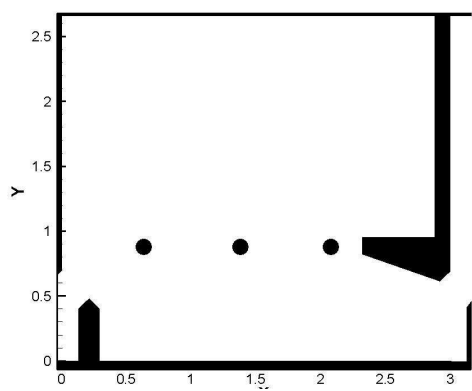


Figure 18 : Schéma de la configuration de grande largeur avec trois cylindres alignés

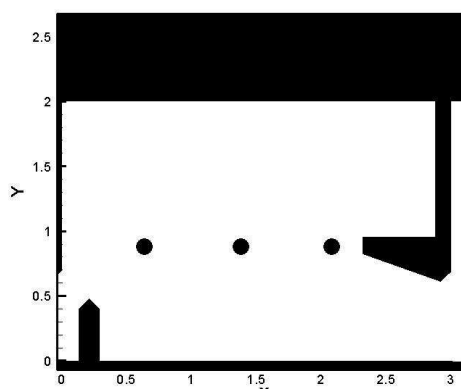


Figure 19 : Schéma de la configuration de petite largeur avec trois cylindres alignés

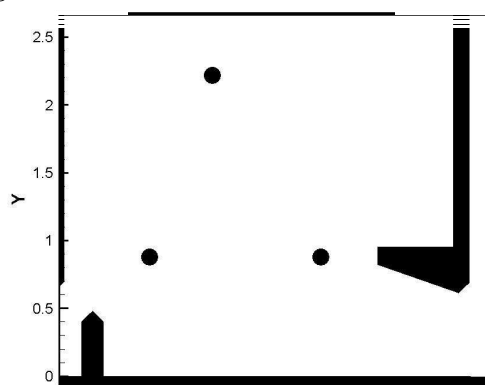


Figure 20 : Schéma de la configuration de grande largeur avec trois cylindres non alignés

L'objectif de réaliser des tests sur deux largeurs est de vérifier que les résultats obtenus sur la petite et sur la grande sont relativement similaires. On peut penser que les courants produits par la configuration à trois cylindres alignés sont similaires pour les deux largeurs. La configuration à trois cylindres non alignés, elle, est trop complexe pour être adaptée sur la petite largeur. Elle constituerait, dans ce cas une configuration à part entière, sans rapport avec celle étudiée sur la grande largeur.

Les différentes positions des cylindres pour chacune des configurations sont résumées dans le tableau 2.

Largeur	Configurations	X (m)	Y (m)
2 m	1 gros cylindre	0,65	0,95
	1 petit cylindre	0,65	0,95
	3 petits cylindres alignés	0,65	0,95
		1,38	0,95
		2,02	0,95
2,7 m	1 gros cylindre	0,65	0,90
	1 petit cylindre	0,65	0,90
	3 petits cylindres alignés	0,65	0,90
		1,38	0,90
		2,02	0,90
	3 petits cylindres non alignés	0,65	0,90
		1,10	2,22
		1,96	0,90

Tableau 2 : Résumé des positions des cylindres pour chaque configuration

D'autres études existent concernant la disposition d'éléments permettant une dissipation de l'énergie turbulente. Ainsi, en Allemagne, une étude fut menée (Heimerl *et al.*, 2008) concernant le développement d'une méthode de dimensionnement, à l'aide de pierres disposées individuellement ou de manière groupée, afin d'assurer une certaine profondeur d'eau aux poissons.

Une méthode de calcul pour des rampes rocheuses fut ainsi élaborée, permettant une vérification des résultats de tests préalablement réalisés.

III) 1) 2) Méthode de suivi du franchissement

III) 1) 2) 1) Techniques de suivi et de comptage

Le franchissement par les poissons a été suivi et quantifié grâce à la mise en œuvre de la vidéo.

Le premier problème posé fut le choix du mode de capture de vidéos. Ce choix s'est tout d'abord porté sur une caméra analogique. L'avantage de ce mode de capture réside dans le fait que l'intensité lumineuse peut être réduite, tout en permettant la détection des poissons. Cependant, la qualité de l'image ainsi que la nécessité de transfert des données d'un magnétoscope à l'ordinateur via une



Figure 21 : Photo d'une plaque opaque permettant l'obtention d'une lumière homogène

carte d'acquisition rend l'utilisation d'un tel matériel complexe et relativement longue. De plus, une lumière d'intensité plus élevée ne semble pas, après observation de plusieurs tests, perturber de manière significative les poissons. Le choix s'est donc finalement porté sur le caméscope numérique (figure 23, Panasonic NV-MX300B), beaucoup plus simple d'utilisation, et plus simple également en terme de transfert de données, rendant ainsi possible le travail dans n'importe quel endroit muni d'un ordinateur. Une lumière dispensée par un modulateur d'une puissance de 185 watts répartie sur 3 projecteurs semble être un bon compromis entre la qualité de vidéo obtenue et un comportement « normal » des poissons. Les projecteurs sont dirigés vers le plafond afin d'obtenir une lumière diffuse, homogène à l'ensemble de la passe. Le bassin considéré lors des expériences est recouvert d'une plaque opaque, afin d'acquérir une vidéo sans reflet lumineux, pouvant provoquer une gêne, lors du traitement des données (figure 21).

Un miroir est placé sous le troisième bassin, permettant ainsi de considérer le déplacement des poissons (figure 22). Le choix de l'emplacement est justifié par le fait que l'écoulement doit être symétrique et établi, perturbé ni par la chute d'eau située en aval, ni par l'arrivée d'eau située en amont.



Figure 22 : Photo du miroir situé sous le troisième bassin de la passe

Afin de ne pas aiguïser la curiosité des poissons, du papier noir a été placé sur les vitres latérales, ainsi que sur les vitres inférieures, exception faite bien entendu de la passe servant à obtenir les vidéos, pour laquelle seules les parois latérales furent recouvertes de papier noir. Pour ne pas perturber les poissons, et pour conserver à cet effet des conditions homogènes entre les bassins, une bâche a été utilisée afin d'apporter le moins de lumière possible à la face inférieure du troisième bassin de la passe.



Figure 23 : Conditions d'enregistrement

III) 2) Matériels biologiques

Pour chaque configuration, approximativement 120 poissons ont été testés. Ce nombre permet d'obtenir des résultats exploitables de manière statistique. Le stockage d'un tel nombre de

poissons, ainsi que le choix des espèces intéressantes et la taille des individus à tester, constituent des problématiques qu'il est nécessaire d'étudier.

III) 2) 1) Les nitrites

Le stockage d'un nombre conséquent de poissons soulève le problème de la concentration en nitrites dans les viviers. En effet, les poissons sont stockés dans deux viviers de 300 litres chacun. Ceux-ci constituent un circuit fermé, dans lequel l'eau n'est jamais renouvelée. Les déchets liés à la présence des poissons s'accumulent progressivement pour finalement provoquer leur mort, lorsqu'une concentration supérieure à 0,8 mg/L est atteinte. De plus, les pompes disponibles pour la recirculation de l'eau présentent une puissance inférieure à celle nécessaire pour un tel vivier. En effet, le débit fourni par la pompe correspond à un vivier de 100 litres. Les tests nitrites utilisés ont confirmé cette hypothèse. L'ajout d'un activateur biologique fut nécessaire, afin qu'une population bactérienne permette la réduction de la concentration en nitrites.

III) 2) 2) Les espèces considérées

Le choix des poissons utilisés lors des tests s'est bien entendu effectué sur la disponibilité des poissons récupérés lors des différentes pêches électriques ou concours de pêche. Il fut cependant également dirigé vers des poissons de formes différentes. En effet, la relation entre la forme et la fonction natatoire des poissons a fait l'objet de multiples études. Outre la longueur des poissons, des facteurs morphologiques et physiologiques sont importants pour expliquer les performances de nage.

De nombreux aspects de la morphologie des poissons ont été identifiés pour caractériser les capacités de nage. Certaines formes de poissons sont mieux adaptées à l'un des trois modes de natation (figure 24) : soit à l'accélération, soit à la nage soutenue, soit à la manœuvre. La plupart des poissons ne sont néanmoins pas des spécialistes, mais des généralistes, dont les performances sont honorables dans les trois domaines.

Les poissons adaptés à la nage transitoire ont un corps et une nageoire médiane très large. Le corps est assez souple pour onduler avec une grande amplitude, les surfaces du corps et des nageoires doivent être importantes et la proportion des muscles prépondérantes.

Pour la nage soutenue, le modèle idéal représente un corps rigide rattaché, par un fin pédoncule caudal, à une queue large et mince. Le corps lui-même serait fusiforme et de largeur maximale en un point situé entre le tiers et la moitié de la distance de la tête à la queue.

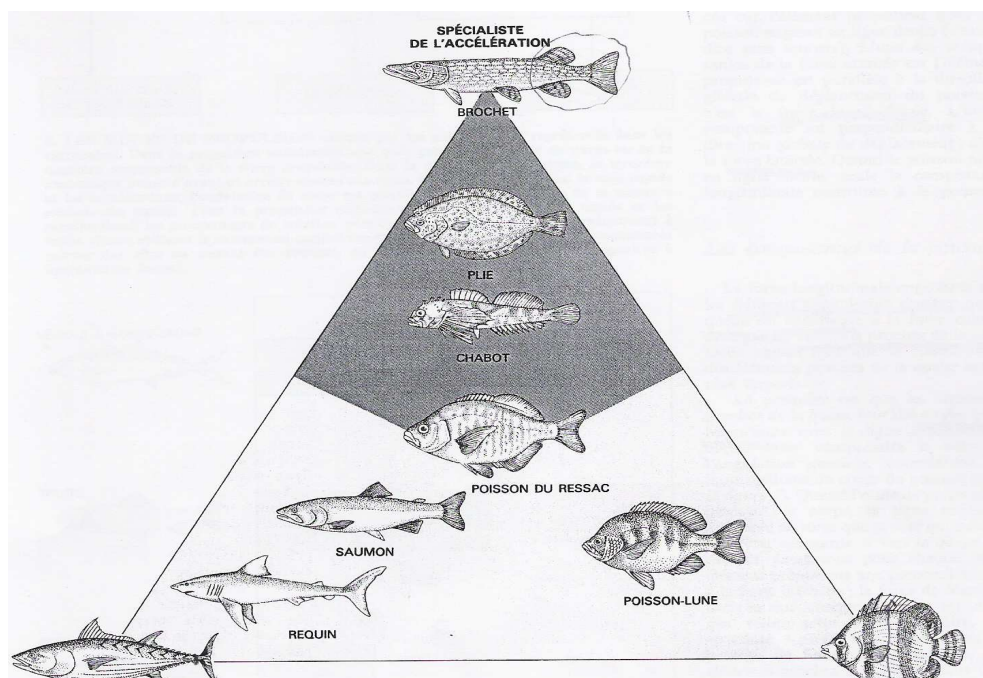


Figure 24 : Diagramme ternaire fonction-morphologie (Webb, 1984)

Les poissons adaptés à la manœuvre ont des corps aplatis latéralement, de contour arrondi ou en losange. De plus, les nageoires supérieures et inférieures prolongent la partie postérieure effilée du corps. Ils possèdent des nageoires pectorales haut placées et des nageoires pelviennes (Webb, 1984).

Certains rapports sont importants à considérer (figure 25). Ainsi, le facteur de profondeur du pédoncule caudal au carré est important. Ce facteur est égal à la valeur de la largeur la plus étroite entre le corps du poisson et la nageoire caudale divisée par la valeur de la plus grande hauteur du corps du poisson. Une valeur élevée de ce facteur témoigne d'un poisson capable de grande accélération, mais possédant de faibles vitesses de croisière.

De même, le ratio d'aspect est important. Ce ratio est égal à la racine carrée de la valeur de la largeur de la nageoire caudale lorsque celle-ci est en extension maximale divisée par la valeur de l'aire de la nageoire caudale en extension maximale.

Ce ratio a une grande influence sur la capacité de nage des poissons. Un fort ratio d'aspect est caractéristique de poissons pélagiques marins, qui nagent sur des grandes distances, avec une certaine vitesse de croisière (Fisher et Hogan, 2007).

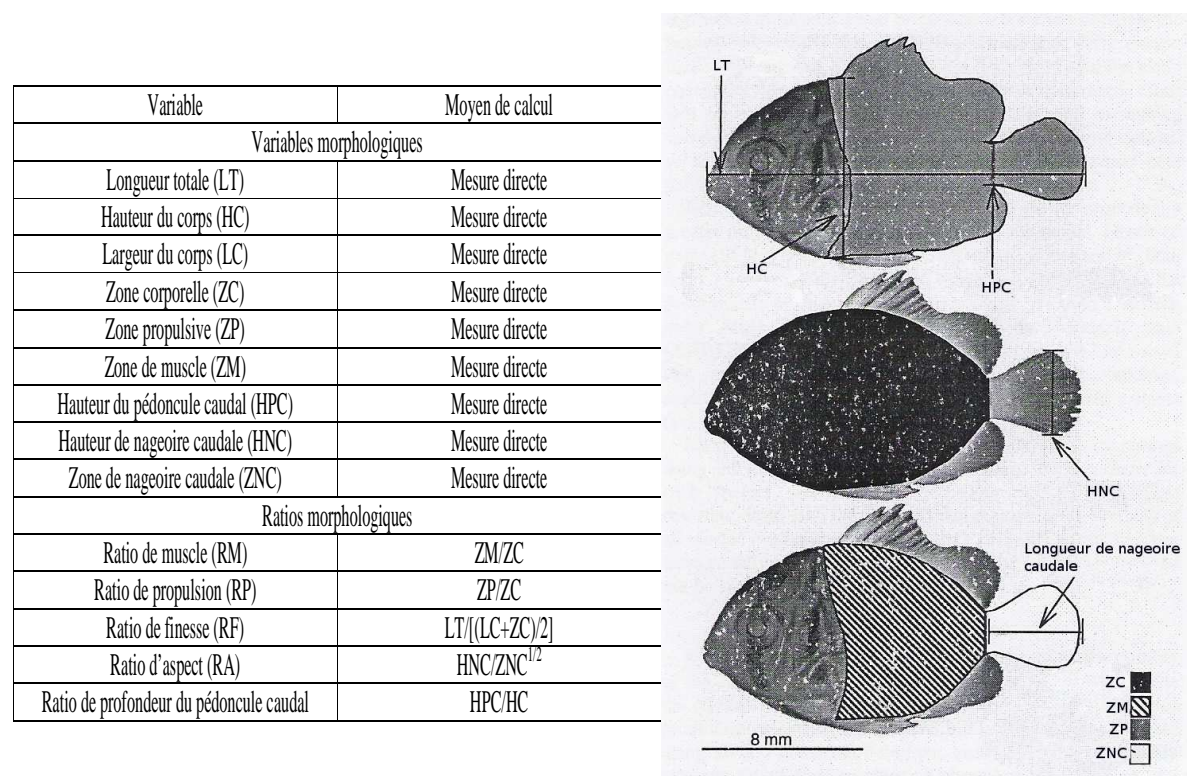


Figure 25 : Variables et rations importants à considérer pour les capacités de nage des poissons (d'après Fisher et Hogan, 1984)

III) 2) 3) Taille des individus

La taille des poissons est un élément important à considérer. En effet, l'échelle géométrique de la passe à poissons est de $\frac{1}{4}$. L'échelle des poissons ne doit bien entendu pas être la même. Le paramètre primordial à considérer est la vitesse maximale de nage, nommée encore maximum speed (Tudorache *et al.*, 2007) ou burst speed. Cette vitesse est celle fournie par les muscles blancs pendant quelques millisecondes à quelques secondes. Cette vitesse est

majoritairement utilisée pour échapper aux prédateurs ou pour attraper les proies (Tudorache *et al.*, 2007).

Sur la figure 26, sont représentées les vitesses maximales de nage en fonction de la température et de la longueur des poissons pour les salmonidés. Dans le cas présent, la température de la passe à poissons est proche de 18°C (figure 32). Pour une truite de 25 cm, correspondant à un petit individu, la vitesse maximale de nage correspondante est d'environ 3,3 m/s. Les vitesses dans la passe étant divisées par deux, les truites recherchées pour les tests sont donc les truites ayant une vitesse maximale de 1,65 m/s. On constate sur le diagramme que les truites correspondantes ont une taille approximative de 8 cm.

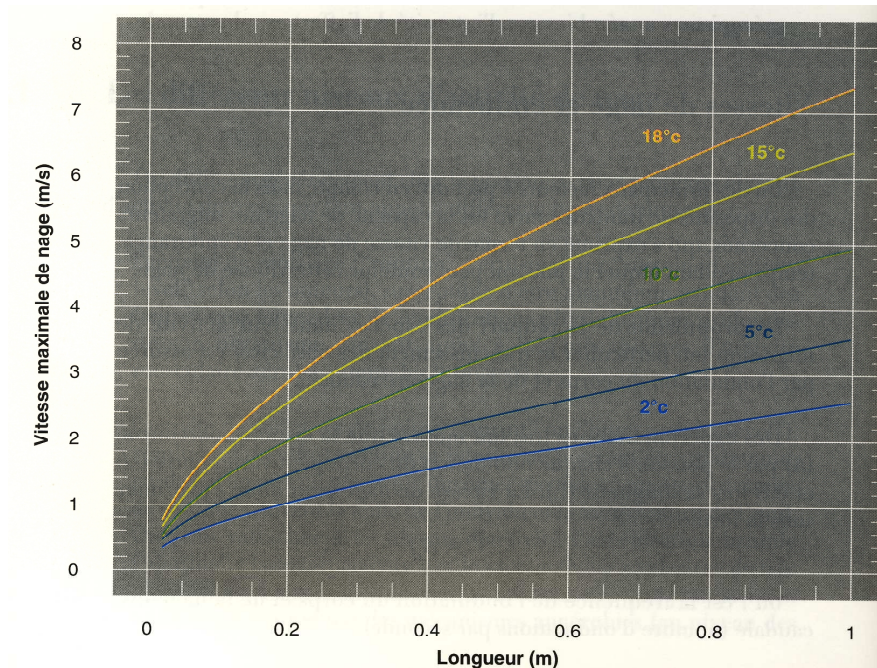


Figure 26 : Vitesse de nage en fonction de la taille du poisson et de la température pour les salmonidés (Larinier *et al.*, 1998, d'après Beach, 1984)

Cette information est relativement bien corrélée avec la formule donnant le lien entre la longueur du poisson et sa vitesse maximale de nage : $U_{mb} \text{ (m/s)} = 0,4 + 7,4 L \text{ (m)}$ (M. Baran, communication personnelle). Pour une truite de 25 cm, la vitesse maximale de nage obtenue est de 2,25 m/s. Une truite ayant une capacité de nage maximale deux fois moins importante aurait ainsi une taille de $(1,125 - 0,4) / 7,4$, soit environs 10 cm.

Les poissons servant pour les tests sur la passe à poissons doivent, de manière générale, avoir une taille comprise entre 10 et 12 cm.

Les considérations concernant les variations de capacités de nage en fonction de la morphologie des poissons justifie l'utilisation d'espèces de morphologies différentes lors des tests. Les espèces sont sélectionnées parmi les deux grands groupes de poissons présents en France : les salmonidés et les cyprinidés. Le choix d'espèces différentes lors de tests sur passe à poissons est commun à d'autres études. Pour exemple, une étude (Castro-Santo, 2004) s'intéresse à l'établissement d'équations permettant d'effectuer un lien entre fréquence de tentative de franchissement et capacité de nage. Pour ce faire, deux espèces sont considérées et comparées : les meuniers noirs (*Catostomus commersoni*) et les dorés (*Stizostedion vitreum*). Une autre étude (Peake, 2008) étudia le comportement du brochet *Esox lucius*, du

doré jaune, *Sander vitreus*, ou encore du meunier noir, *Catostomus commersonii*. L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus permirent une comparaison entre les espèces utilisées.

III) 2) 4) Description des espèces cibles

III) 2) 4) 1) La truite fario, *Salmo trutta fario*

Le premier choix d'espèces s'est porté sur la truite (figure 27). En effet, ces poissons présentent l'avantage d'être disponibles très facilement grâce à la pisciculture située à Chauvigny. Le choix s'est porté, comme dans le cas des études précédemment menées, sur la truite fario, meilleure nageuse que la truite arc en ciel, également disponible à la pisciculture.

Les exigences très précises de plusieurs espèces d'eau douces en matière de frayères, de nurseries et de croissance les conduisent à d'importants déplacements au sein du réseau hydrographique. Pour survivre, cette espèce doit effectuer des migrations.

Evoluant par nécessité dans de vastes domaines, la truite fario est le témoin de l'état des rivières et des effets des activités humaines (Conseil Supérieur de la Pêche, 2000).

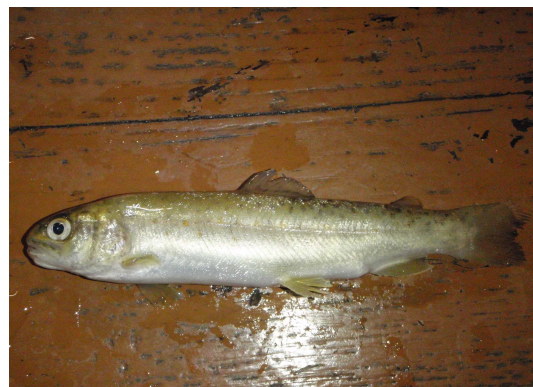


Figure 27 : Truite fario, *Salmo trutta fario*

III) 2) 4) 1) 1) Description

La forme générale du corps est élancée, la tête forte, la bouche largement fendue (extrémité postérieure du maxillaire dépassant l'aplomb du bord postérieur de la pupille), la nageoire caudale grande et faiblement fourchue (droite voire arrondie chez les spécimens âgés). La tête et le corps du vomer sont pourvus de nombreuses dents persistantes. La truite est une espèce polymorphe quant à sa coloration et aux dimensions atteintes à l'âge adulte.

Lors de la reproduction, la robe s'intensifie et s'assombrit et les mâles ont un bec à la mâchoire inférieure.

En rivière, la truite est exigeante en oxygène dissous (>6 mg/l). De ce fait, la truite colonise l'amont des grands fleuves et leurs affluents et tous les petits cours d'eau côtiers. Dans le cas des expériences, l'oxygénation de l'eau est assurée par la chute d'eau présente en aval de la passe.

Les truitelles colonisent les milieux peu profonds à vitesses de courant modérées et à granulométrie moyenne. Au cours de leur développement, les juvéniles recherchent des hauteurs d'eau plus élevées et les adultes sont retrouvés dans des abris offerts par les milieux plus profonds ou ombragés, aux courants lents. La diversité des habitats est un facteur important du biotope de l'espèce notamment en raison d'une occupation différente de l'espace en fonction du type d'activité.

La truite effectue des migrations de reproduction vers l'amont (existence d'un possible instinct de retour au ruisseau natal). Elle est strictement carnivore et a un régime alimentaire varié (insectes aquatiques et terrestres et leurs larves, crustacés, mollusques, petits batraciens, poissons). Enfin, cette espèce peut présenter un intérêt patrimonial, dans la mesure où sa présence dans un cours d'eau est synonyme de sa bonne qualité et du maintien de l'intégrité de ses habitats.

La répartition actuelle est vaste. En France, on trouve la truite commune dans presque toutes les têtes de bassins. Les truites de rivière et les truites de mer sont les plus largement répandues (Keith et Allardi, 2001).

III) 2) 4) 2) Le goujon, *Gobio gobio*

Par la suite, les espèces choisies pour les tests ont été celles disponibles suite aux pêches électriques réalisées par le personnel de l'ONEMA. Une espèce relativement abondante fut le goujon (figure 28).



Figure 28 : Goujon, *Gobio gobio*

III) 2) 4) 2) 1) Description et problèmes

Le goujon possède un corps allongé, un museau épais, une bouche sub-terminale munie d'une paire de barbillons. La tête et les yeux sont relativement grands. C'est une espèce très polymorphe. Le corps est verdâtre, moucheté de brun sur le dos, les flancs et les nageoires. Le ventre est blanc argenté. Une tâche sombre sur l'opercule est présente. Il est généralement associé aux espèces de la zone à barbeau, et est bien représenté dans la zone à ombre et à brème, plus rarement dans la zone à truite. Sa reproduction est d'avril à juillet (Keith et Allardi, 2001). Une centaine d'individus furent disponibles, permettant ainsi des tests relativement significatifs. Deux problèmes majeurs se sont rapidement imposés lors des tests avec cette espèce de poissons. Tout d'abord, le goujon est incontestablement une espèce de fond, cherchant quasiment perpétuellement un contact avec celui-ci. L'absence de rugosité dans la passe du laboratoire ne permet pas aux goujons de se mouvoir naturellement. Le second problème posé fut le comportement du goujon, cherchant sans cesse le contact avec ses congénères. En effet, lors des tests, un individu disposé à une extrémité d'un bassin était rejoint presque immédiatement par d'autres goujons. En résumé, le goujon représente une espèce fouisseuse qui vit en bancs (Keith et Allardi, 2001), inadaptées pour les tests effectués.

Les pêches électriques dans les cours d'eau se sont finalement révélées relativement infructueuses pour capturer une centaine d'individus de taille réduite. En effet, les hauts niveaux d'eau ont entraîné une forte turbidité et ainsi rendu très difficile le bon déroulement des pêches. D'autres part, la proportion de petits individus s'est révélée relativement faible. Le nombre de pêches à réaliser aurait été trop important, nécessitant trop de temps.

La solution choisie fut d'aller dans des étangs pour effectuer des pêches électriques afin de récupérer un nombre suffisant de poissons nécessaire aux expériences. Un concours de pêche permit également de compléter le lot de gardon récupéré lors des pêches d'étangs.

III) 2) 4) 3) Le gardon, *Rutilus rutilus*

III) 2) 4) 3) 1) Description et problèmes

Le gardon (figure 29) possède un corps élancé, une nageoire dorsale à l'aplomb des pelviennes, une bouche étroite et terminale. Les nageoires pelviennes et anale sont d'une teinte rouge brique peu marquée, les autres étant plus grisâtres. Les yeux sont rouges. Le gardon est le cyprinidé le plus répandu dans les zones lenticules et aval des cours d'eau. Il est eurytherme et euryhalin et se rencontre même dans les estuaires et quelques mers intérieures.



Figure 29 : Gardon, *Rutilus rutilus*

Le principal problème rencontré avec cette espèce fut sa fragilité, face à une manipulation. En effet, la perte des écailles (visible sur la figure 29) fut un problème récurrent, témoin de la sensibilité accrue de ces poissons aux expériences successives.

Les poissons utilisés pour l'exploitation des résultats furent donc uniquement des truitelles.

Les tailles des poissons fournis par le pisciculteur furent relativement proches de celles recherchées. Les caractéristiques des trois lots de poissons figurent dans les tableaux 3, 4 et 5.

Moyenne	11,67
Ecart type	0,93
Variance	0,87
Médiane	11,85

Tableau 3 : Caractéristiques du lot n°1 de poissons

Moyenne	11,60
Ecart type	1,01
Variance	1,02
Médiane	11,80

Tableau 4 : Caractéristiques du lot n°2 de poissons

Moyenne	9,91
Ecart type	0,95
Variance	0,91
Médiane	9,70

Tableau 5 : Caractéristiques du lot n°3 de poissons

III) 4) Expériences

III) 4) 1) Hauteurs d'eau

Les premières utilisations de la passe à poissons du laboratoire consistèrent en des tests de hauteurs d'eau. En effet, selon les pentes de la passe, les différentes largeurs et les différents débits étudiés, la guillotine doit être réglée, afin d'obtenir un niveau d'eau égal dans chacun des bassins de la passe, tout comme cela fut réalisé lors de l'étude de comportement et de passage sur le brochet, le doré jaune, et le meunier noir (Peake, 2008). Un niveau différent entre les bassins entraînerait des chutes d'eau d'importances variées, rendant la difficulté de la passe croissante ou décroissante et faussant l'étude. Les annexes 1, 2, 3 et 4 illustrent les valeurs de hauteurs d'eau à mi-bassin, en fonction du débit et de la pente.

Au total, 20 géométries distinctes de passes à fentes verticales (variant par leur pente et leur largeur) ont été définies pour trois débits d'écoulement : 576 L/s, 736 L/s et 864 L/s ce qui a donné 59 configurations géométriques et hydrauliques étudiées. En effet, pour la pente de 5% et le débit de 864 L/s, il ne fut pas possible d'étudier le débit. Des travaux concernant divers débits et pentes furent également menées (Cea *et al.*, 2007) lors d'une étude en Espagne (pente de 5,7 et 10,054% et débits entre 20l/s et 125l/s).

III) 4) 2) Déroulement des expériences

III) 4) 2) 1) Nombre de poissons par expérience

Pour chaque expérience, entre vingt et trente poissons furent déplacés d'un vivier à un sac plastique contenant de l'eau du vivier, à l'aide d'une épuisette. Le choix de ce nombre de poissons s'explique par le fait qu'un nombre de poissons inférieur à 20 serait faible, en terme de représentativité. D'autre part, plus de 30 poserait problème dans le traitement des données. En effet, le décompte des poissons pourrait s'avérer complexe lors de la dévalaison ou de la montaison simultanée de plusieurs poissons. Le sac fut ensuite disposé dans le premier bassin de la passe afin d'éviter un éventuel choc thermique et d'habituer les poissons à la température de l'eau de la passe. Par la suite, l'enregistrement débuta, et les poissons furent relâchés dans le bassin.

Les poissons, provenant de la pisciculture, furent placés dans les viviers au minimum 24 heures avant de débiter les expériences. Ceci permet de les habituer au stress et à la fatigue liés au transport (Peake, 2008).

III) 4) 2) 2) Débit et durée de l'expérience

Le débit de l'étude est conservé tout au long des expériences et égal à 736 L/s, à l'échelle réelle. Ce débit représente relativement bien les débits généralement présents au sein de ce type de passe. En effet, le débit de calage de ce genre d'ouvrage est de 0,2 à plus de 0,6 m³/s.

La durée de l'expérience est de 90 minutes. Cette durée est un bon compromis entre la prise de décision de franchissement des poissons et le temps maximum allouable pour une expérience. D'un côté pratique, ceci permet d'utiliser le caméscope en mode « long play », permettant ainsi une durée d'enregistrement de 90 minutes. Trente minutes après le début de l'expérience, les poissons sont considérés comme étant habitués à leur nouvel environnement. 45 minutes et 60 minutes après le début de l'expérience, une agitation est exercée dans le premier bassin à l'aide d'une épuisette afin de motiver les poissons hésitant à remonter. Au terme des 90 minutes, la pompe est arrêtée et les poissons sont récupérés afin d'être placés à nouveau dans le vivier.

III) 4) 2) 3) Ordre des configurations

Les poissons proviennent de pisciculture, et ne sont ainsi pas adaptés au courant. Cependant, au fur et à mesure des jours et des expériences, les poissons « progressent » inévitablement et s'adaptent progressivement au courant. Après leur arrivée au laboratoire, les poissons sont disposés dans la passe pendant 90 minutes, sans enregistrement vidéo. Cette manipulation vise à adapter les poissons au courant, avec l'objectif de réduire cette adaptation susceptible d'altérer la comparaison entre les différentes situations. Les expériences ont donc été réalisées dans un ordre différent, entre les deux lots de poissons, afin de détecter une éventuelle anomalie dans les résultats.

L'intégralité des configurations est testée tout d'abord sur une largeur donnée, puis sur l'autre largeur. Ainsi, pour un lot de poissons, toutes les configurations ont été réalisées pour la grande largeur, avant d'être testées sur la petite largeur. Cette mesure permet de conserver des conditions de hauteurs d'eau similaires. Des expériences ont été menées avec pour objectif de connaître les hauteurs d'eau pour chaque géométrie de la passe (annexe 1, 2, 3 et 4). Il est néanmoins préférable de conserver, dans la mesure du possible, les mêmes conditions, et cette précaution va dans ce sens.

III) 4) 2) 4) Température

Une difficulté soulevée lors des manipulations fut celui de la température. Pour exemple, la truite est considérée comme un poisson d'eau fraîche (températures comprises entre 0 et 20°C) (Keith *et al.*, 2001). La capacité de nage des poissons est fortement dépendante de la température de l'eau (Casto-Santos, 2004)(figure 26). Ce diagramme est fréquemment cité dans de nombreuses recherches, dont celle concernant l'étude de différents designs de passes à poissons, réalisée en Espagne (Cea *et al.*, 2007). Dans celle-ci, les tests considèrent la turbulence et les vitesses d'écoulement pour déterminer les caractéristiques optimales d'une passe.

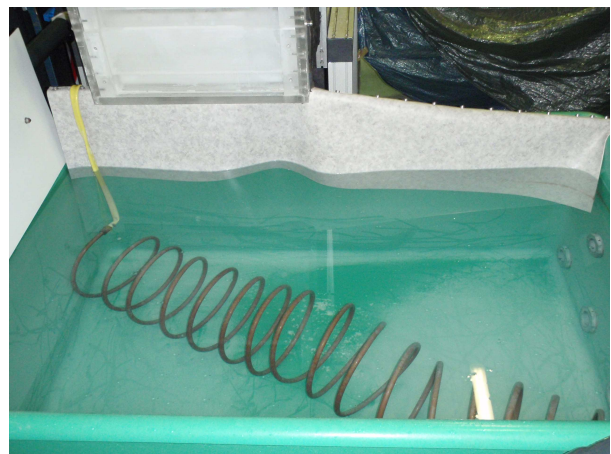


Figure 30 : Système de refroidissement

18°C constitue un optimum en terme de nage pour les salmonidés. Pour des températures inférieures ou supérieures, une diminution rapide des capacités est notable. Ainsi, suite à un problème lors d'une expérience lors d'une journée chaude, il a été nécessaire d'installer un système de refroidissement de l'eau pour les viviers, mais également pour l'eau de la passe elle-même. Ainsi, deux tuyaux de cuivre enroulés furent disposés dans les deux bassins récepteurs, ceux-ci étant reliés au réseau d'eau réfrigérée disponible sur le site (figure 30). Dans le vivier, un tuyau en plastique épais fut disposé, lui aussi relié au réseau d'eau réfrigérée. Le choix d'un tuyau en cuivre fut évité, afin de ne pas créer une différence trop importante de température pour le poisson entre la température de l'eau et celle au contact du tuyau. Les températures dans les viviers et celles présentes dans la passe sont représentées sur les figures 31 et 32.

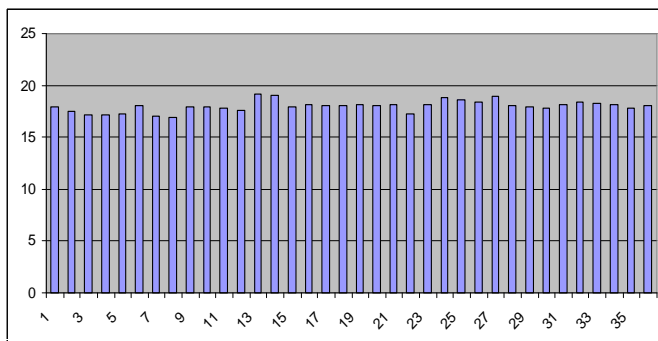


Figure 31 : Température dans les viviers au cours des expériences

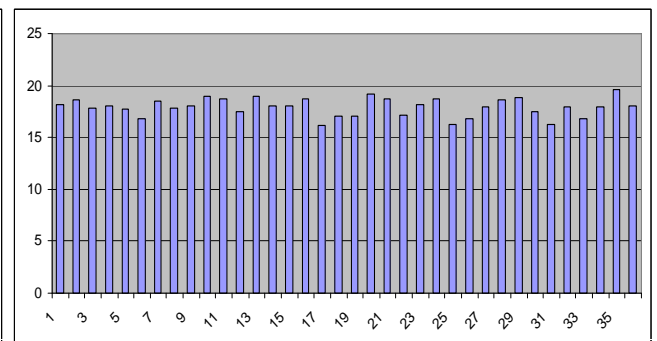


Figure 32 : Température dans la passe à poissons au cours des expériences

On constate sur ces diagrammes des variations de températures relativement faibles. En ce qui concerne les viviers, la moyenne de température est de 18,00°C, l'écart type étant égal à 0,55. Dans le cas des expériences dans la passe, la moyenne de température est de 17,91, tandis que l'écart type possède une valeur de 0,86. Les faibles différences de température observées permettent d'assumer que celles-ci n'ont pas d'incidences sur les performances des poissons et les résultats obtenus.

III) 5) Présentation et analyse des résultats

III) 5) 1) Recensement des données

Après avoir transféré toutes les vidéos sur ordinateur, le premier travail concernant les données recensées a été de découper les vidéos. En effet, toutes les vidéos durent une heure et demi, avec une taille de fichier correspondante, une fois la vidéo transférée sur ordinateur, proche de 20 gigaoctets. Il fut ainsi nécessaire d'effectuer le découpage des vidéos progressivement, au fur et à mesure des expériences, sous peine de manquer de place pour le stockage des données. Par la suite, pour chaque vidéo, le nombre de poissons effectuant chacun des scénarii possible fut recensé. Pour chacun des poissons, le temps de séjour dans la passe ainsi que le moment d'entrée dans la passe par rapport au début de l'expérience furent recensés. Une fiche d'exemple, représentant l'annexe 5, illustre le recensement de ces données. L'image située en haut de l'annexe représente les différents scénarii possibles :

AB : le poisson rentre dans le bassin n°3 en franchissant la fente aval et pénètre dans le bassin n°4 en franchissant la fente amont.

AD : le poisson rentre dans le bassin n°3 en franchissant la fente aval puis est expulsé par cette même fente.

AE : le poisson rentre dans le bassin n°3 en franchissant la fente aval puis reste jusqu'à la fin de l'expérience dans ce bassin.

CD : le poisson est expulsé du bassin amont puis est expulsé du bassin n°3 par la fente amont.

CB : le poisson est expulsé du bassin amont, mais réussit à franchir à nouveau la fente amont.

CE : le poisson est expulsé du bassin amont, et reste dans le bassin n°3 jusqu'à la fin de l'expérience.

Les deux grandes catégories de scénarii sont ainsi représentées :

Une colonne « A », recensant tous les poissons étant rentrés dans le bassin n°3 par franchissement de la fente aval. Cette colonne est elle-même subdivisée en plusieurs colonnes, correspondant aux différents scénarii possibles (cités ci-dessus) après avoir pénétré dans ce bassin (AB, AD ou AE). Pour chaque scénario, deux colonnes sont présentées : la première représente le temps de séjour du poisson considéré, ainsi que la durée à partir de laquelle ce poisson rentre le bassin. Le nombre de poisson n'est donc pas clairement indiqué sur cet annexe, mais correspond au nombre de ligne par scénario. Pour exemple, au scénario CB est associé deux lignes, donc deux poissons. Le scénario CE, lui, est représenté par une seule ligne, réalisé par un seul poisson.

Ce recensement peut être comparé à celui réalisé lors d'une étude sur le brochet, le doré jaune, et le meunier noir (Peake, 2008). Pour chacun d'entre eux fut recensé le nombre d'essais de franchissement dans un canal expérimental. Différentes variables furent considérées, telles que les essais de montaison (correspondant à la somme des scénarii AB et AD) et les réussites de montaison (scénario AB ici). Pour exemple, lors de cette expérience, 74,4% des brochets, 76,4% des dorés jaunes et 77,3% des meuniers noirs étant entrés volontairement dans le canal réussirent à réaliser une montaison complète.

III) 5) 2) Analyse descriptive des données

III) 5) 2) 1) Efficacité locale de franchissement et indice d'attractivité

L'efficacité locale de franchissement E_L , utilisée dans les études précédentes (Tarrade, 2007 ; Boisson, 2006), est évaluée pour chaque configuration à partir des enregistrements vidéo effectués au niveau du bassin N°3. Elle permet d'estimer le taux de franchissement à l'échelle d'un bassin (en l'occurrence le troisième). Elle est exprimée par le rapport entre le nombre n_{amont} d'individus franchissant le déflecteur amont par montaison et ayant franchi le déflecteur aval (soit le nombre de poissons ayant franchi le bassin N°3) et le nombre n_{aval} d'individus franchissant le déflecteur aval par montaison (soit le nombre de poissons ayant pénétré dans le bassin N°3) : $E_L = (n_{\text{amont}}/n_{\text{aval}})$. Cet indice est intéressant puisqu'il tient compte uniquement des poissons ayant une réelle volonté de remontée. D'autres paramètres peuvent être considérés, tel que l'indice d'attractivité, qui représente le pourcentage de poissons se présentant à l'entrée du bassin n°3, par rapport au nombre total de poissons.

III) 5) 2) 2) Analyse en Composante Principale

La seconde étape de l'analyse descriptive a consisté à l'utilisation d'une méthode multivariée, l'analyse en composante principale (ACP), grâce au logiciel ADE4.

Cette méthode permet de décrire la variabilité de l'ensemble du jeu de données ainsi que les corrélations entre les variables biologiques décrites.

Cette méthode d'analyse de données quantitatives consiste à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre n variables aléatoires. Les sommes des colonnes et des lignes du tableau de données sont considérées. Ces sommes doivent donc représenter une grandeur, sans quoi une ACP est inutile. En considérant l'annexe 6, on constate que la somme des lignes représente l'activité des poissons au sein du bassin, et que la somme des colonnes représente elle la part de chacun des scénarii possible.

Lorsque l'on se place en dimension deux, les points disponibles (l'échantillon de points tirés suivant la loi conjointe de X_1 et X_2) peuvent être représentés sur un plan. Le but d'une ACP sur

ce plan est de déterminer les deux axes qui expliquent le mieux la dispersion des points disponibles. Ces deux axes sont issus d'une combinaison de facteurs. L'objectif est donc de trouver des combinaisons de variables, expliquant la variabilité des données.

Les p variables du système doivent être considérées pour prendre en compte toute la variabilité du système. L'objectif de cette analyse est de décrire, à l'aide de $q < p$ composantes un maximum de cette variabilité.

Les avantages de l'utilisation de cette méthode sont :

- une réduction des données à q nouveaux descripteurs
- une visualisation des données à 2 ou 3 dimensions (si $q = 2$ ou 3)
- une interprétation des données : liaisons inter-variables

III) 5) 3) Analyse statistique des données

Des études statistiques sont fréquemment réalisées pour vérifier la signification des résultats obtenus. Ainsi, une étude canadienne (Peake, 2007) nécessita l'intervention de tests à l'aide de poissons. À l'issue de ceux-ci, une analyse statistique multiple fut réalisée, permettant de déterminer les effets de différents facteurs biotiques et abiotiques, tels que la température de l'eau, sa vitesse ou encore la durée de captivité des poissons. Cette analyse permet de considérer, en fonction de ces effets, la probabilité pour chaque espèce de poisson qu'une tentative de montaison des poissons soit concluante. L'équation de probabilité proposée qu'un brochet tente de remonter le chenal est par exemple la suivante :

$$P = 1/[1+\exp\{-[11,0230-(0,1410 \times FL)-(0,6890 \times V)+(0,0087 \times V)+(0,0087 \times T \times FL)]\}]$$

Avec FL la « fork length », la longueur du poisson du museau à la fourche de la nageoire caudale et V le volume du bassin en aval du chenal.

III) 5) 3) 1) Normalité des données

La normalité des données a été testée par le test de Lilliefors.

Le test de Lilliefors est une variante du test de Kolmogorov-Smirnov où les paramètres de la loi sont estimés à partir des données. La statistique du test est calculée de la même manière. Mais sa loi est tabulée différemment, les valeurs critiques sont modifiées pour un même risque α . Elles ont été obtenues par simulation.

La statistique du test s'écrit :

$$D = \max_{i=1, \dots, n} \left(F_i - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F_i \right)$$

où F_i est la fréquence théorique de la loi de répartition normale centrée et réduite associée à la valeur standardisée :

$$z(i) = \frac{x(i) - \bar{x}}{s}$$

La table des valeurs critiques D_{crit} pour les petites valeurs de n et différentes valeurs de α doit être utilisée.

III) 5) 3) 2) Analyse des données

Des tests de comparaison multiples par paires permettent de comparer, au travers de la variance des données, les différents tests réalisés.

Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé, au vu des données disponibles (annexe 7). Celui-ci est utilisé lorsqu'il faut décider si k échantillons indépendants sont issus de la même population. C'est donc un test d'identité. Les observations doivent être mesurées sur une échelle numérique ou ordinale (non nominale). Les échantillons peuvent avoir des nombres d'observations différents.

Le test de Kruskal-Wallis est non paramétrique: il ne fait aucune hypothèse sur la forme des distributions sous-jacentes (l'absence de distribution normale justifie donc son utilisation). Comme de nombreux tests non paramétriques, il travaille non pas sur les valeurs des observations, mais sur leurs rangs, une fois ces observations réunies dans un seul échantillon. La statistique de ce test est construite à partir des moyennes des rangs des observations dans les différents échantillons.

IV) Résultats

IV) 1) Comportement des poissons

Les poissons présentent trois grands types de comportement de nage :

- une nage stationnaire qui leur permet de se maintenir dans des zones particulières du bassin (la nage permet la lutte contre la vitesse du courant),
- une nage active leur permettant de progresser de manière continue vers l'amont (vitesse de nage supérieure à la vitesse du courant),
- un entraînement « passif » vers l'aval.

Une autre constatation est que les temps de déplacement et d'arrêt des poissons sont très variables. D'autre part, il est également important de noter que certains poissons réalisent des allers-retours dans la passe, réussissant à franchir la fente aval du bassin n°3, étant expulsé par la suite des bassins amont, puis réussissant à nouveau à pénétrer dans le bassin n°3.

IV) 2) Analyse descriptive

IV) 2) 1) Efficacité locale de franchissement, attractivité et passages définitifs

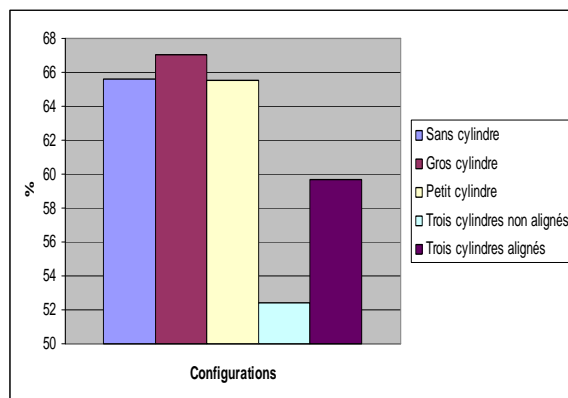


Figure 33 : Efficacité locale de franchissement pour la grande largeur

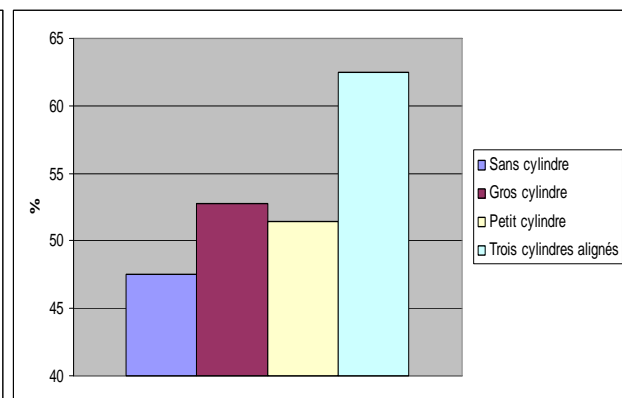


Figure 34 : Efficacité locale de franchissement pour la largeur réduite

La comparaison des configurations préalablement testées (Tarrade, 2007 ; Boisson, 2006) fournit le même ordre hiérarchique d'efficacité locale de franchissement (figures 33 et 34) : La configuration sans cylindre est moins efficace que celle avec gros cylindre, que cela soit pour la situation de grande largeur ou de petite largeur, cette dernière accentuant l'écart

d'efficacité. Il avait déjà été observé que l'ajout d'un cylindre évite l'entraînement par dévalaison des poissons lorsque ceux-ci cherchent à franchir le jet, celui-ci représentant une barrière au sein du bassin.

Les études précédemment effectuées rendent compte d'améliorations nettement plus marquées. L'efficacité locale passe ainsi de 24,7 à 69,8% de la configuration sans cylindre à celle avec un gros cylindre dans le cas de la largeur réduite contre une évolution de 47,5 à 52,8 % dans la présente étude. De même, dans le cas de la grande largeur, les études antérieures témoignent d'une efficacité passant de 49,3 à 80,0% de la configuration sans cylindre à la configuration avec cylindre, contre une progression de 65,6 à 67,0 % ici. Ces différences notables peuvent s'expliquer d'une part par l'absence d'une méthodologie clairement établie lors des études préalables et d'autre part par le nombre de poissons utilisés, variant entre les deux travaux. Pour exemple, les poissons étaient parfois introduits directement dans le bassin n°3 de la passe lors des travaux précédents, démontrant ainsi des capacités de montaison accrues. D'autre part, les lots de poissons étaient plus disparates.

L'ajout d'un petit cylindre dans le jet donne également des résultats intéressants en terme de franchissement local, mais de manière moindre que dans le cas du gros cylindre. En effet, pour la grande largeur comme pour la petite, l'indice d'efficacité locale est plus important que pour la configuration de base, mais moins conséquent que pour la configuration avec un gros cylindre.

La raison de cet écart d'efficacité entre petit et gros cylindre peut s'expliquer par le fait que les forces de cisaillement mentionnées précédemment ne sont probablement pas suffisamment réduites, et l'énergie cinétique turbulente, encore importante, empêche un certain nombre de poissons de pouvoir franchir le jet.

La configuration à trois cylindres non alignés, testée uniquement sur la grande largeur, donne des résultats assez décevants, avec une dernière position en terme d'efficacité.

La configuration à trois cylindres alignés, elle, fournit des résultats surprenants. Sur les tests de grande largeur, elle donne une efficacité limitée, nettement inférieure à celle constatée pour les configurations sans ou avec un cylindre. Avec une largeur réduite, cette configuration présente les meilleurs résultats, dépassant clairement les autres dispositions testées. L'observation de l'efficacité pour chacun des lots de poissons montre des indices relativement proches, excluant des conditions exceptionnelles pour l'un des tests concernant cette configuration. L'explication la plus plausible est que les courants générés par la configuration de grande largeur avec les trois cylindres alignés diffèrent sûrement de ceux générés par la même configuration, mais avec une largeur réduite. Dans ce dernier cas, la barrière physique représentée par les trois cylindres alignés force les poissons à se situer du côté le plus favorable au franchissement (zone B figure 15).

Il serait donc intéressant de caractériser plus en détail les courants générés dans le cas de la configuration de faible largeur avec trois cylindres alignés, afin d'obtenir des écoulements similaires dans le cas de la grande largeur, et de valider les résultats obtenus ici.

D'autres indices peuvent également être pris en compte pour considérer les résultats dans leur ensemble. L'attractivité de la passe est un élément à considérer pour expliquer le nombre de poissons restant en haut de la passe à la fin d'une expérience.

Les résultats d'indices d'attractivité sont représentés dans les graphiques suivants (figures 35 et 36) :

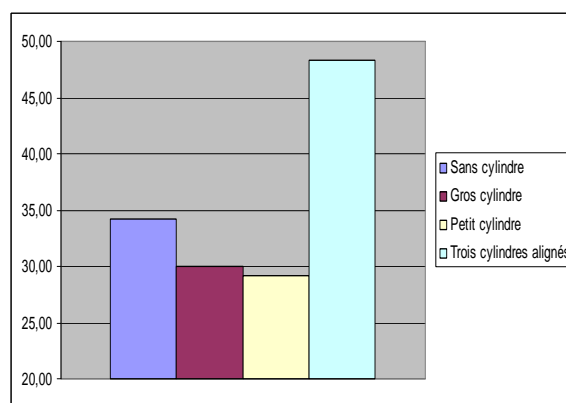
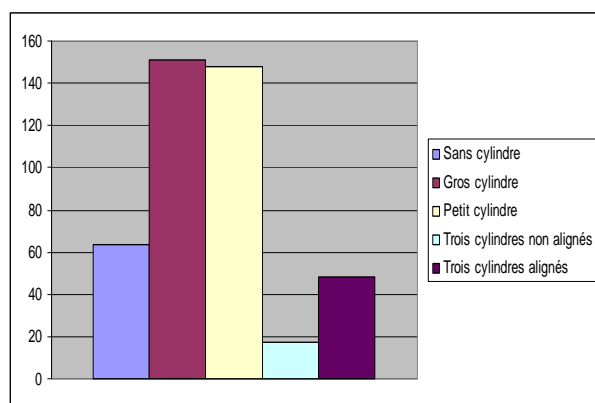


Figure 35 : Indice d'attractivité pour la grande largeur **Figure 36 : Indice d'attractivité pour la largeur réduite**

Concernant la configuration de grande largeur sans cylindre, on constate une attirance assez faible des poissons. L'indice d'efficacité locale est lui moyen. Si l'on considère la fraction de poissons en haut de la passe à la fin de l'expérience par rapport au nombre total de poissons (figure 37), on constate que cette configuration correspond au plus grand nombre de poissons dans le bassin supérieur en fin d'expérience. On peut donc conclure que peu de poissons tentent de remonter la passe, mais ceux-ci y arrivent cependant relativement bien, et ne redescendent pas une fois remontés.

La configuration de petite largeur sans cylindre présente une attractivité assez forte, se situant en seconde position. L'efficacité locale de franchissement est elle très faible. Ceci explique le faible nombre de poissons situés en haut de la passe en fin d'expérience (figure 38).

Pour la configuration de grande largeur avec un gros cylindre, beaucoup de poissons se présentent au bassin n°3, et un très grand nombre d'entre eux parviennent à le franchir. Cependant, cette configuration se situe en seconde position en ce qui concerne le nombre de poissons restant en haut de la passe (figure 37). Ainsi donc, beaucoup de poissons ont la volonté de remonter, un nombre important d'entre eux y parvient, mais un certains nombre d'individus quittent au bout d'un certain moment le bassin supérieur.

L'attractivité de la configuration de largeur réduite avec un gros cylindre est assez mauvaise, tandis que l'efficacité locale de franchissement est elle relativement élevée. Le nombre de poissons ne quittant pas le bassin supérieur est considérable (figure 38). En conclusion, peu de poissons montrent une réelle volonté de montaison, mais ceux qui la possède réussissent à remonter, et ne redescendent pas.

La configuration de grande largeur avec un petit cylindre possède une bonne attractivité et une efficacité locale de franchissement moyenne. Ces deux paramètres expliquent le nombre de poissons restant en haut de la passe (figure 37).

Une attractivité très faible et une efficacité locale de franchissement moyenne caractérisent la configuration de petite largeur avec un petit cylindre. Le nombre de poissons réalisant des passages définitifs témoigne d'un faible nombre de poissons dévalant (figure 38).

La configuration de grande largeur avec trois cylindres alignés présente une très faible attractivité, ainsi qu'une efficacité locale de franchissement faible, ce qui explique le faible nombre de poissons positionnés en amont de la passe par rapport au nombre total (figure 37).

L'attractivité et l'efficacité locale de franchissement très importantes de la configuration de largeur réduite avec trois cylindres alignés se distinguent nettement. Malgré ces facteurs, la fraction de poissons restant dans le bassin supérieur en fin d'expérience est la plus faible parmi toutes les expériences (figure 38).

Beaucoup de poissons veulent remonter la passe, et y arrivent, mais beaucoup dévalent également au bout d'un certain temps.

L'efficacité locale et l'attractivité de la configuration de grande largeur avec trois cylindres non alignés sont les plus faibles de tous les tests réalisés. C'est donc en toute logique que cette situation soit représentée par le plus faible nombre de poissons présents en haut de la passe (figure 37).

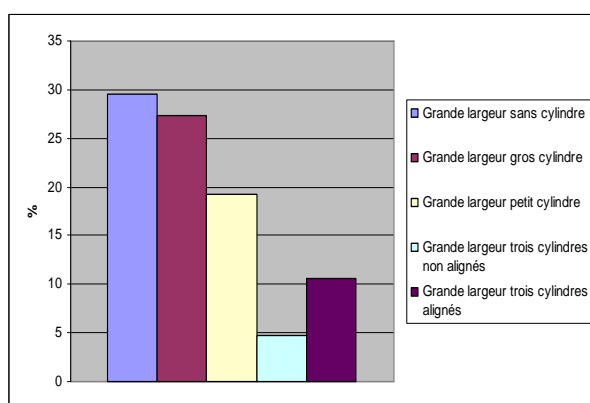


Figure 37 : Nombre de poissons en haut de la passe par rapport au nombre de poissons total pour la grande largeur

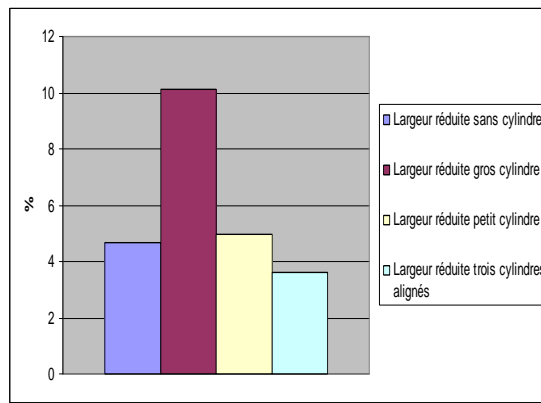


Figure 38 : Nombre de poissons en haut de la passe par rapport au nombre de poissons total pour la largeur réduite

Il convient par la suite de vérifier, par une analyse statistique, la significativité des différences observées, qui sont, comme mentionné précédemment, moins importantes que celles constatées lors des études précédentes.

IV) 2) 1) Analyse en Composante Principale (ACP) et corrélations

Afin de comparer tous les essais entre eux, les données de passages de poissons ont été divisées par le nombre initial de poissons utilisés dans chaque test.

Des analyses inter et intra-classes ont été réalisées, afin de tester la variabilité des données pour les différentes configurations (deux configurations de largeur et quatre configurations de cylindres). La signification de la variabilité expliquée par les différentes configurations a été testées par permutations (1000 permutations). Les variables utilisées sont recensées dans le tableau 9.

Abréviation des variables	Définition
<i>Feav</i>	Passages des poissons dans la fente aval
<i>Famnt</i>	Passages des poissons dans la fente amont
<i>Deval1</i>	Devalaison des poissons à partir du bassin d'observation
<i>Rest1</i>	Poissons restés dans le bassin
<i>Deval2</i>	Devalaison des poissons à partir du bassin amont
<i>Famnt2</i>	Passage des poissons ayant dévalé du bassin amont dans la fente amont
<i>Rest2</i>	Poissons ayant dévalés du bassin amont et restant dans le bassin d'observation
<i>Pass</i>	Poissons passés définitivement au travers des 2 fentes et du bassin d'observation

Tableau 6 : Abréviations et définitions des différentes variables utilisées

Le plan factoriel représenté par les axes F1 et F2 de l'ACP explique plus de 81% de l'inertie du nuage de points (figure 39). Toutes les variables décrivant les mouvements des poissons dans la passe sont bien représentées dans ce plan factoriel.

Celles-ci sont fortement corrélées entre elles, notamment les passages au niveau des fentes amont et aval, tant en montaison (Feav1, Famnt) qu'en dévalaison (Deval1 et Deval2). Ces variables contribuent fortement à l'axe F1, qui explique 67,3% de la variabilité. L'axe F2, lui, est surtout constitué par les poissons restant dans le bassin d'observation après être montés dans le bassin amont (Rest2) ainsi que par les poissons ayant définitivement franchis le bassin d'observation (Pass). Il représente 14,5 % de la variabilité.

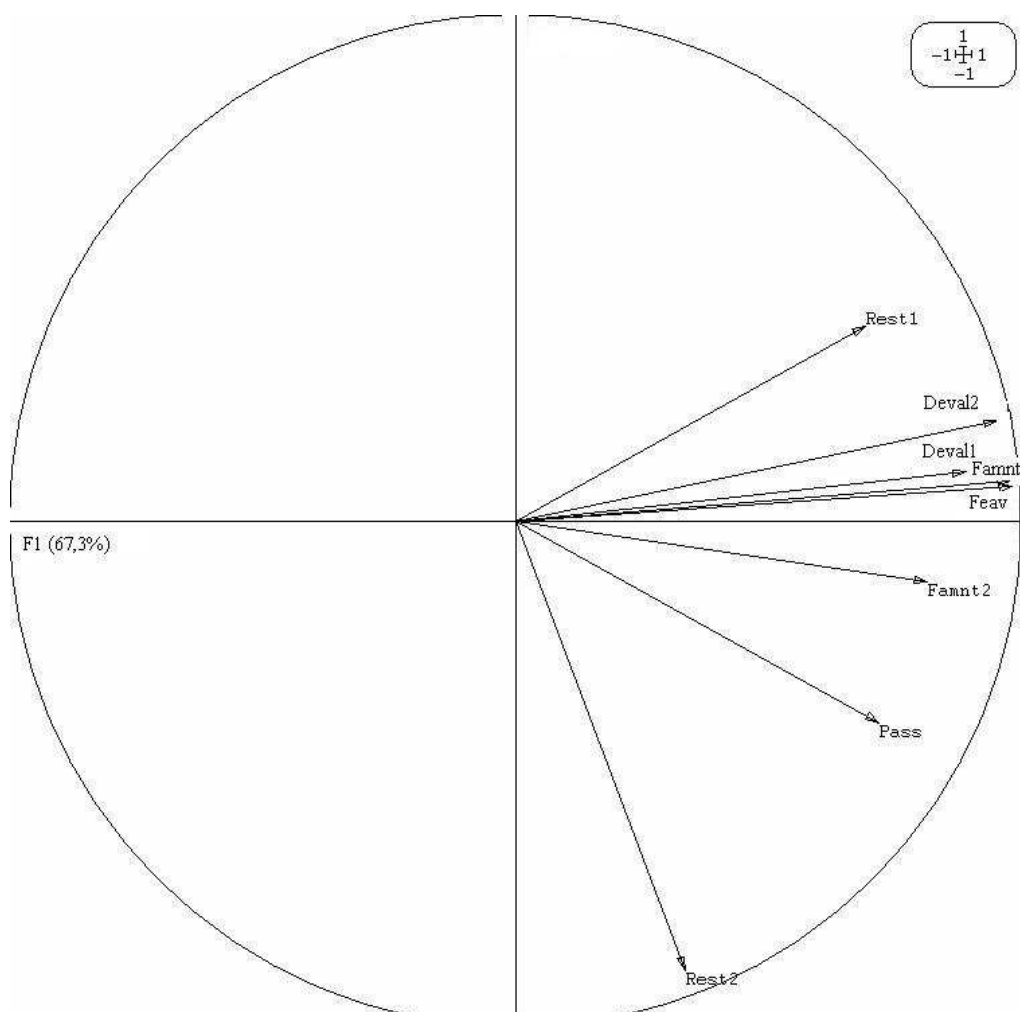


Figure 39 : Cercle de corrélation des variables issu de l'Analyse en Composante Principale

Les corrélations sont notamment très fortes entre:

- les passages fente amont et les dévalaisons fente amont et aval (figure 40)
Ainsi, plus le nombre de poissons réussissant à franchir la fente amont est grand, plus le nombre de poissons dévalant est grand.
- les passages fente aval et les dévalaisons fente aval (figure 41)
Plus le nombre de poissons réussissant à franchir la fente aval est grand, plus le nombre de poissons expulsés par cette même fente est grand.

- les passages fente aval et les passages fentes amont (figure 42).

En toute logique, le nombre de poissons réussissant à franchir la fente amont dépend du nombre de poissons réussissant à franchir la fente aval.

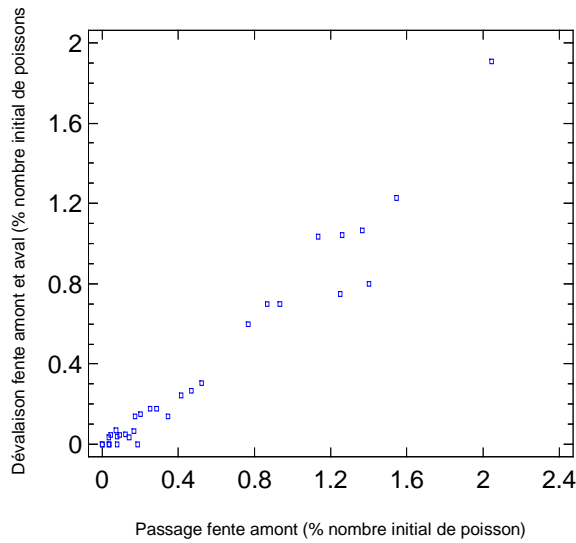


Figure 40 : Corrélations passage fente amont et dévalaison fente amont et aval

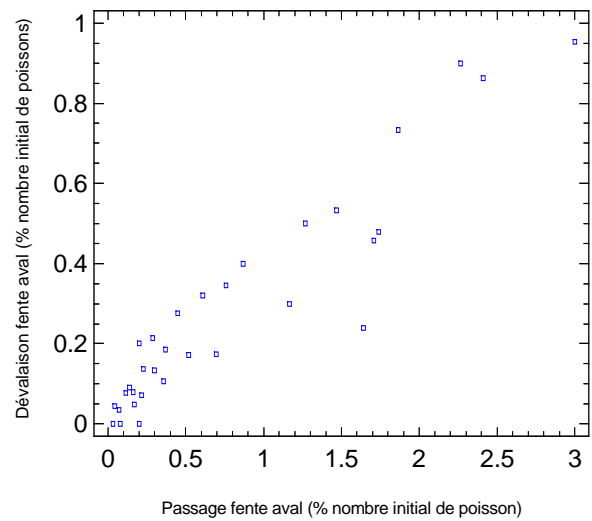


Figure 41 : Corrélations passage fente aval et dévalaison fente aval

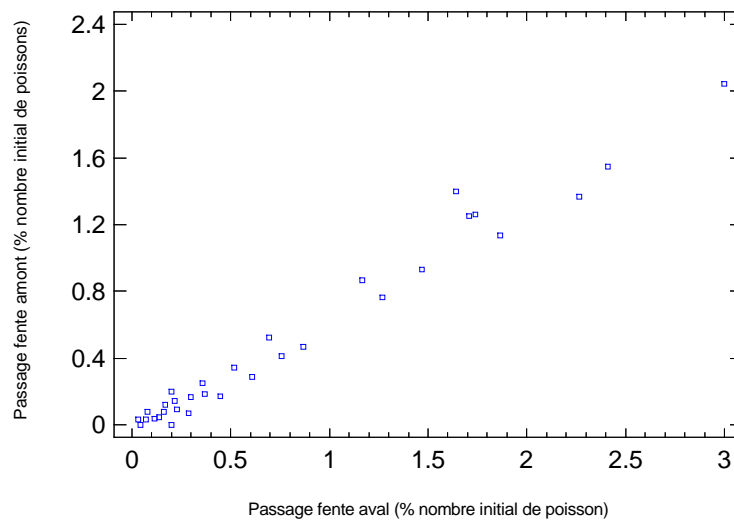


Figure 42 : Corrélations passage fente aval et passage fente amont

Les corrélations sont moins fortes mais toujours significatives entre :

- les passages fente aval et les passages définitifs (figure 43)
- les passages fente amont et les passages définitifs (figure 44)

Les passages définitifs sont relativement dépendants des entrées et des sorties observées dans le bassin considéré.

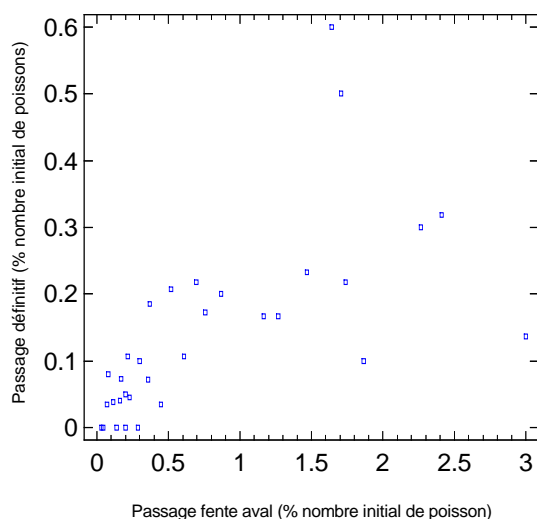


Figure 43 : Corrélations passage fente aval et passage définitif

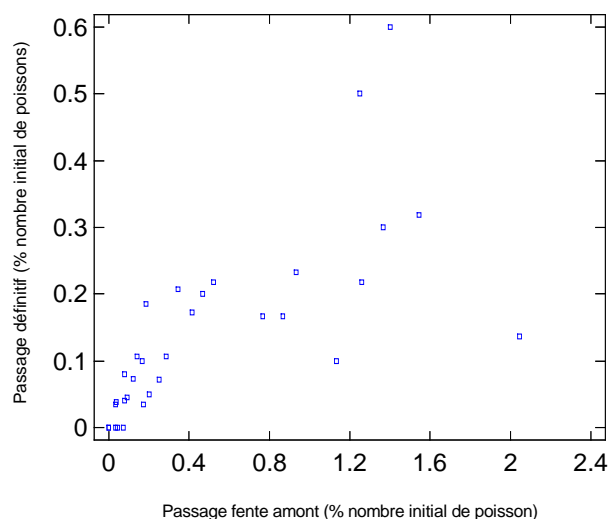


Figure 44 : Corrélations passage fente amont et passage définitif

IV 2) 2) Cartes Factorielles

Les tests se différencient fortement selon les deux configurations de largeur qui s'opposent sur l'axe F1 (figure 45). Les passages au niveau des fentes en montaison comme en dévalaison et le nombre de poissons franchissant totalement la passe sont significativement plus élevés avec une grande largeur de bassin. Ce facteur explique 32% de la variabilité du jeu de donnée. (test par permutation).

Au niveau des configurations de cylindres (figure 46), il se dégage un léger gradient entre la situation sans cylindre, avec un gros cylindre ou un petit cylindre et la configuration avec 3 cylindres alignés. Toutefois, sur le jeu global de données, le facteur « cylindre » ne joue pas un effet significatif sur la variabilité du jeu de données (test de permutation).

Lorsque l'on regroupe les 2 facteurs, on constate que la variabilité des réponses est beaucoup plus forte avec les grandes largeurs qu'avec les petites (figure 47). Quelque soit la situation en terme de cylindre, les passages sont toujours faibles avec les petites largeurs. Dans la configuration grande largeur, la situation avec les 3 cylindres alignés se distinguent par des franchissements moins importants.

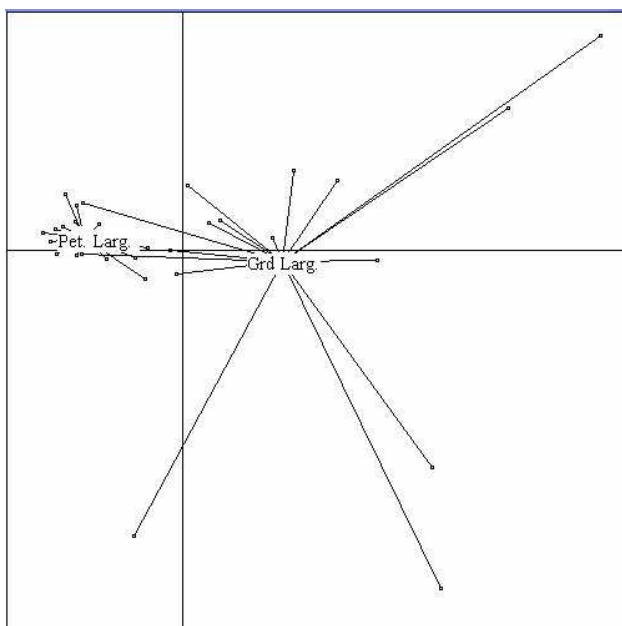


Figure 45 : Carte factorielle présentant les barycentres des configurations à grandes et petites largeurs

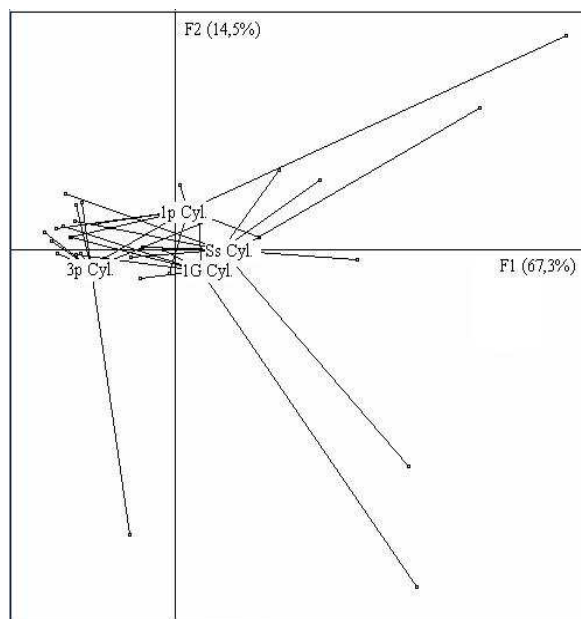


Figure 46 : Carte factorielle présentant les barycentres des configurations à cylindres

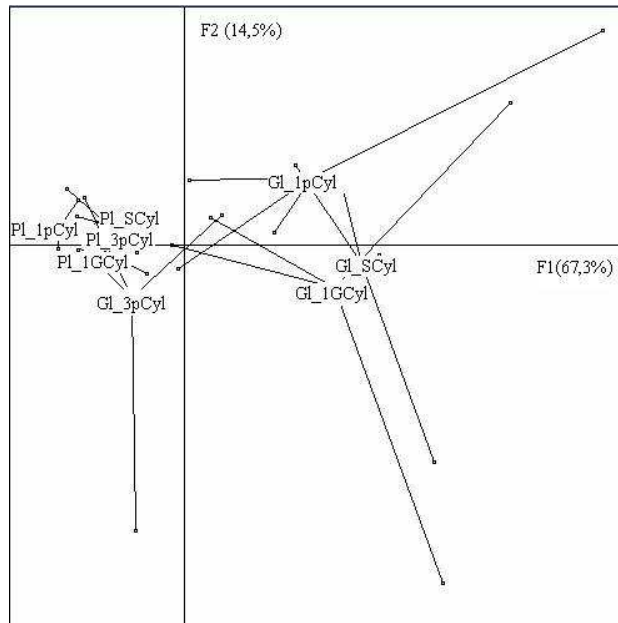


Figure 47 : Carte factorielle présentant les barycentres des neuf configurations étudiées

IV) 3) Analyse statistique des données

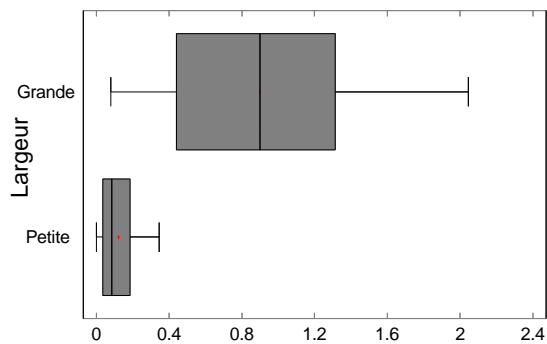
Les différences au niveau de chaque variable biologique caractérisant le comportement des poissons dans la passe entre les configurations testées ont été analysées, tant en terme de largeur (grande et petite) que de cylindres (absence, gros, petit, 3 petits alignés).

L'ensemble des 8 variables biologiques caractérisant les franchissements des poissons dans les bassins ne suivent pas une loi normale ($p > 0,05$ avec le test de Lilliefors). Des tests statistiques non paramétriques ont donc été utilisés, afin de caractériser les différences entre configurations (test de Kruskal-Wallis).

IV) 3) 1) Incidence de la largeur et des cylindres sur les mouvements des poissons

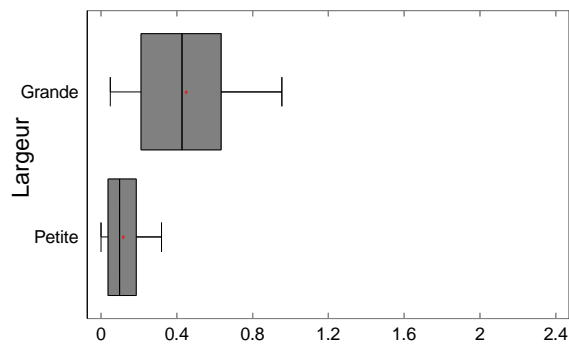
IV) 3) 1) 1) Incidence de la largeur

La largeur influence significativement le comportement des poissons dans la passe. Le nombre de passages de poissons dans la fente aval en montaison, le nombre de passages dans la fente amont en montaison et le nombre de passages définitifs en amont sont statistiquement plus élevés avec la grande largeur (test de Kruskal-Wallis, $p < 0,05$). Seuls le nombre de poissons restant dans les bassins et le rapport poissons dévalant/passage des poissons fente aval ne sont pas statistiquement différents entre les deux configurations de largeur. Les figures 48, 49 et 50 illustrent et confirment l'activité accrue présente dans les configurations de grande largeur.



Passages fente amont (% nombre initial de poisson

Figure 48 : Passage des poissons fente amont en fonction de la largeur de la passe



Passages fente aval (% nombre initial de poissons)

Figure 49 : Passage des poissons fente aval en fonction de la largeur de la passe

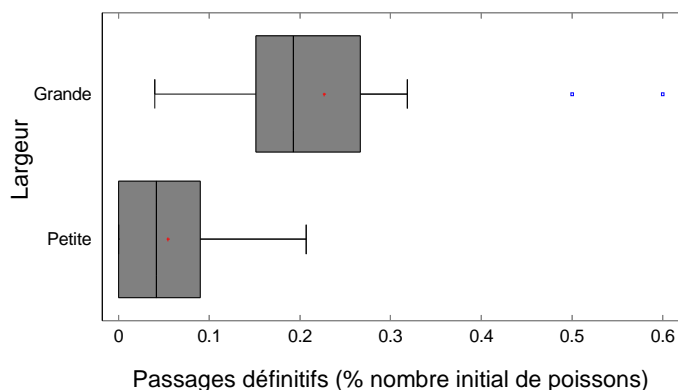


Figure 50 : Passage définitif des poissons en fonction de la largeur de la passe

IV) 3) 1) 2) Incidence des cylindres

La présence, la forme et le nombre de cylindres n'influencent pas significativement le comportement des poissons dans la passe (figures 51, 52, 53 et 54). En effet, le nombre de passages de poissons dans la fente aval en montaison, le nombre de passages dans la fente amont en montaison, le nombre de dévalaisons depuis le bassin d'observation et le bassin amont, le nombre de passages définitifs en amont ainsi que le nombre de poissons restant dans le bassin ne sont pas statistiquement différents entre les 4 configurations de cylindre (test de Kruskal-Wallis, $p > 0,05$).

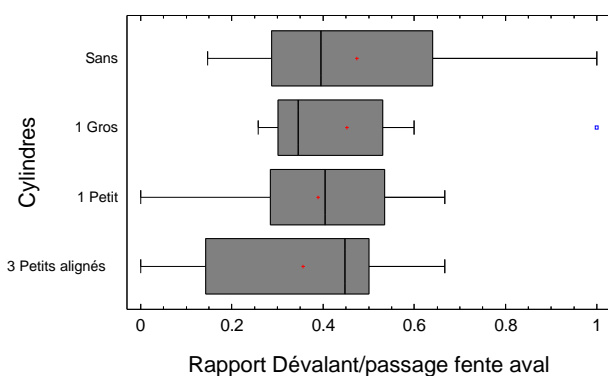


Figure 51 : Rapport dévalant/passage fente aval en fonction des cylindres

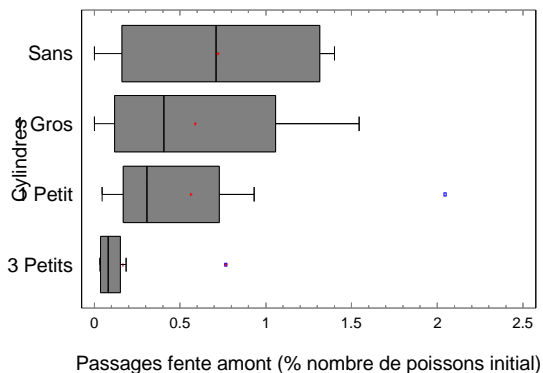


Figure 52 : Passage fente amont des poissons en fonction des cylindres

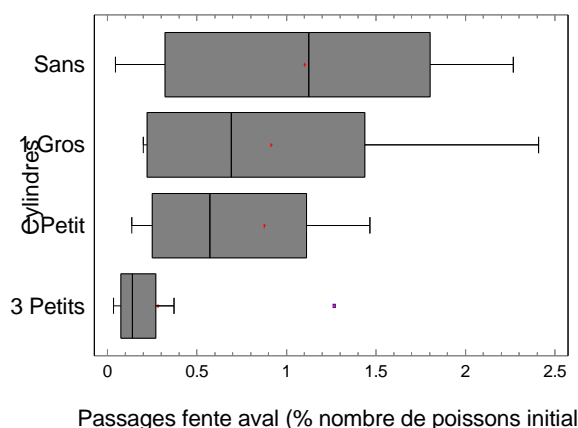


Figure 53 : Passage fente aval des poissons en fonction des configurations de cylindre

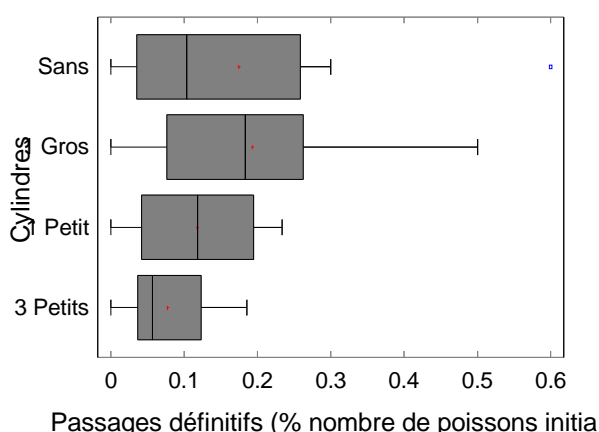


Figure 54 : Passages définitifs en fonction des configurations de cylindre

Au terme de ces analyses d'incidence de la largeur et des cylindres, il apparaît clairement que la largeur est le principal facteur influant sur le comportement des poissons, tandis que le facteur cylindre explique de manière relativement faible celui-ci. Les tests en largeur réduite témoignent de contraintes importantes, prédominantes face à l'absence ou à la présence de cylindres.

IV) 3) 1) 3) Analyse croisée largeur et cylindre

Des différences significatives sont notables pour les passages définitifs, les passages fentes aval et amont et les dévalaisons entre les 8 configurations testées. Il n'existe pas d'interactions entre les cylindres et les largeurs. Il est nécessaire d'analyser avec précision les différences entre chaque configuration, grâce à une analyse par paires.

L'analyse par paires a été réalisée sur 8 configurations. En effet, la configuration à trois cylindres non alignés n'a pas été répétée pour la largeur réduite, et ne peut donc être comparée avec les autres configurations.

L'annexe 8 montre des différences significatives concernant le nombre de passages fente aval entre d'une part les configurations à grande largeur et d'autre part les configurations à largeur réduite et la configuration à grande largeur avec trois petits cylindres alignés. Ces dernières permettent moins de passages fente aval, par rapport au nombre initial de poissons.

L'annexe 9 témoigne, pour le nombre de passages définitifs, de différences significatives entre les configurations à grande largeur sans cylindre et avec gros cylindre, et les autres configurations, exceptée la configuration à grande largeur et petit cylindre (ne présentant aucune différence significative avec quelque configuration que ce soit).

Le nombre de poissons effectuant des passages définitifs est en effet plus important pour le premier groupe mentionné que pour le second.

L'annexe 10 montre des différences significatives pour la variable nombre de passages fente amont, différences comparables à celles constatées dans le cas précédent : les configurations de grande largeur permettent à davantage de poissons d'accéder au bassin amont, en

comparaison avec et les configurations de largeur réduite associées à la configuration de grande largeur avec trois cylindres alignés.

IV) 3) 1) 4) Etude approfondie de l'incidence de cylindres sur les passages avec la grande largeur de bassin

Les contraintes présentes au sein des configurations de largeur réduite étant trop importantes pour déceler un effet notable des cylindres, seule la configuration de grande largeur est considérée ici, celle-ci permettant d'obtenir des conditions moins exigeantes, en terme de turbulence.

Des tests statistiques ont ainsi été menés sur les cinq configurations suivantes :

- sans cylindre
- 1 gros cylindre
- 1 petit cylindre
- 3 petits cylindres alignés
- 3 petits cylindres non alignés

Des différences significatives entre les 5 configurations de cylindres ont été relevées. L'analyse par paires a révélé que ces différences sont notables entre la configuration avec trois cylindres non alignés et les autres configurations.

Moins de passages sont observés pour celle-ci. L'analyse des passages définitifs, des rapports de poissons dévalant par rapport aux passages et des passages fente aval et fente amont confirme cette affirmation.

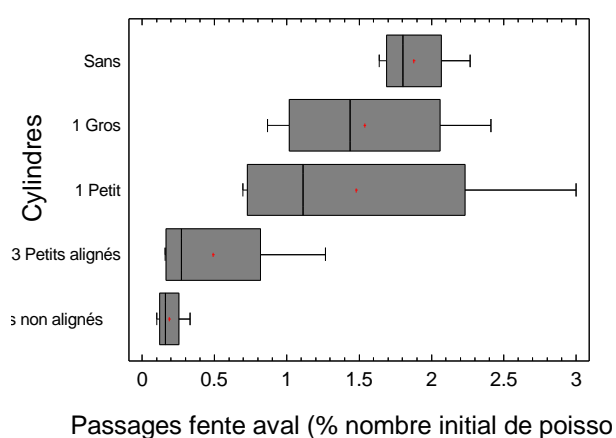


Figure 55 : Passage fente aval des poissons en fonction des cylindres

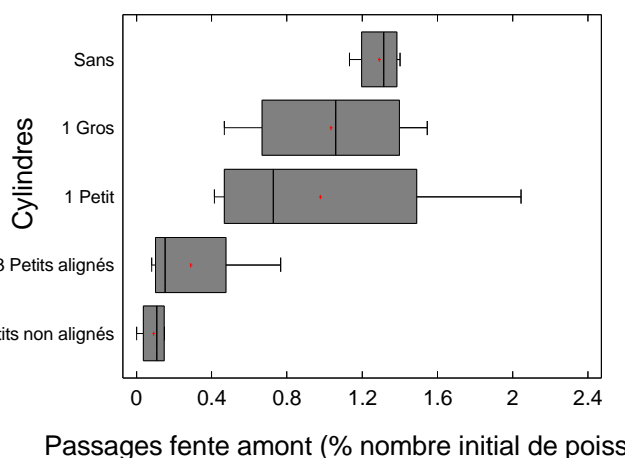


Figure 56 : Passage fente amont des poissons en fonction des cylindres

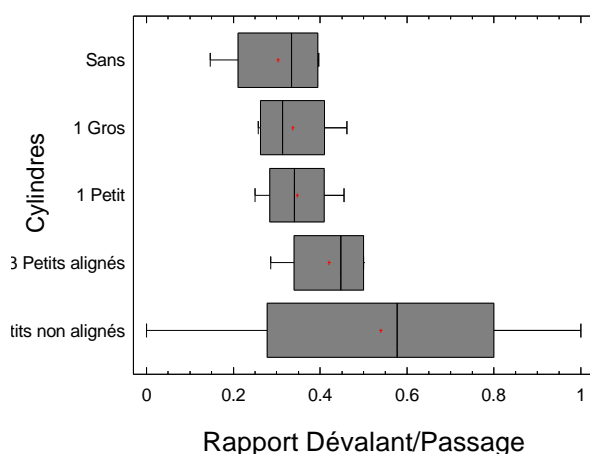


Figure 57 : Rapport poissons dévalant/Passage fente amont en fonction des cylindres

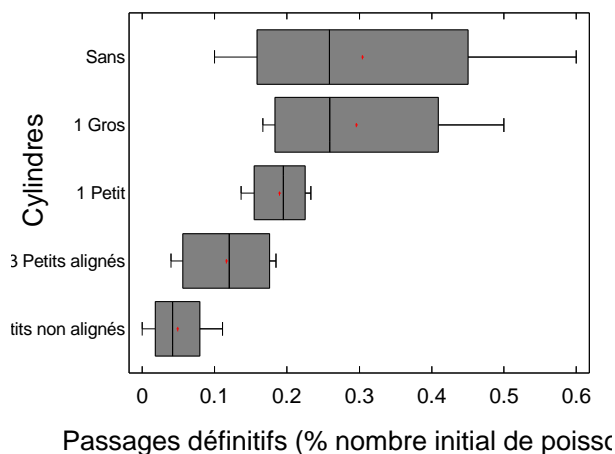


Figure 58 : Passage définitif des poissons en fonction des cylindres

IV) 3) 2) Considération sur les poissons dévalant

La quantité de poissons dévalant est fortement corrélée au nombre de passages observés. L'influence des configurations sur le rapport entre le nombre de dévalant et le nombre de passage à la fente aval a été testée.

Aucune différence statistiquement significative n'est observable entre toutes les configurations que cela soit en terme de largeur ou de cylindres (figure 59, 60 et 61).

Seul le rapport des dévalants sur le nombre de passage à la fente aval est-il légèrement plus élevé dans la configuration de faible largeur (test de Kruskal- Wallis, $p=0,076$).

Quelque soit la configuration testée (grande ou petite largeur, présence ou non de cylindres), une même fraction de poissons étant remontée dans la passe est par la suite expulsée. L'explication de ce phénomène est probablement liée au comportement des poissons, qu'il conviendrait d'étudier en détail, en considérant non seulement un bassin, mais la passe dans son intégralité.

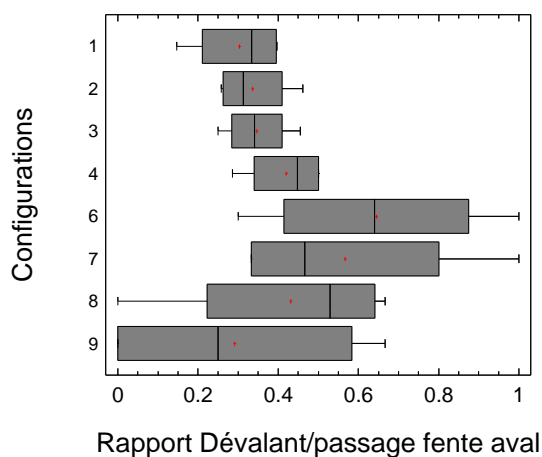


Figure 59 : Rapport poissons dévalant/ passage fente aval des poissons en fonction des configurations

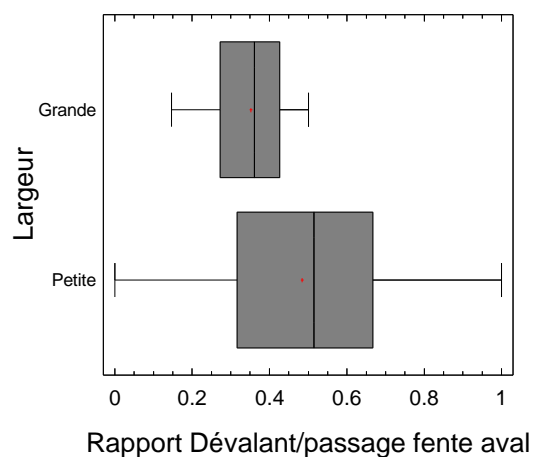


Figure 60 : Rapport poissons dévalant/ passe fente aval des poissons en fonction de la largeur de configuration

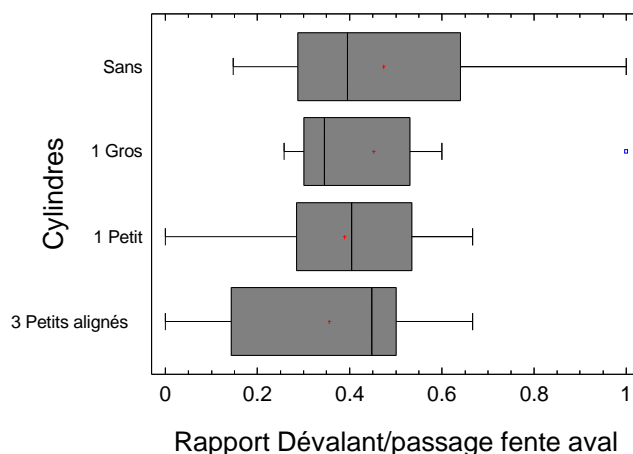


Figure 61 : Rapport poissons dévalant/ passage fente aval des poissons en fonction des cylindres

IV) 3) 3) Analyse sur les temps de passages

Les données correspondant aux temps de séjour dans le bassin ne suivent pas une loi normale. L'analyse non paramétrique de Kruskal-Wallis s'avère ici encore nécessaire.

Les tests suivants sont réalisés sur les données associées aux configurations de grande largeur, les configurations de largeur réduite fournissant des données en nombre insuffisant.

IV) 3) 3) 1) Analyse du temps de franchissement du bassin

Les caractéristiques des temps de séjour en fonction des différentes configurations sont fournies dans le tableau suivant.

Cylindres	Mediane	3 ^{ème} quartile
Sans	7	17
1 Gros	5	8,5
1 Petit	5	18
3 Petits non alignés	10	89
3 Petits non alignés	7,5	67

Tableau 7 : Caractéristiques du temps de franchissement du bassin en fonction des configurations

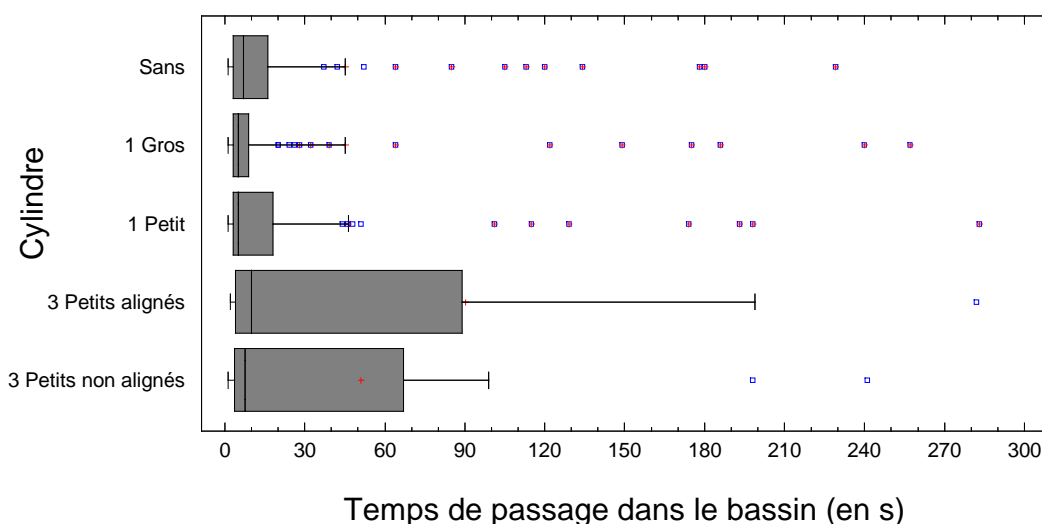


Figure 62 : Temps de passage dans le bassin en fonction des configurations

Le tableau 7 et la figure 62 démontrent une très grande variabilité des temps de séjour pour chaque configuration. En effet, les valeurs extrêmes sont nombreuses, et les moyennes insignifiantes.

Les temps de passage dans le bassin sont significativement différents en fonction des configurations de cylindre (test de Kruskal-Wallis, $p < 0,05$). L'analyse par paires permet d'affirmer que ces différences sont observables entre les configurations avec trois cylindres d'une part et toutes les autres d'autre part. Dans le cas des configurations à trois cylindres, les temps de séjour sont nettement plus importants que pour les configurations à un ou sans cylindre.

La configuration avec un gros cylindre semble la plus intéressante car elle permet d'obtenir des temps de passage réduits par rapport aux autres. Dans ce cas comme pour le cas des configurations sans cylindre et avec un petit cylindre, la majeure partie des poissons réussissant à franchir la fente amont n'utilise pas de zone de repos, mais franchissent rapidement le bassin. Les poissons avec des temps de séjour assez courts se situent dans la zone de repos B spécifiée sur la figure 15. Les poissons avec des temps de séjour plus longs, moins nombreux,

séjournent généralement dans la zone A (figure 15). Les poissons se retrouvent dans ce cas « dos » à la fente, car dans le sens du courant de la cellule de circulation présente à cet endroit. Ils doivent ainsi, pour franchir la fente amont, fournir à la fois un effort pour se retourner, mais également un effort pour passer au travers du jet. La présence du gros cylindre permet d'amenuiser l'effort nécessaire aux poissons pour franchir la fente amont puisque le jet est « cassé », et l'énergie turbulente réduite. Le petit cylindre diminue cette énergie de manière moins conséquente que le gros, et ne permet ainsi pas une réduction significative des temps de séjour.

Dans le cas de la configuration à trois cylindres alignés, les temps de séjour importants peuvent s'expliquer par le fait que des turbulences relativement fortes sont notables au sein de la passe. Ces turbulences poussent les poissons ayant franchi la fente aval à chercher des zones de repos, assez calmes par rapport au milieu environnant. Les poissons restent donc en général dans les zones de repos, et patientent longtemps, avant de saisir l'opportunité de franchir la fente amont.

Dans le cas de la configuration à trois cylindres non alignés, la turbulente au sein de la passe est moins importante. Les zones de repos sont cependant multipliées, et les poissons, lors de leurs déplacements, se déplacent d'une zone de repos à une autre. Ce déplacement s'effectue sans réelle difficulté, mais est probablement perturbé par les nombreuses zones de calmes, propice au repos des poissons.

IV) 3) 3) 2) Analyse du temps de séjour avant dévalaison

Le temps de séjour des poissons avant dévalaison est statistiquement différent selon les configurations de cylindre. Ce temps est beaucoup plus élevé dans la configuration des 3 petits cylindres non alignés (médiane : 320 secondes contre 9 à 57 secondes pour les autres configurations). La présence d'un seul gros cylindre influence aussi beaucoup le temps de séjour puisque 75% des poissons dévalent avant 9 secondes du bassin.

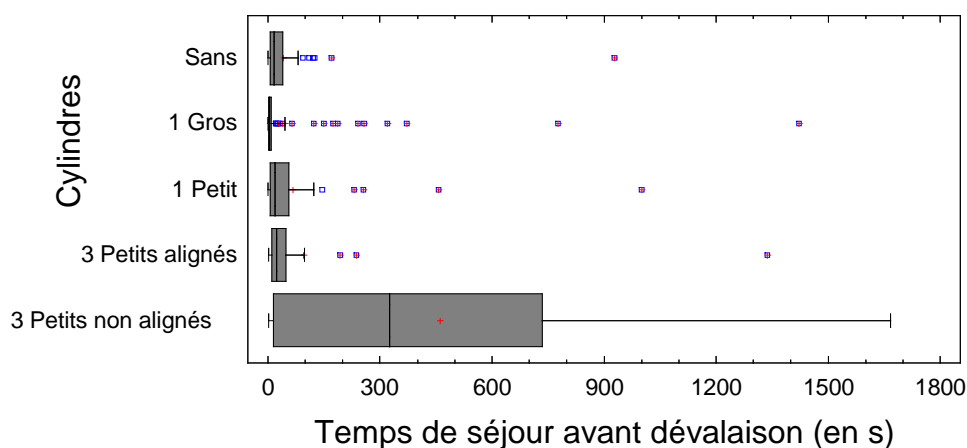


Figure 63 : Temps de séjour avant dévalaison en fonction des configurations de cylindre

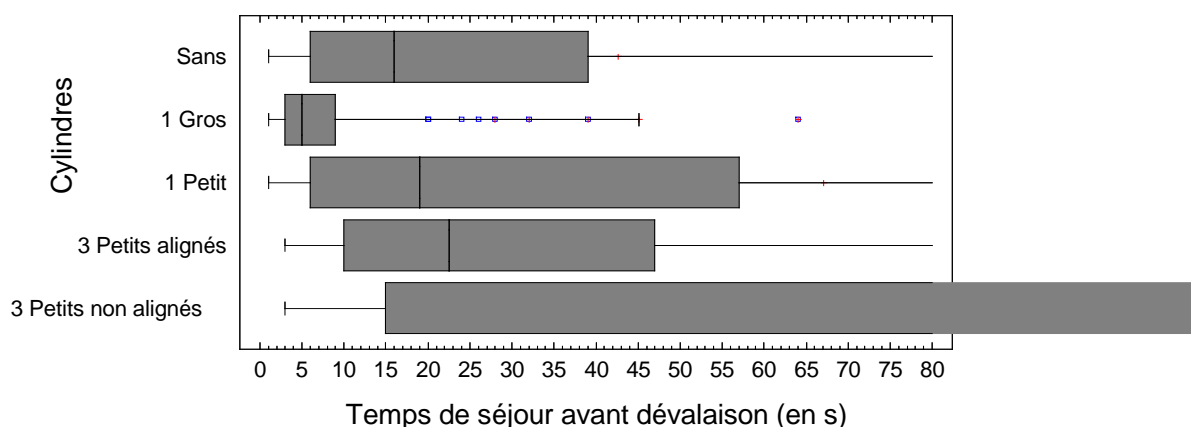


Figure 64 : Temps de séjour avant dévalaison en fonction des configurations de cylindre, ciblés sur les faibles valeurs

Une grande variabilité est encore observable ici. L'analyse par paires fait ressortir la configuration à trois cylindres non alignés, qui présente les temps de séjour les plus importants, et ceci pour la raison mentionnée précédemment (les poissons se « perdent » avant d'être éjectés). Le gros cylindre présente ici encore les temps de séjour les plus courts. Cela signifie donc que dans ce cas, soit les poissons parviennent à passer rapidement, soit ils sont éjectés rapidement.

Pour la configuration à trois cylindres alignés, les temps de séjour ne sont pas les plus importants, comme c'est le cas pour les temps de franchissement des bassins, mais au contraire font partie des plus courts. Cela signifie probablement que dans le cas de cette configuration, soit les poissons trouvent des zones de repos, où ils restent longtemps avant de finalement réussir à franchir la fente amont, soit ils ne parviennent pas à atteindre ces zones, et ils sont alors éjectés rapidement du bassin.

L'analyse réalisée sur le temps est une analyse globale. Il conviendrait de classer les temps de séjour, en fonction du comportement observé des poissons. En effet, les temps de séjour sont dans le cas présent classés par scénarii, mais certains d'entre eux correspondent à une attente des poissons dans la passe ou au contraire à un passage quasi-immédiat, phénomènes qu'il serait intéressant de dissocier.

V) Discussion

L'analyse descriptive réalisée permet de démontrer les corrélations fortes et notables existantes entre les différents facteurs, ceux-ci expliquant relativement bien la variabilité du jeu de données considéré.

L'analyse statistique réalisée par la suite, permet d'établir l'importance des variables telles que l'absence ou la présence de cylindres, ou bien encore l'utilisation d'une passe à largeur réduite ou grande. Les tests réalisés démontrent l'influence prédominante du facteur largeur.

En effet, le facteur cylindre, en prenant toutes les expériences en considération, joue un rôle mineur dans le comportement des poissons, face aux contraintes imposées par une largeur réduite. Cette réduction modifie l'hydraulique, à travers une augmentation de la puissance dissipée et une modification de la turbulence. Les capacités de franchissement des poissons s'en retrouvent alors limitées.

Cette constatation souligne le fait que ce ne sont pas seulement, comme on pourrait le penser, les conditions au niveau des fentes entre bassin qui déterminent le franchissement, mais bien également les conditions dans les bassins, dont les dimensions doivent être adaptées aux capacités de nage des poissons.

Le design d'une passe semble donc être un facteur d'une importance considérable, comme en témoignent les nombreuses études concernant les caractéristiques de la passe. Un travail réalisé en Espagne (Cea et al., 2007) considère ainsi la vitesse, la profondeur d'eau et les champs de turbulence, qu'il est nécessaire d'étudier afin de comprendre le comportement des poissons et d'optimiser l'efficacité d'une passe. Un modèle à deux dimensions associé à un modèle de turbulence (permettant de considérer les variations de courant et les champs de turbulence) a ainsi été développé, en association avec des simulations numériques.

Une autre étude (Cea et al., 2007) toujours en Espagne, confirme cette importance en tentant de mieux caractériser l'énergie turbulente, en améliorant la méthode de l'ADV (Acoustic Doppler Velocimeter).

La considération unique des configurations de grande largeur permet de discerner les effets liés aux cylindres. Celles-ci témoignent d'une modification de configuration des zones de

repos, pouvant constituer des zones de piège. Les nouvelles configurations à trois cylindres, et notamment celle avec trois cylindres non alignés apparaissent alors moins efficaces que les autres, en terme de passages de poissons. Ces configurations semblent en effet être soit trop complexes, soit trop turbulentes pour permettre aux poissons de franchir les fentes aval et amont.

L'étude des temps de séjour, d'une importante variabilité, fait ressortir la configuration à un gros cylindre. Celle-ci présente les temps de séjour, que cela soit pour la montaison ou la dévalaison, les plus courts.

Les séquences vidéos visionnées rendent compte d'un comportement singulier des poissons. Le franchissement des poissons ne s'effectue ainsi pas de manière linéaire et continue, mais par « étapes » successives. Ces étapes peuvent consister en différentes phase de nage active plus ou moins rapide, en des phases de nage stationnaire mais aussi en des phases de dévalaison. Ce dernier comportement, notable et singulier, est assez peu connu et peu décrit dans les passes, et mérite d'être étudié en détail, afin d'en déterminer les causes.

Conclusion générale

Les écosystèmes d'eaux courantes sont le cadre de relations physiques et biologiques, nécessaires à l'équilibre des différentes communautés biologiques, et sont induites par des déplacements d'éléments physiques ou d'organismes vivants. Les aménagements transversaux impactent la continuité écologique des cours d'eau d'une part en modifiant les conditions hydrauliques du flux liquide en amont et en aval de l'aménagement, entraînant un blocage du flux solide et un changement dans la dynamique des habitats, d'autre part en bloquant l'accès aux habitats favorables pour les espèces situées en aval comme pour celles situées en amont.

En référence aux processus physiques et biologiques mis en jeu dans la continuité écologique définie par la DCE et à l'interaction entre ces processus, seul l'effacement des ouvrages transversaux constitue une mesure de restauration complète de la continuité écologique. En effet, cet effacement constitue la seule garantie de suppression de l'ensemble des impacts. Il reste cependant possible d'atténuer les impacts par des mesures correctives qui peuvent porter par exemple sur la construction d'ouvrages de franchissement pour la montaison et la dévalaison de certaines espèces.

Les flux migratoires de poissons dans ces ouvrages peuvent être relativement importants comme le montrent les comptages des poissons. Sur la Dordogne et la Garonne, 25 espèces (6 migrateurs amphihalins et 19 espèces holobiotiques) soit 2 millions 810 individus ont été comptabilisés en 11 années de suivi (de 38 000 à 240 000 poissons par an) (Chanseau *et al.*, 2000). Dans un suivi effectué sur une passe à bassin en République Tchèque sur l'Elbe, Prchalova *et al.* (2006) comptabilisent 19 espèces de poissons et de 9 à 5043 poissons/jour (moyenne de 425 poissons/jour). Dans une passe naturelle, d'une branche artificielle du Danube, Schmutz *et al.* (1995) ont dénombré 35 000 poissons appartenant à 34 espèces sur 2 années de suivi d'avril à juillet.

Des améliorations sont cependant nécessaires concernant les petites espèces et les petits individus, comme en témoigne l'observation de migrations fortes de juvéniles de cyprinidés dans une passe en Tchécoslovaquie (2000 à 6000 juvéniles de gardons, ablettes, chevaines franchissant une passe en automne (Prchalova *et al.*, 2006)).

L'objectif de ce stage était de comparer des configurations de passe à poissons, à l'aide de tests avec poissons. Les problèmes rencontrés au cours des premières expériences, liés à la manipulation et au stockage d'un nombre important de poissons m'ont poussé à développer une méthodologie. Cette méthodologie, destinée aux études futures, fixe des mesures à respecter pour influencer le moins possible le comportement des poissons, et pour acquérir des données de manière efficace. La température, les nitrites ou bien encore le mode d'enregistrement sont des exemples de variables à prendre en compte lors de telles expérimentations.

Par la suite, le choix de l'espèce ainsi que la taille des individus à sélectionner constituèrent des nouvelles problématiques. La considération de documents, révélant d'une part des capacités de nage dépendantes de la forme du corps du poisson et d'autre part des relations entre les vitesses maximales et la taille des individus, a permis de surmonter ces difficultés.

La question du positionnement des cylindres fut ensuite soulevée. Des configurations préalablement réalisées, avec des configurations de cylindres ont été réitérées (Tarrade, 2007 ; Boisson, 2006). D'autres configurations ont également été effectuées, en choisissant l'emplacement des cylindres grâce à une méthode spécifique du domaine de la mécanique des fluides, la visualisation par traceurs solides. Plusieurs configurations ont ainsi été sélectionnées, montrant des écoulements intéressants.

Une fois les objectifs et les conditions d'expérimentations clairement établies, les tests en présence de poissons ont alors pu débuter. Les poissons ont été obtenus grâce à une pisciculture, ou par l'intermédiaire de pêches électriques réalisées par l'ONEMA et d'un concours de pêche.

Des répétitions pour chaque configuration eurent lieu, autorisant une analyse statistique portant sur le nombre de poissons réalisant chacun des scénarii possibles au sein de la passe, ou encore sur les temps de séjour, données préalablement recensées à partir des enregistrements effectués. Ces résultats montrent ainsi que la configuration la plus intéressante parmi toutes celles testées semble être la configuration avec un gros cylindre dans le jet, témoignant d'améliorations en terme de rapidité de franchissement. Les nouvelles configurations à trois cylindres s'avèrent, elles, décevantes, tant en matière de franchissement qu'en matière de temps de séjour dans la passe.

Les différentes phases de ce stage, explicitées précédemment, m'ont permis d'acquérir une autonomie certaine face à la réalisation et à la mise en œuvre d'un projet. En effet, j'ai assuré les étapes successives, que cela soit pour la réalisation de la méthodologie, en recherchant les conditions optimales pour les poissons ou encore pour la gestion du temps et de la population de poissons, à travers les rendez-vous et les trajets visant à l'obtention de poissons. Pour chaque problématique, une réflexion menant à une prise de décision permit la continuité de l'étude. L'aide principale apportée au cours de ce stage concerna la méthode de visualisation des écoulements.

Il fut très instructif de travailler dans un lieu regroupant des études ayant peu de relations entre elles, mais utilisant des mêmes techniques. Le temps passé au sein du laboratoire m'a ainsi permis de découvrir des thématiques et des études différentes (influence de la macro rugosité de surface en palier fluide,...). Les responsables de ces travaux, utilisant des techniques de visualisation m'ont considérablement aidé lors de l'étude l'écoulement dans la passe à poissons et instruit par l'explication de leurs études diverses et variées.

Les travaux réalisés lors de ce stage ne constituent nullement l'aboutissement de l'étude concernant la comparaison de différentes configurations. L'analyse des zones de repos ou du déplacement des poissons dans l'intégralité de la passe méritent d'être considérée.

Les trajectoires des poissons à l'intérieur du bassin constitue également une variable intéressante. Cette approche, initiée grâce à un étudiant de Master 1 de traitement de l'image de la Rochelle, pourrait permettre de mieux comprendre le comportement des poissons à l'intérieur des bassins, et ainsi de cibler les actions à entreprendre pour améliorer la montaison. L'étude réalisée au Royaume Uni peut, en exemple, être citée ici (Lines et al., 2000). Au cours de celle-ci, différentes étapes d'analyse d'image pour estimer la masse de poissons nageant ont été développées et testées pour une large gamme de conditions. Cela comprend des techniques automatiques pour identifier les poissons dans une image, déterminer les limites de la forme du poisson dans un espace en trois dimensions, ou pour déterminer la masse du poisson à partir du contour. Le véritable problème mentionné lors de ce travail fut la variabilité et la complexité de la nature des images collectées et donc la réalisation de modèles morphologiques fiables.

Cette étude impose donc, à l'image de ce stage, l'intervention de compétences diverses, afin d'assurer une continuité écologique imposée par la Directive Cadre sur l'Eau, et nécessaire aux organismes aquatiques.

Bibliographie

- Allan, J.D. 1995. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters, Chapman & Hall.
- Amoros C., Petts, G.E., 1993. Hydrosystèmes fluviaux. Masson, Paris.
- Andrewartha, H. G., and L. C. Birch. 1954. The Distribution and Abundance of Animals. University of Chicago Press, Chicago.
- Bagliniere J.L., 1991. La truite commune (*Salmo trutta* L.), son origine, son aire de répartition, ses intérêts économique et scientifique. in Baglinière J.L., Maisse G., La truite, biologie et écologie, 12-22, INRA Publ., Paris.
- Baran P., Parussatti S. 2002. Etude piscicole de la basse et moyenne vallée de l'Ognon. Rapport CSP DR n°9, 94p.
- Baran P., 2007. Etude piscicole du Serein. Diagnostic et propositions de gestion. Rapport d'étude ONEMA/Fédération AAPPMA Yonne, 90p et annexes.
- Baran P., Compagnat P., Perrin L., 2007. Diagnostic piscicole de la Vingeanne et de ses affluents. Rapport CSP DiR n°9, 108p et annexes.
- Baudry J., Merriam H.G., 1988. Connectivity and connectedness : functional versus structural patterns in landscapes. In Schreiber K.F.Ed. Connectivity in Landscape Ecology, vol **29**, 23-28.
- Bilton D.T., Freeland J.R., Okamura B. 2001. Dispersal in freshwater invertebrates. Annu Rev. Ecol. Syst., **32** : 159-181.
- Boisson A. 2006. Optimisation de l'hydrodynamique des écoulements turbulents dans une passe à poissons à fentes verticales afin d'améliorer l'efficacité de franchissement des petites espèces. Rapport Maîtrise « IUP Ingénierie des Milieux Aquatiques et des Corridors Fluviaux », Univ. Tours, France. 58 p.
- Castro-Santos T. 2004. Quantifying the combined effects of attempt rate and swimming capacity on passage through velocity barriers. Canadian journal of fisheries and aquatic sciences **61**(9) : 1602-1615.
- Cea L., Pena L., Puertas J., Vazquez-Cendon M.E., Pena E. 2007. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. Journal of hydraulic engineering **133**(2) : 160-172.
- Cea L., Puertas J., Pena L. 2007. Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV. Experiments in fluids **42**(3) : 333-348.

Copp, G. H. 1989. The habitat diversity and fish reproductive function of floodplain ecosystems. *Environ. Biol. Fishes* **26**: 1-27.

CSP, antenne de Caen 2000. La libre circulation des poissons migrateurs sur les rivières de Basse-Normandie. Un vaste programme de réhabilitation du patrimoine naturel et une obligation réglementaire pour des propriétaires d'ouvrages. Rapport d'activités, 9 plaquettes.

Cushing C.E, Gaines W.L. 1989. Thoughts on recolonization of endorheic cold desert spring-streams J. N. Am. Benthol. Soc.,**8**(3):277-285.

Fisher R. et Hogan J.D. 2007. Morphological predictors of swimming speed : a case study of pre-settlement juvenile coral reef fishes. *The Journal of Experimental Biology* **210** : 2436-2443.

Frid, C.L.J. and Townsend, CR. 1989. An appraisal of the patch dynamics concept in stream and marine benthic communities whose members ate highly mobile, *Oikos* **56**,137-141.

Harden Jones, F.R. 1968. Fish migration. Ed., Edward Arnold, London, 325p.

Heimerl S., Krueger F., Wurster H. 2008. Dimensioning of fish passage structures with perturbation boulders. *Hydrobiologia* **609** : 197-204.

Huet, M. 1959. Profiles and biology of western European streams as related to fish management. *Trans. Am. Fish. Soc.* **88**: 155-163.

Hynes HB, 1970. The ecology of running waters. University of Toronto Press, Toronto, Canada 555p.

Jungwirth M., 1998. River continuum and fish migration – going beyond the longitudinal River corridor in understanding ecological integrity. In Jungwirth M, Schmutz S., Weiss S. (eds), *Fish Migration and Fish Bypasses*. Blackwell Sciences Ltd. Fishing News Books, Oxford, London, Berlin: 19-32.

Junk W.J., Bayley P.B., Sparks R.E. 1989. The flood pulse concept in River-floodplain systems. In Dodge D.P. Ed. *Proceedings of the International Large River Symposium*. Canadian Special Publications Fisheries and Aquatic Sciences **106**, 110-127.

Keith P. et Allardi J. 2001. *Atlas des poissons d'eau douce de France*. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France, volume **47** de la collection Patrimoines Naturels. 387 p.

Laroche J., Durand J.D., 2004. Genetic structure of fragmented populations of a threatened endemic percid of the Rhone river: *Zingel asper*. *Heredity* **92**: 329-334.

Larinier M., Porcher J.P., Travade F., Gosset C. 1998. *Passes à poissons. Expertise, conception des ouvrages de franchissement*. Collection Mise au Point, Conseil Supérieur de la Pêche, Paris, France. 336 p.

Lines J.A., Tillett R.D., Ross L.G., Chan D., Hockaday S., McFarlane N.J.B. 2000. An automatic image-based system for estimating the mass of free-swimming fish. *Computers and Electronics in Agriculture* **31** : 151-168.

Meffe G.K., 1990. Genetic approaches to conservation of rare fishes : examples from North America desert species. *Journal of Fish Biology*, **39** (supplementary A), 105-112.

Meldgaard T., Nielsen E.E., Loeschcke, V., 2003. Fragmentation by weirs in a riverine system: a study of genetic variation in time and space among populations of European grayling (*Thymallus thymallus*) in a Danish river system. *Conservation Genetics* **4**: 735-747.

Northcote, T.G. 1978. Migratory strategies and production. *In* GERLEING S.D. (ed.) *Freshwater fishes in ecology of freshwater fish production*. John Wiley and sons, New York: 326-359.

Palmer M. A., D. Allan and C. A. Butman, 1996. Dispersal as a regional process affecting the local dynamics of marine and stream benthic invertebrates. **11**(8) : 322-326.

Palmer M. A. and N. L. Poff , 1997. The Influence of Environmental Heterogeneity on Patterns and Processes in Streams. *Journal of the North American Benthological Society*, **16**(1) : 169-173.

Peake S.J. 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.

Rodriguez T.T., Agudo J.P., Mosquera L.P., Gonzalez E.P. 2006. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. *Ecological Engineering* **27** : 37-48.

Schlosser I.J. 1987. A conceptual framework for fish communities in small warmwater streams. Pages 17-24 in W. J. Matthews and D. C. Heins, eds. *Ecology and Evolution of North American Stream Fishes*. University of Oklahoma Press, Norman.

Stanford J.A., Ward J.V. 1993. An ecosystem perspective of alluvial rivers: connectivity and the hyporheic corridor. *J.N. Am. Benthol Soc.*, **12**(1): 48-60.

Schlosser I.J., 1991. Stream fish ecology: a landscape perspective. *Bioscience*, **41**(10) : 704-712.

Tarrade L. 2007. Etude des écoulements turbulents dans les passes à poissons à fentes verticales. Adaptation aux petites espèces. Rapport de thèse « Mécaniques des Milieux Fluides », Univ. Poitiers, France. 231 p.

Tudorache C., Blust R., De Boeck G. 2007. Swimming capacity and energetics of migrating and non-migrating morphs of three-spined stickleback *Gasterosteus aculeatus* L. and their ecological implications. *Journal of Fish Biology* **71** : 1448-1456.

Tudorache C., Viaene P., Blust R., Vereecken H., De Boeck G. 2007. A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species. *Ecology of Freshwater Fish* **17**(2) : 284-291.

Twonsend C.J. 1989. The patch dynamics concept of stream community ecology. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, **8**(1) : 36-50.

Verneaux J. 1973. Cours d'eau de Franche-Comté (Massif du Jura). Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs. Thèse d'Etat Univ. Fr. Comté, Besançon, 257p.

Ward, J.V., Stanford J.A., 1989. The four dimensional nature of lotic ecosystems. Journal of the North American Benthological Society **8** : 2-8.

Webb P. 1984. Les formes et les nages des poissons. Pour la Science : 44-54.

Welcomme, R. L. 1985. River fisheries. FAO Technical Paper 262. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Welcomme RL, 1979. Fisheries ecology and floodplain rivers. Logman, London, 317pp.

Liste des figures et tableaux

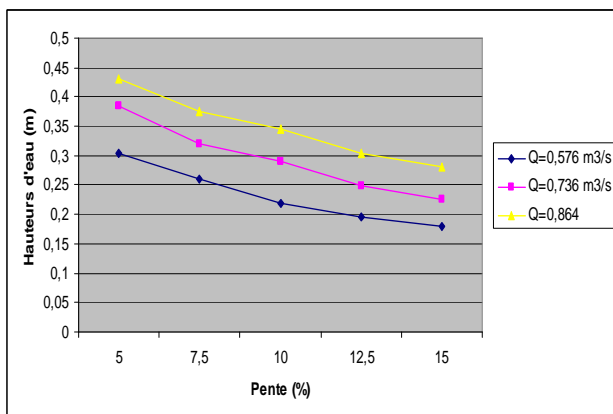
Liste des figures

Figure 1 : Passe à poissons à fentes verticales.....	15
Figure 2 : Schéma de passes à poissons à fentes verticales (Larinier <i>et al.</i> , 1998).....	15
Figure 3 : Vue d'ensemble de la passe à poissons du laboratoire.....	16
Figure 4 : Schéma de fonctionnement de la passe à poissons du laboratoire.....	16
Figure 5 : Exemple d'un dispositif expérimental similaire utilisé en Espagne.....	16
Figure 6 : Schéma d'un bassin d'une passe à poissons à fente verticale.....	17
Figure 7 : Valeurs caractéristiques des dimensions d'un bassin de passe à fente vertical (d'après Larinier <i>et al.</i> , 1998).....	18
Figure 8 : Schéma de la configuration de grande largeur sans cylindre.....	20
Figure 9 : Schéma de la configuration de grande largeur avec un cylindre.....	20
Figure 10 : Schéma de la configuration de petite largeur sans cylindre.....	20
Figure 11 : Schéma de la configuration de petite largeur avec un cylindre.....	20
Figure 12 : Dispositif utilisé lors de l'étude topologique par P.S.V.....	21
Figure 13 : Exemple d'image obtenue par P.S.V. pour le cas de la configuration à 3 cylindres alignés	21
Figure 14 : Exemple d'image obtenue par P.S.V. pour le cas de la configuration à 3 cylindres non alignés.....	21
Figure 15 : Illustration des zones de repos privilégiées des poissons.....	21
Figure 16 : Schéma de la configuration de grande largeur avec un petit cylindre.....	22
Figure 17 : Schéma de la configuration de petite largeur avec un petit cylindre.....	22
Figure 18 : Schéma de la configuration de grande largeur avec trois cylindres alignés.....	22
Figure 19 : Schéma de la configuration de petite largeur avec trois cylindres alignés.....	22
Figure 20 : Schéma de la configuration de grande largeur avec trois cylindres non alignés.....	22
Figure 21 : Photo d'une plaque opaque permettant l'obtention d'une lumière.....	23
Figure 22 : Photo du miroir situé sous le troisième bassin de la passe.....	24
Figure 23 : Conditions d'enregistrement.....	24
Figure 24 : Diagramme ternaire fonction-morphologie (WEBB, 1984).....	25
Figure 25 : Variables et ratios importants à considérer pour les capacités de nage des poissons (d'après Fisher et Hogan, 1984).....	26
Figure 26 : Vitesse de nage en fonction de la taille du poisson et de la température pour les salmonidés (Larinier <i>et al.</i> , 1998, d'après Beach, 1984).....	27
Figure 27 : Truite fario, <i>Salmo trutta fario</i>	28
Figure 28 : Goujon, <i>Gobio gobio</i>	29
Figure 29 : Gardon, <i>Rutilus rutilus</i>	29
Figure 30 : Système de refroidissement.....	31
Figure 31 : Température dans les viviers au cours des expériences.....	32
Figure 32 : Température dans la passe à poissons au cours des expériences.....	32
Figure 33 : Efficacité locale de franchissement pour la grande largeur.....	35
Figure 34 : Efficacité locale de franchissement pour la largeur réduite.....	35
Figure 35 : Indice d'attractivité pour la grande largeur.....	37
Figure 36 : Indice d'attractivité pour la largeur réduite.....	37
Figure 37 : Nombre de poissons en haut de la passe par rapport au nombre de poissons total pour la grande largeur.....	38
Figure 38 : Nombre de poissons en haut de la passe par rapport au nombre de poissons total pour la largeur réduite.....	38
Figure 39 : Cercle de corrélation des variables issu de l'Analyse en Composante Principale.....	39
Figure 40 : Corrélations passage fente amont et dévalaison fente amont et aval.....	40
Figure 41 : Corrélations passage fente aval et dévalaison fente aval.....	40
Figure 42 : Corrélations passage fente aval et passage fente amont.....	40
Figure 43 : Corrélations passage fente aval et passage définitif.....	41
Figure 44 : Corrélations passage fente amont et passage définitif.....	41
Figure 45 : Carte factorielle présentant les barycentres des configurations à grandes et petites largeurs.....	41

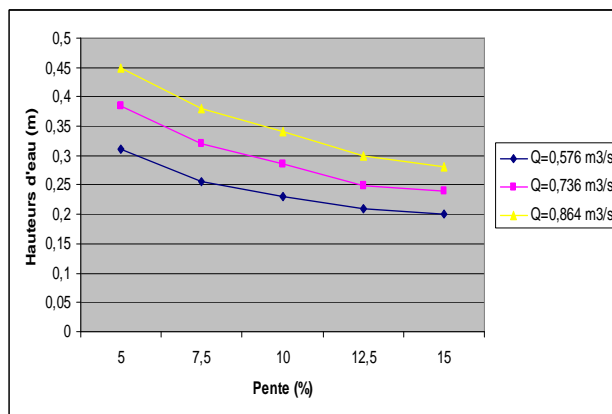
Figure 46 : Carte factorielle présentant les barycentres des configurations à cylindres.....	41
Figure 47 : Carte factorielle présentant les barycentres des neuf configurations étudiées.....	42
Figure 48 : Passage des poissons fente amont en fonction de la largeur de la passe.....	43
Figure 49 : Passage des poissons fente aval en fonction de la largeur de la passe.....	43
Figure 50 : Passage définitif des poissons en fonction de la largeur de la passe.....	43
Figure 51 : Rapport dévalant/passage fente aval en fonction des cylindres.....	43
Figure 52 : Passage fente amont des poissons en fonction des configurations de cylindre.....	43
Figure 53 : Passage fente aval des poissons en fonction des configurations de cylindre.....	44
Figure 54 : Passages définitifs en fonction des configurations de cylindre.....	44
Figure 55 : Passage fente aval des poissons en fonction des cylindres.....	45
Figure 56 : Passage fente amont des poissons en fonction des cylindres.....	45
Figure 57 : Rapport poissons dévalant/Passage fente amont en fonction des cylindres.....	45
Figure 58 : Passage définitif des poissons en fonction des cylindres.....	45
Figure 59 : Rapport poissons dévalant/ passage fente aval des poissons en fonction des configurations.....	46
Figure 60 : Rapport poissons dévalant/ passe fente aval des poissons en fonction de la largeur de configuration.....	46
Figure 61 : Rapport poissons dévalant/ passage fente aval des poissons en fonction des cylindres.....	46
Figure 62 : Temps de passage dans le bassin en fonction des configurations.....	47
Figure 63 : Temps de séjour avant dévalaison en fonction des configurations de cylindre.....	48
Figure 64 : Temps de séjour avant dévalaison en fonction des configurations de cylindre, ciblés sur les faibles valeurs.....	48

Liste des tableaux

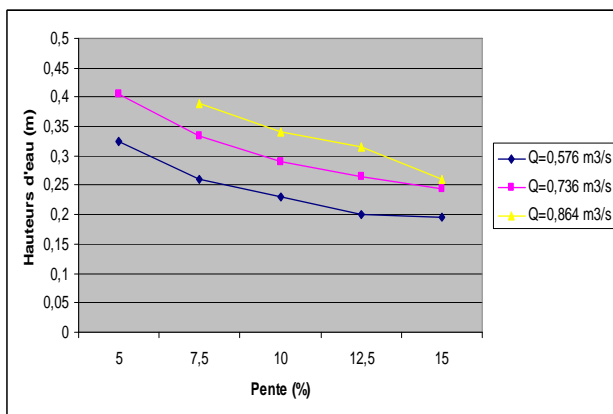
Tableau 1 : Grandeurs caractéristiques de la passe à poissons du laboratoire.....	17
Tableau 2 : Résumé des positions des cylindres pour chaque configuration.....	23
Tableau 3 : Caractéristiques du lot n°1 de poissons.....	30
Tableau 4 : Caractéristiques du lot n°2 de poissons.....	30
Tableau 5 : Caractéristiques du lot n°3 de poissons.....	30
Tableau 6 : Abréviations et définitions des différentes variables utilisées.....	38
Tableau 7 : Caractéristiques du temps de franchissement du bassin en fonction des configurations..	47



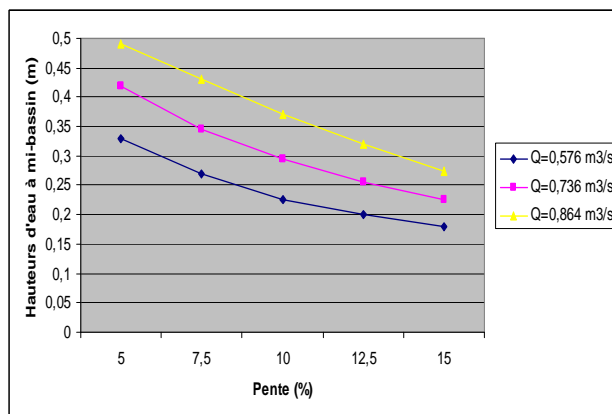
Annexe 1 : Hauteurs d'eau à mi-bassin en fonction de la pente et du débit pour la largeur de bassin 1,7m



Annexe 2 : Hauteurs d'eau à mi-bassin en fonction de la pente et du débit pour la largeur de bassin 2m

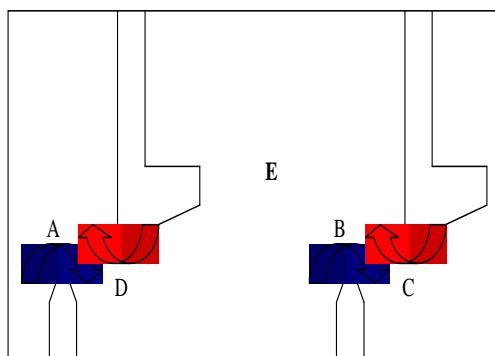


Annexe 3 : Hauteurs d'eau à mi-bassin en fonction de la pente et du débit pour la largeur de bassin



Annexe 4 : Hauteurs d'eau à mi-bassin en fonction de la pente et du débit pour la largeur de bassin

Annexe 5 : Fiche de recensement pour chaque expérience

[illegible]

Annexe 6 : Tableau utilisé pour l'Analyse en Composante Principale

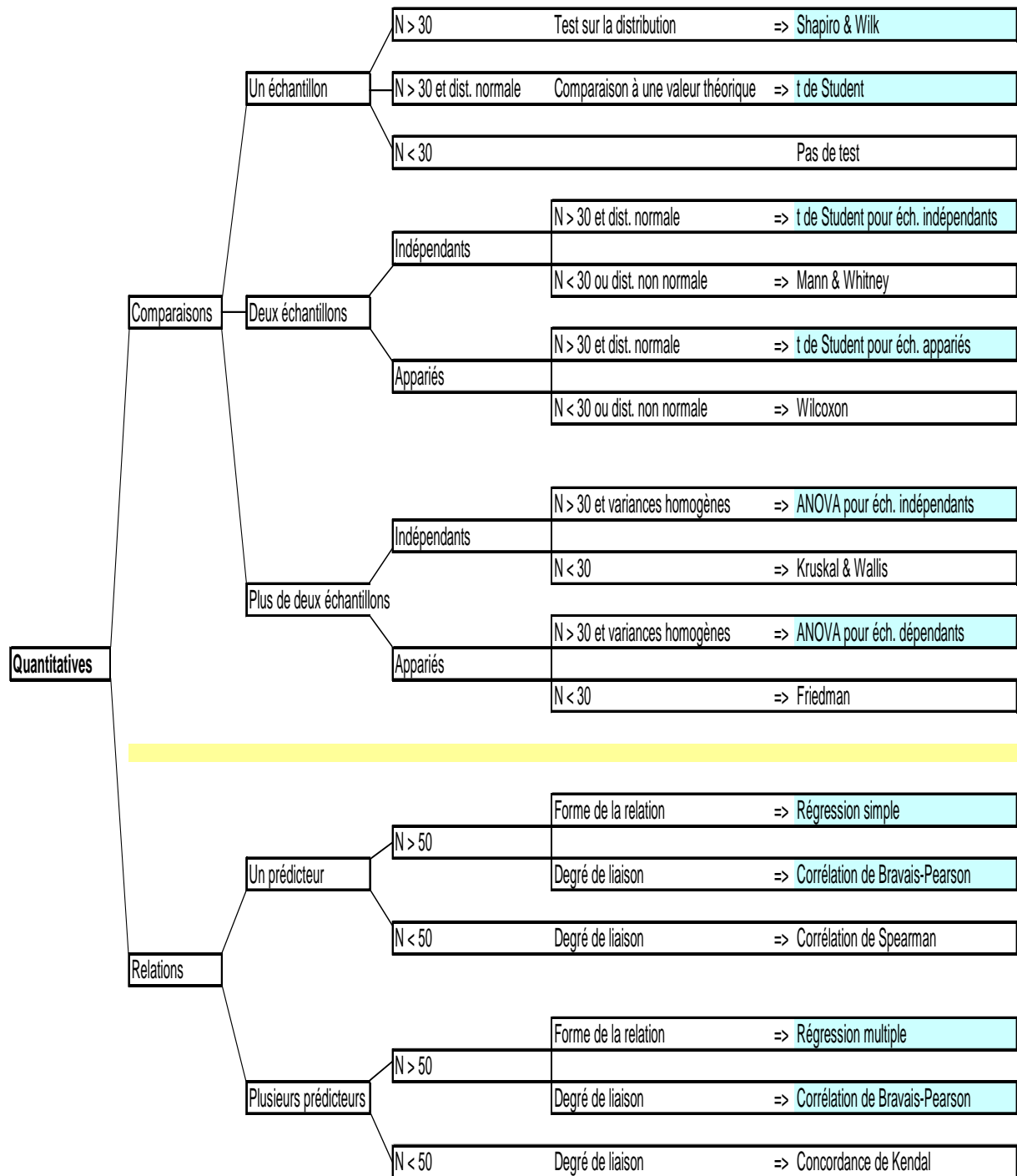
- 1 grande largeur sans cylindre
- 2 grande largeur gros cylindre
- 3 grande largeur petit cylindre
- 4 grande largeur 3 cylindres alignés
- 5 grande largeur 3 cylindres non alignés
- 6 largeur réduite sans cylindre
- 7 largeur réduite gros cylindre
- 8 largeur réduite petit cylindre
- 9 largeur réduite 3 cylindres alignés

config	lot	exp	ntotal	npassage	nfran (AB)	nretour (AD)	nreste (AE)	nretourbamnt (CD)	nfran2 (CB)	nreste (CE)
1	1	1	30	56	34	22	0	31	0	0
1	1	2	30	68	41	27	0	32	2	1
1	2	b1	25	41	35	6	2	20	1	0
1	2	b2	23	40	29	11	1	24	1	0
2	1	3	30	35	26	9	0	21	0	0
2	1	4	30	26	14	12	0	8	0	0
2	2	b3	22	53	34	19	3	27	2	0
2	2	b4	24	41	30	11	1	18	3	1
3	1	5	30	44	28	16	0	21	1	0
3	1	6	29	22	12	10	2	7	0	0
3	2	b5	22	66	45	21	3	42	3	0
3	2	b6	23	16	12	4	0	7	1	0
4	1	15	25	4	2	2	1	1	0	0
4	1	16	27	10	5	5	0	0	0	1
4	2	d3	30	38	23	15	0	18	0	0
4	2	d4	41	7	5	2	0	2	1	0
5	1	13	28	5	2	3	0	1	0	0
5	1	14	27	9	4	5	1	1	0	0
5	2	der1	30	3	0	3	0	0	0	0
5	2	der2	41	6	6	0	0	4	0	0
6	1	11	28	10	7	3	0	5	2	0
6	1	12	28	17	8	9	0	5	1	0
6	2	d9	28	8	2	6	0	2	0	0
6	2	d10	23	1	0	1	1	0	0	0
7	1	9	29	15	10	5	0	4	1	0
7	1	10	28	6	4	2	0	1	0	0
7	2	der11	20	4	0	4	0	0	0	0
7	2	der12	22	5	2	3	0	1	0	0
8	1	7	30	9	5	4	0	2	1	0
8	1	8	29	13	5	8	0	4	0	0
8	2	der7	20	4	4	0	0	3	0	0
8	2	der8	22	3	1	2	0	1	0	0
9	1	17	26	3	1	2	1	0	0	0
9	1	18	25	2	2	0	0	0	0	0
9	2	d5	30	1	1	0	0	1	0	0
9	2	d6	29	2	1	1	0	0	0	0

Annexe 7 : Arbre de choix des tests statistiques (Mme Boisneau, Université François Rabelais de Tours, Communication Personnelle)

ARBRE DE CHOIX DES TESTS STATISTIQUES

Légende : les tests colorés en bleu sont des tests paramétriques.



Annexe 8 : Comparaison par paire de la variable nombre de passage fente aval (% du nombre initial de poissons)

Comparaison	1	2	3	4	5	6	7	8
1		ns	ns	s	s	s	s	s
2	ns		ns	s	s	s	s	s
3	ns	ns		s	s	s	s	s
4	s	s	s		ns	ns	ns	ns
5	s	s	s	ns		ns	ns	ns
6	s	s	s	ns	ns		ns	ns
7	s	s	s	ns	ns	ns		ns
8	s	s	s	ns	ns	ns	ns	

Annexe 9 : Comparaison par paire de la variable nombre de passage définitif (% du nombre initial de poissons)

Comparaison	1	2	3	4	5	6	7	8
1		ns	ns	s	s	s	s	s
2	ns		ns	s	s	s	s	s
3	ns	ns		ns	ns	ns	ns	ns
4	s	s	ns		ns	ns	ns	ns
5	s	s	ns	ns		ns	ns	ns
6	s	s	ns	ns	ns		ns	ns
7	s	s	ns	ns	ns	ns		ns
8	s	s	ns	ns	ns	ns	ns	

Annexe 10 : Comparaison par paire de la variable nombre de passages fente amont (% du nombre initial de poissons)

Comparaison	1	2	3	4	5	6	7	8
1		ns	ns	s	s	s	s	s
2	ns		ns	s	s	s	s	s
3	ns	ns		s	s	s	s	s
4	s	s	s		ns	ns	ns	ns
5	s	s	s	ns		ns	ns	ns
6	s	s	s	ns	ns		ns	ns
7	s	s	s	ns	ns	ns		ns
8	s	s	s	ns	ns	ns	ns	

- 1 : Grande largeur sans cylindre
- 2 : Grande largeur gros cylindre
- 3 : Grande largeur petit cylindre
- 4 : Grande largeur trois cylindres alignés
- 5 : Largeur réduite sans cylindre
- 6 : Largeur réduite gros cylindre
- 7 : Largeur réduite petit cylindre
- 8 : Largeur réduite trois cylindres alignés

Table des matières détaillée

RESUME	2
ABSTRACT	2
INTRODUCTION	3
I) RESTAURATION ET REGLEMENTATION DE LA CONTINUITE ECOLOGIQUE	6
I) 1) Connectivité, continuité écologique et fonctionnement des écosystèmes	6
I) 1) 1) Composantes de la connectivité	6
I) 1) 1) 1) Composante structurelle	6
I) 1) 1) 2) Composante fonctionnelle	6
I) 1) 2) Les différents types de continuité	7
I) 1) 2) 1) Continuité des éléments physiques	7
I) 1) 2) 1) 1) Continuité hydrique	7
I) 1) 2) 1) 2) Continuité des matériaux solides	7
I) 1) 2) 2) Continuité écologique et organismes vivants	8
I) 1) 2) 2) 1) Déplacements des organismes vivants	8
I) 1) 2) 2) 1) 1) Déterminisme des déplacements	8
I) 1) 2) 2) 1) 2) Déplacement de la matière organique et continuum du fonctionnement trophique	9
I) 1) 2) 2) 1) 3) Déplacements du plancton	9
I) 1) 2) 2) 1) 4) Déplacements des invertébrés benthiques, des crustacés et des mollusques	9
I) 1) 2) 2) 1) 5) Déplacements des poissons d'eaux douces	9
I) 1) 2) 2) 1) 5) 1) Espèces amphihalines	10
I) 1) 2) 2) 1) 5) 2) Espèces holobiotiques	10
I) 2) Impacts des aménagements sur la continuité écologique des cours d'eau	10
I) 2) 1) Impacts sur le transport sédimentaire	11
I) 2) 2) Impacts sur les espèces	11
I) 2) 2) 1) Restriction des domaines vitaux des migrateurs amphihalins	11
I) 2) 2) 2) Perturbations de la migration	11
I) 2) 2) 3) Impacts sur la dynamique des populations	12
I) 2) 2) 4) Modifications directes des habitats	12
I) 2) 2) 5) Modifications liées aux perturbations du transport solide	12
I) 2) 2) 6) Impacts sur le fonctionnement trophique	12
I) 2) 2) 7) Impacts sur la qualité des eaux	12
I) 3) Notions de restauration de la continuité et d'atténuation des impacts	13

I) 4) Continuité écologique et réglementation.....	13
I) 4) 1) Directive cadre	13
I) 4) 2) Loi sur l'eau et les milieux aquatiques	13
I) 4) 3) Loi sur l'eau	14
II) CONTEXTE ET PRESENTATION DU MODELE PHYSIQUE	14
II) 1) Principe de fonctionnement des dispositifs de franchissement	14
II) 1) 1) Avantages et inconvénient d'une passe à poissons à fentes verticales.....	15
II) 2) Présentation du pilote.....	15
II) 2) 1) Caractéristiques des bassins.....	17
II) 2) 2) Pente de la passe	19
III) METHODOLOGIE.....	19
III) 1) Paramètres expérimentaux	19
III) 1) 1) Choix des configurations.....	19
III) 1) 1) 1) Configurations préalablement testées	19
III) 1) 1) 2) Nouvelles configurations	20
III) 1) 2) Méthode de suivi du franchissement	23
III) 1) 2) 1) Techniques de suivi et de comptages.....	23
III) 2) Matériels biologiques	24
III) 2) 1) Les nitrites	25
III) 2) 2) Les espèces considérées	25
III) 2) 3) Taille des individus	26
III) 2) 4) Description des espèces cibles	28
III) 2) 4) 1) La truite fario, <i>Salmo trutta fario</i>	28
III) 2) 4) 1) 1) Description.....	28
III) 2) 4) 2) Le goujon, <i>Gobio gobio</i>	29
III) 2) 4) 2) 1) Description et problèmes	29
III) 2) 4) 3) Le gardon, <i>Rutilus rutilus</i>	29
III) 2) 4) 3) 1) Description et problèmes	29
III) 4) Expériences.....	30
III) 4) 1) Hauteurs d'eau.....	30
III) 4) 2) Déroulement des expériences.....	30
III) 4) 2) 1) Nombre de poissons par expérience	30
III) 4) 2) 2) Débit et durée de l'expérience	31
III) 4) 2) 3) Ordre des configurations	31
III) 4) 2) 4) Température	31
III) 5) Présentation et analyse des résultats.....	32
III) 5) 1) Recensement des données	32
III) 5) 2) Analyse descriptive des données	33
III) 5) 2) 1) Efficacité locale de franchissement et indice d'attractivité	33
III) 5) 2) 2) Analyse en Composante Principale	33
III) 5) 3) Analyse statistique des données	34
III) 5) 3) 1) Normalité des données	34

III) 5) 3) 2) Analyse des données	35
IV) RESULTATS	35
IV) 1) Comportement des poissons	35
IV) 2) Analyse descriptive.....	35
IV) 2) 1) Efficacité locale de franchissement, attractivité et passages définitifs	35
IV) 2) 1) Analyse en Composante Principale (ACP) et corrélations	38
IV) 2) 2) Cartes Factorielles	41
IV) 3) Analyse statistique des données	42
IV) 3) 1) Incidence de la largeur et des cylindres sur les mouvements des poissons	42
IV) 3) 1) 1) Incidence de la largeur.....	42
IV) 3) 1) 2) Incidence des cylindres	43
IV) 3) 1) 3) Analyse croisée largeur et cylindre.....	44
IV) 3) 1) 4) Etude approfondie de l'incidence de cylindres sur les passages avec la grande largeur de bassin	45
IV) 3) 2) Considération sur les poissons dévalant.....	46
IV) 3) 3) Analyse sur les temps de passages	46
IV) 3) 3) 1) Analyse du temps de franchissement du bassin.....	47
IV) 3) 3) 2) Analyse du temps de séjour avant dévalaison	48
V) DISCUSSION.....	49
CONCLUSION GENERALE.....	50
Bibliographie	53
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	57

