

Passé à poissons : étude expérimentale d'un substrat de fond pour les poissons à faible capacité  
natatoire dans un modèle réduit

Mémoire présenté par  
**Antoine Bodarwé et Thibaut Cabo**

en vue de l'obtention du grade de master en  
**Ingénieur civil des constructions**

Promoteur(s)  
**Ir Didier Bousmar et Ir Xavier Rollin**

Lecteur(s)  
**Ir Alain Gillet, Ir Bernard de le Court, Ir Pierre Latteur**  
Année académique 2017-2018



---

# Remerciements

---

Pour commencer, nos premiers remerciements vont à nos deux promoteurs, Mr Didier Bousmar et Mr. Xavier Rollin, pour leur disponibilité et leur suivi tout au long du projet.

Ensuite, nous remercions les différentes personnes avec qui nous avons eu l'occasion de travailler : les techniciens du laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie à Châtelet, le service pêche de la Région Wallonne et les techniciens du Conservatoire du Saumon Mosan à Erezée.

Nous remercions également nos lecteurs, pour l'intérêt qu'ils ont pour le sujet, leur expérience et sur leurs conseils avisés.

Enfin, nous terminerons en remerciant tous ceux qui ont permis la réalisation de ce travail, en particulier nos parents pour leur relecture et leur soutien inflexible durant la réalisation du projet.



# Abstract

---

Dès que l'homme s'implante quelque part, il a tendance à vouloir contrôler et utiliser l'environnement dans lequel il évolue. Au IX<sup>ème</sup> siècle, les ouvrages hydrauliques sur la Meuse se multiplient et sectionnent le cours d'eau en plusieurs tronçons infranchissables pour les espèces vivant dans l'eau. Afin de restituer la continuité longitudinale des cours d'eau, des passes à poissons ont fait l'objet d'études et ont été installées. Lors d'une campagne de rénovation des passes existantes en Haute-Meuse, la reproduction d'une de celles-ci a été réalisée à l'échelle 1/5 dans le laboratoire de la Direction des Recherches hydrauliques du Service Public de Wallonie.

Une série de travaux ont été réalisés en commençant par une étude sur la modélisation numérique de l'écoulement dans ce modèle réduit. Ensuite, des expérimentations ont pris place dans ce modèle réduit pour des salmonidés ainsi que pour d'autres espèces mosanes telles que des chevaines, des ablettes et des chabots. Une analyse de leur mouvement dans la passe couplée à une étude statistique des remontées ont permis de caractériser leur comportement. Les résultats obtenus soulignent la capacité de franchissement pour les saumons et chevaines, l'envisagent pour les ablettes mais ne la confirment pas pour les chabots, espèce à faible capacité natatoire.

Dans ce travail, un substrat de fond est placé dans les bassins de la passe et une optimisation de ses caractéristiques géométriques va être réalisée en expérimentant la loche, une espèce benthique à faible capacité natatoire. Ensuite, une étude sur l'ensemble de la passe équipée des substrats optimisés est réalisée pour cette même espèce ainsi que pour le chabot et le hotu. Cette dernière espèce est considérée comme bonne nageuse et permettra de voir l'impact des substrats sur une espèce n'en ayant pas l'utilité. Pour pouvoir analyser le comportement des poissons durant les expérimentations, un système de caméras placé au-dessus des bassins permet de les filmer. Un traitement d'images permet de convertir ces images en graphe de densité de répartition et en champ de vitesse.

De manière générale, la présence de substrat améliore la franchissabilité des espèces à faible capacité natatoire. Deux fois plus de déplacements vers l'amont sont observés quand la passe est équipée du substrat optimisé. Les poissons rhéophiles, présents dans les passes actuelles, ne semblent pas être gênés par leur présence. Cela confirme les bonnes dispositions quant à l'extension du nombre d'espèces capables de franchir ces ouvrages par le biais d'un l'aménagement de leur surface de fond.



---

# Table des matières

---

|   |           |
|---|-----------|
| Remerciements.....  | ii        |
| Abstract .....  | iv        |
| Table des matières.....   | vi        |
| Table des figures.....  | xiv       |
| Liste des tableaux.....   | xx        |
| <b>1 Contextualisation.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Contexte global .....   | 1         |
| 1.1.1 Intérêt des migrations d'eau douce.....                           | 1         |
| 1.1.2 Types de migrations.....  | 2         |
| 1.1.3 Obstacles à la libre circulation de la faune piscicole.....       | 4         |
| 1.1.4 Restauration de la libre circulation.....                         | 5         |
| 1.1.5 Types de passes à poissons : .....                                | 5         |
| 1.2 Contexte particulier.....   | 8         |
| 1.2.1 Description du bassin de la Meuse.....                            | 9         |
| 1.2.2 Historique des passes en Meuse et programme de restauration ..... | 10        |
| 1.3 Objectifs et enjeux.....  | 15        |
| <b>2 Modèle.....</b>  | <b>17</b> |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.1      | Etat de l'art.....                          | 17        |
| 2.2      | Travaux réalisés sur le modèle réduit ..... | 20        |
| 2.3      | Principe de similitude.....                 | 21        |
| 2.4      | Description du modèle réduit.....           | 25        |
| 2.5      | Modélisation numérique de l'écoulement..... | 28        |
| 2.5.1    | Modélisation TELEMAC.....                   | 28        |
| 2.5.2    | Modélisation SolidWorks.....                | 30        |
| <b>3</b> | <b>Matériel .....</b>                       | <b>34</b> |
| 3.1      | Description du matériel vivant .....        | 35        |
| 3.1.1    | Loche.....                                  | 35        |
| 3.1.2    | Chabot .....                                | 39        |
| 3.1.3    | Hotu.....                                   | 42        |
| 3.1.4    | Civelle/Anguille.....                       | 45        |
| 3.1.5    | Classification.....                         | 48        |
| 3.1.6    | Description des lots .....                  | 48        |
| 3.1.6.1  | Loches.....                                 | 48        |
| 3.1.6.2  | Chabot.....                                 | 50        |
| 3.1.6.3  | Hotu .....                                  | 51        |
| 3.1.6.4  | Civelles .....                              | 52        |
| 3.1.7    | Bien-être animal.....                       | 52        |
| 3.1.7.1  | Formation.....                              | 52        |
| 3.1.7.2  | Capture.....                                | 52        |
| 3.1.7.3  | Transport.....                              | 52        |
| 3.1.7.4  | Adaptation.....                             | 53        |
| 3.1.7.5  | Stockage.....                               | 53        |
| 3.1.7.6  | Nourrissage .....                           | 54        |
| 3.1.7.7  | Réintroduction dans le milieu naturel ..... | 54        |
| 3.1.7.8  | Mortalité.....                              | 55        |
| 3.2      | Description du matériel d'analyse.....      | 55        |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.2.1    | Acquisition des images.....   | 55        |
| 3.2.2    | Traitement des images.....  | 56        |
| 3.2.3    | Mesure et analyse de l'environnement .....                            | 63        |
| 3.2.3.1  | Débitmètre.....   | 63        |
| 3.2.3.2  | Pompe.....  | 63        |
| 3.2.3.3  | Hydrocap .....  | 64        |
| 3.2.3.4  | Thermopuces & thermomètre.....  | 68        |
| 3.2.4    | Gestion de la luminosité.....   | 69        |
| 3.2.4.1  | Bâchage .....   | 69        |
| 3.2.4.2  | Matériel d'éclairage.....   | 70        |
| 3.2.4.3  | Automate pour lumière du jour.....                                    | 71        |
| 3.2.5    | Amélioration de la passe dans le temps .....                          | 71        |
| <b>4</b> | <b>Méthodes .....</b>   | <b>73</b> |
| 4.1      | Stratégie de la phase d'optimisation .....                            | 74        |
| 4.1.1    | Facteurs d'intérêt pour l'optimisation.....                           | 74        |
| 4.1.2    | Présentation des substrats.....                                       | 75        |
| 4.1.3    | Choix des substrats .....   | 76        |
| 4.1.4    | Méthodes de caractérisation du substrat.....                          | 78        |
| 4.2      | Protocole d'essai.....  | 80        |
| 4.2.1    | Matériel de manipulation.....   | 80        |
| 4.2.2    | Protocole de lancement d'expérimentation en phase d'optimisation..... | 81        |
| 4.2.3    | Protocole d'arrêt d'expérimentation en phase d'optimisation.....      | 82        |
| 4.3      | Limitations expérimentales.....                                       | 83        |
| <b>5</b> | <b>Optimisation .....</b>   | <b>88</b> |
| 5.1      | Substrat 0000 .....   | 91        |
| 5.1.1    | Comportement interbassins .....                                       | 91        |
| 5.1.1.1  | Descriptions des expériences et résultats.....                        | 91        |
| 5.1.1.2  | Influence de la durée.....  | 92        |
| 5.1.2    | Comportement intrabassin.....   | 93        |

---

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 5.2     | Substrat R42M.....                              | 95  |
| 5.2.1   | Comportement interbassins .....                 | 95  |
| 5.2.1.1 | Descriptions des expériences et résultats ..... | 96  |
| 5.2.1.2 | Influence de la durée .....                     | 97  |
| 5.2.2   | Comportement intrabassin.....                   | 98  |
| 5.3     | Substrat C42M.....                              | 99  |
| 5.3.1   | Comportement interbassins .....                 | 99  |
| 5.3.1.1 | Descriptions des expériences et résultats ..... | 99  |
| 5.3.1.2 | Influence de la durée .....                     | 100 |
| 5.3.2   | Comportement intrabassin.....                   | 101 |
| 5.4     | Substrat R44M.....                              | 102 |
| 5.4.1   | Comportement interbassins .....                 | 102 |
| 5.4.1.1 | Descriptions des expériences et résultats ..... | 102 |
| 5.4.1.2 | Influence de la durée .....                     | 103 |
| 5.4.2   | Comportement intrabassin.....                   | 104 |
| 5.5     | Substrat R42E.....                              | 106 |
| 5.5.1   | Comportement interbassins.....                  | 106 |
| 5.5.1.1 | Descriptions des expériences et résultats ..... | 106 |
| 5.5.1.2 | Influence de la durée .....                     | 107 |
| 5.5.2   | Comportement intrabassin.....                   | 108 |
| 5.6     | Substrat C84B.....                              | 109 |
| 5.6.1   | Comportement interbassins .....                 | 109 |
| 5.6.1.1 | Descriptions des expériences et résultats ..... | 110 |
| 5.6.1.2 | Influence de la durée .....                     | 111 |
| 5.6.2   | Comportement intrabassin.....                   | 111 |
| 5.7     | Substrat C82B.....                              | 113 |
| 5.7.1   | Comportement interbassins .....                 | 113 |
| 5.7.1.1 | Descriptions des expériences et résultats ..... | 113 |
| 5.7.1.2 | Influence de la durée .....                     | 114 |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.7.2    | Comportement intrabassin.....                         | 115        |
| 5.8      | Comparatif des résultats et discussion.....           | 117        |
| 5.8.1    | Taux de déplacement.....                              | 117        |
| 5.8.2    | Comparaisons des tests sur temps longs et courts..... | 121        |
| 5.8.2.1  | Taux de déplacement aval .....                        | 121        |
| 5.8.2.2  | Taux de déplacement nul.....                          | 122        |
| 5.8.2.3  | Taux de déplacement amont .....                       | 123        |
| 5.8.3    | Taux et temps de remontée .....                       | 124        |
| 5.8.3.1  | Taux de franchissement amont .....                    | 124        |
| 5.8.3.2  | Temps de remontée.....                                | 125        |
| 5.8.4    | Analyse intrabassin .....                             | 127        |
| 5.8.5    | Influence de la taille des loches.....                | 129        |
| 5.9      | Conclusion.....                                       | 130        |
| <b>6</b> | <b>Etude du substrat optimisé .....</b>               | <b>134</b> |
| 6.1      | Loches .....  | 136        |
| 6.1.1    | Substrat 0000 .....                                   | 137        |
| 6.1.1.1  | Influence de la durée.....                            | 138        |
| 6.1.2    | Substrat R42M.....                                    | 139        |
| 6.1.2.1  | Influence de la durée.....                            | 140        |
| 6.2      | Chabots.....  | 140        |
| 6.2.1    | Analyse sur bassins standards.....                    | 140        |
| 6.2.1.1  | Substrat 0000.....                                    | 140        |
| 6.2.1.2  | Substrat R42M .....                                   | 141        |
| 6.2.1.3  | Influence de la durée.....                            | 142        |
| 6.2.1.4  | Zones de présence et comportement .....               | 144        |
| 6.2.2    | Analyse sur la passe entière.....                     | 144        |
| 6.2.2.1  | Substrat 0000.....                                    | 146        |
| 6.2.2.2  | Substrat optimisé R42M .....                          | 147        |
| 6.2.2.3  | Temps de remontée.....                                | 148        |

---

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 6.3     | Hotu.....   | 149 |
| 6.3.1   | Description des expérimentations .....                                  | 149 |
| 6.3.1.1 | Expérience préliminaire lot 1:.....                                     | 150 |
| 6.3.1.2 | Expériences sur les lots 2, 3 et 4: .....                               | 150 |
| 6.3.2   | Influence de la présence d'un substrat .....                            | 151 |
| 6.3.3   | Zones de présence et vitesse.....                                       | 151 |
| 6.4     | Civelle .....   | 152 |
| 6.5     | Discussion interspécifique .....  | 155 |
| 6.5.1   | Comportement interbassins .....   | 155 |
| 6.5.1.1 | Loche .....   | 155 |
| 6.5.1.2 | Chabot :.....   | 155 |
| 6.5.1.3 | Hotu .....  | 159 |
| 6.5.1.4 | Civelle.....  | 159 |
| 6.5.2   | Comportement intrabassin.....   | 160 |
| 6.5.2.1 | Substrat R42M .....   | 160 |
| 6.5.2.2 | Substrat 0000.....  | 161 |
| 7       | Conclusion et perspectives.....   | 162 |
| 7.1     | Conclusion.....   | 162 |
| 7.2     | Perspectives.....   | 166 |
| 8       | Bibliographie.....  | 170 |
| 9       | Annexes .....   | 176 |
| A.      | Annexe lexicale .....   | 177 |
| A.1     | Lexique.....  | 177 |
| B.      | Annexe liée au modèle (chapitre 2).....                                 | 180 |
| B.1     | Paramètres fixés lors de la modélisation numérique sur SolidWorks ..... | 180 |
| B.2     | Plan de la passe.....   | 181 |
| C.      | Annexe liée au matériel.....  | 182 |
| C       | .....   | 182 |
| C.1     | Attestations formation bien-être animal .....                           | 182 |

---

|       |   |            |
|-------|---|------------|
| C.2   | Traçabilité des poissons et nourriture.....   | 184        |
| C.3   | Paramètres fixés pour le matériel.....  | 186        |
| C.4   | Automate de lumière.....  | 186        |
| C.5   | Résultats des mesures d'environnement.....  | 189        |
| D.    | <b>Annexe liée à la méthode expérimentale (chapitre 4)</b> .....                    | <b>191</b> |
| D.1   | Planning des expériences .....  | 191        |
| D.2   | Analyse de risque.....  | 193        |
| E.    | <b>Annexe liée aux résultats (chapitres 5 et 6)</b> .....                           | <b>194</b> |
| E.1   | Graphe de densité et vitesse : Optimisation.....                                    | 194        |
| E.1.1 | 0000.....   | 195        |
| E.1.2 | <b>R42M</b> .....   | 196        |
| E.1.3 | R44M.....   | 198        |
| E.1.4 | C84B.....   | 199        |
| E.1.5 | C82B.....   | 200        |
| E.1.6 | R42E.....   | 201        |
| E.1.7 | C42M.....   | 202        |
| E.2   | Graphe de densité et vitesse : Post-optimisation.....                               | 203        |
| E.2.1 | R42M.....   | 203        |
| F.    | <b>Annexe liée au code ImageJ</b> .....   | <b>204</b> |
| F.1   | Code <i>ImageJ</i> traitant les images.....   | 204        |
| G.    | <b>Annexe liée au code Excel</b> .....  | <b>209</b> |
| G.1   | Code <i>Excel</i> traitant les images.....  | 209        |
| H.    | <b>Annexe liée aux codes Matlab</b> .....   | <b>213</b> |
| H.1   | Codes <i>MATLAB</i> traitant les images.....  | 213        |
| H.1.1 | Elimination des erreurs de détection.....   | 213        |
| H.1.2 | Construction des graphes de densité de présence et de distribution de vitesse ..... | 220        |



---

## Table des figures

---

|  |    |
|--|----|
| Figure 1.1 : Zonation piscicole selon Huet.....  | 2  |
| Figure 1.2: Passe à ralentisseurs (Larinier, 1987).....  | 6  |
| Figure 1.3: Ascenseurs (Larinier, 1987).....   | 6  |
| Figure 1.4 : Passes à bassins successifs : passe à fentes, passe à échancrure et passe à déversoir<br>(Burgun, 2014) .....   | 7  |
| Figure 1.5 : Rivière de contournement (Smavas, 2018) .....   | 7  |
| Figure 1.6 : Passe spécifiques à anguilles. A gauche pour les anguilles, à droite pour les civelles.<br>(Burgun, 2014) .....   | 8  |
| Figure 1.7 : Schéma des barrages et passes à poissons modernes équipés sur la Meuse et ses<br>affluents.....   | 9  |
| Figure 1.8: Implantation des passes à poissons sur la Meuse aux Pays-Bas et en Belgique (Région<br>Wallonne, 2007).....  | 11 |
| Figure 1.9 : Caractéristiques des passes à poissons en Belgique (Région Wallonne, 2007) .....  | 13 |
| Figure 2.1: Placement optimal d'une passe à poissons en fonction de la forme du barrage<br>(Larinier, 1992).....   | 19 |
| Figure 2.2: Zones de présence des salmonidés dans un bassin standard (Pype, 2015).....   | 20 |
| Figure 2.3: Evolution des observations de poissons à la passe de Waulsort et de la température<br>(°C) de la Meuse du 1 Janvier 2012 au 1 juillet 2012 (SPW, DG03, Département de la Police et<br>des Contrôles - Direction des Contrôles) (2012)..... | 22 |
| Figure 2.4: Expression du débit passant dans une passe à échancrures (Larinier, 1992).....   | 27 |
| Figure 2.5: Dénomination des bassins et des seuils du modèle réduit .....  | 28 |
| Figure 2.6: Représentation du courant principal et de zones de recirculation (Bagnée et De<br>Greef, 2014).....  | 29 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 2.7: Modélisation numérique de l'écoulement à la surface libre dans un bassin standard du prototype de la passe à poissons du barrage de Rivière. Vitesses exprimées en m/s. (Bagnée et De Greef, 2014) .....  | 29 |
| Figure 2.8: Modélisation numérique de l'écoulement au fond d'un bassin standard du prototype de la passe à poissons du barrage de Rivière. Vitesses exprimées en m/s. (Bagnée et De Greef, 2014) .....  | 29 |
| Figure 2.9: Champs de vitesse obtenus lors de la modélisation numérique de l'écoulement dans un bassin standard du prototype de la passe à poissons du barrage de Rivière (Bagnée et De Greef, 2014) .....  | 30 |
| Figure 2.10: Maillage grossier utilisé par défaut pour la modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks (SolidWorks FlowSimulation) .....   | 31 |
| Figure 2.11: Maillage affiné pour les géométries plus complexes pour la modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks (SolidWorks FlowSimulation) .....   | 31 |
| Figure 2.12: Représentation de quelques lignes de courant vu du dessus de la modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks.....   | 32 |
| Figure 3.1: Loche franche (ref : Dunbar).....   | 35 |
| Figure 3.2: Chabot (ref : Plongée poisson) .....  | 39 |
| Figure 3.3: Hotu (ref : école de pêche) .....   | 42 |
| Figure 3.4: Civelles (ADERA-CERACA).....  | 45 |
| Figure 3.5: Représentation graphique de passe à anguilles (Larinier, 1992).....   | 47 |
| Figure 3.6: Mesure d'une loche à l'aide de la planche de la toise graduée .....   | 49 |
| Figure 3.7: Distribution de la taille des loches expérimentées dans le laboratoire.....   | 49 |
| Figure 3.8: Bac de stockage des chabots avant la présence de cachette.....  | 50 |
| Figure 3.9: Distribution de la taille des chabots expérimentés en laboratoire.....  | 51 |
| Figure 3.10: Sac d'eau utilisé pour le transport des poissons.....  | 53 |
| Figure 3.11: Présence de pierres pour créer des cachettes et imiter le milieu naturel des poissons de fond .....  | 53 |
| Figure 3.12: Emballage de la nourriture donnée aux poissons (Origine Tom&Co) .....  | 54 |
| Figure 3.13: Caméra Marlin M131 B utilisée pour filmer 3 bassins .....  | 55 |
| Figure 3.14: Disposition des caméras au dessus des 3 bassins.....   | 55 |
| Figure 3.15: Placement des caméras sur les 3 bassins standards.....   | 56 |
| Figure 3.16: Comparaison entre les images obtenues sans (à gauche) et avec plexiglass (à droite) .....  | 56 |
| Figure 3.17: Séquences du traitement d'image réalisé par ImageJ. Dans le sens de lecture : Image initiale, image témoin, soustraction de l'image témoin et définition de la région d'intérêt et application du seuil de couleur (Courtois et Van Audenhaege, 2017)..... | 58 |
| Figure 3.18: Ligne de matrice obtenue après la phase 1 du traitement d'image.....   | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 3.19: Représentation graphique des paramètres définissant le poisson (Courtois et Van Audenhaege, 2017).....              | 60 |
| Figure 3.20: Ligne de matrice obtenue après la phase 1 du traitement d'image et le traitement Excel .....                        | 61 |
| Figure 3.21: Débitmètre ABB permettant de quantifier le débit .....  | 63 |
| Figure 3.22: Pompe, raccordement de la pompe aux bassins de la passe à poissons et ouverture de la vanne du canal d'attrait..... | 64 |
| Figure 3.23: Capture Hydrocap avec fichier calibré.....  | 65 |
| Figure 3.24: Droite de calibration pour obtenir la relation hauteur d'eau - tension.....   | 66 |
| Figure 3.25: Calibration permettant d'avoir l'équation liant le débit et la tension .....  | 67 |
| Figure 3.26: Thermopuce permettant de mesurer la température toute les heures de manière automatique.....                        | 68 |
| Figure 3.27: Bâchage du modèle vu de l'intérieur et de l'extérieur.....  | 69 |
| Figure 3.28: Rendu sans bâchage.....   | 69 |
| Figure 3.29: Rendu avec bâchage .....  | 69 |
| Figure 3.30: Placement des Spots LED sur le modèle réduit .....  | 70 |
| Figure 3.31: Modèle réduit éclairé par les Spot LED.....   | 70 |
| Figure 4.1: Code donné aux substrats pour nomination .....   | 75 |
| Figure 4.2: R42M.....  | 77 |
| Figure 4.3: R44M.....  | 77 |
| Figure 4.4: C84B.....  | 77 |
| Figure 4.5: C82B .....   | 77 |
| Figure 4.6: R42E.....  | 78 |
| Figure 4.7: C42M.....  | 78 |
| Figure 4.8: Plan de la passe .....   | 81 |
| Figure 4.9: Différence de hauteur d'eau dans le bassin.....  | 85 |
| Figure 4.10: Pose de la plaque de plexiglass.....  | 85 |
| Figure 4.11: Présentation des endroits de la passe où des imperfections sont présentes.....                                      | 86 |
| Figure 5.1: Présentation du bassin initial et placement du filtre.....   | 89 |
| Figure 5.2: Densité de répartition en 0000 .....   | 93 |
| Figure 5.3: Répartition des vitesses en 0000.....  | 93 |
| Figure 5.4: Champs de vitesse obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks à 1cm du fond pour 0000 .....    | 94 |
| Figure 5.5: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en 0000.....  | 94 |
| Figure 5.6: Répartition des plots pour le substrat R42M .....  | 95 |
| Figure 5.7: Plaque de fond d'un bassin où les substrats sont collés.....   | 95 |
| Figure 5.8: Taux de répartition 0000 et R42M (%).....  | 96 |

Figure 5.9: Densité de répartition en R42M..... 98

Figure 5.10: Répartition des vitesses en R42M..... 98

Figure 5.11: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour R42M..... 98

Figure 5.12: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en R42M ..... 98

Figure 5.13: Répartition des plots pour le substrat C42M..... 99

Figure 5.14: Substrat C42M dans la passe ..... 99

Figure 5.15: Taux de répartition 0000, R42M et C42M (%).....100

Figure 5.16 : Densité de répartition en C42M.....101

Figure 5.17: Répartition des vitesses en C42M.....101

Figure 5.18: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour C42M.....101

Figure 5.19 : Représentation simplifiée des zones de présence des loches en R42M .....101

Figure 5.20: Répartition des plots pour le substrat R44M.....102

Figure 5.21: Substrat R44M dans la passe .....102

Figure 5.22: Taux de répartition 0000, R42M et R44M (%).....103

Figure 5.23: Densité de répartition en R44M .....104

Figure 5.24: Répartition des vitesses en R44M.....104

Figure 5.25: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour R44M.....105

Figure 5.26: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en R44M .....105

Figure 5.27: Répartition des plots pour le substrat R42E .....106

Figure 5.28: Substrat R42E dans la passe .....106

Figure 5.29: Taux de répartition en 0000, R42M et R42E [%].....107

Figure 5.30 : Densité de répartition en R42E.....108

Figure 5.31: Répartition des vitesses en R42E .....108

Figure 5.32: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour R42E.....108

Figure 5.33: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en R42E .....108

Figure 5.34: Répartition des plots pour le substrat C84B .....109

Figure 5.35: Substrat C84B dans la passe .....109

Figure 5.36 : Taux de déplacement en 0000, R42M et C84B.....110

Figure 5.37 Densité de répartition en R42E.....111

Figure 5.38: Répartition des vitesses en C84B .....111

Figure 5.39: Présence de loches au dessus de la marche .....112

Figure 5.40: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour C84B.....112

|   |     |
|---|-----|
| Figure 5.41: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en C84B .....   | 112 |
| Figure 5.42: Répartition des plots pour le substrat C84B .....  | 113 |
| Figure 5.43: Substrat C82B dans la passe .....  | 113 |
| Figure 5.44: Taux de déplacement en 0000, R42M, C84B et C82B .....  | 114 |
| Figure 5.45: Densité de répartition en R42E .....   | 115 |
| Figure 5.46: Répartition des vitesses en C84B .....   | 115 |
| Figure 5.47: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de<br>l'écoulement sur SolidWorks pour C82B .....   | 116 |
| Figure 5.48: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en C84B .....   | 116 |
| Figure 5.49: Résumé des taux de déplacements et variabilité de chaque substrat .....  | 118 |
| Figure 5.50: Comparaison des déplacements aval sur temps long et court .....  | 121 |
| Figure 5.51: Comparaison des déplacements nuls sur temps long et court .....  | 122 |
| Figure 5.52: Comparaison des déplacements amont sur temps long et court .....   | 123 |
| Figure 5.53: Taux de franchissement amont par poisson pour chaque substrat .....  | 124 |
| Figure 5.54: Evolution des franchissements amont et aval adimensionnalisés. L'histogramme<br>correspond au nombre de poissons ayant effectués un franchissement en 30 minutes ..... | 125 |
| Figure 5.55: Zones de repos simplifiées combinées .....   | 128 |
| Figure 5.56: Simulation numérique de l'écoulement avec le flux principale correspondant aux<br>zones de non-repos .....   | 128 |
| Figure 5.57: Taille moyenne des loches en fonction du bassin d'arrivée .....  | 129 |
| Figure 6.1: Répartition des loches ayant réalisé un déplacement amont - 0000 .....  | 137 |
| Figure 6.2 : Franch. Amont nets cumulés du substrat 0000 .....  | 138 |
| Figure 6.3 : Répartition des loches ayant réalisé un déplacement amont 0000 et R42M .....   | 139 |
| Figure 6.4: Franchissements amont nets cumulés pour le substrat optimisé (R42M) .....   | 140 |
| Figure 6.5: Présence de chabot dans une zone de repos .....   | 141 |
| Figure 6.6 : Répartition des chabots pour les expériences en bassins standards – R42M .....   | 142 |
| Figure 6.7: Déplacements aval cumulés pour les chabots sur les bassins standards – R42M .....   | 143 |
| Figure 6.8: Densité de répartition en R42M - chabot .....   | 144 |
| Figure 6.9: Répartition des vitesses en R42M - chabot .....   | 144 |
| Figure 6.10: Chabots profitant des substrats pour se maintenir dans le bassin .....   | 144 |
| Figure 6.11 : Répartition des chabots passe entière - 0000 .....  | 146 |
| Figure 6.12: Chabot dans le bassin P4 - 0000 .....  | 146 |
| Figure 6.13 : Comparaison du taux de répartition des chabots sur la passe entière – 0000 et<br>R42M .....   | 147 |
| Figure 6.14 : Franchissement amont net cumulés en fonction du temps pour les chabots sur la<br>passe entière – 0000, R42M .....   | 148 |
| Figure 6.15: Hotus avec et sans substrats .....   | 151 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Figure 6.16 : Zones de présence Hotu - R42M.....   | 151 |
| Figure 6.17: Zones de présence Hotu- 0000 .....  | 151 |
| Figure 6.18: Répartition des vitesses pour le hotu.....  | 152 |
| Figure 6.19: Civelles dans les bassins.....  | 153 |
| Figure 6.20: Répartition des tailles de chabots dans la passe .....  | 156 |
| Figure 6.21: Densité de répartition des loches en R42M.....  | 160 |
| Figure 6.22: Densité de répartition des chabots en R42M .....  | 160 |
| Figure 6.23: Densité de répartition des hotus en R42M .....  | 160 |
| Figure 6.24: Densité de répartition des loches en 0000.....  | 161 |
| Figure 6.25: Densité de répartition des hotus en 0000.....   | 161 |
| Figure 9.1: Plan du modèle réduit de la passe de Rivière présent au laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques (Zorzan, 2016) ..... | 181 |
| Figure 9.2: Données liées à la lumière du jour du 05/04/2015.....  | 187 |
| Figure 9.3: Loi d'éclairage progressif de la passe.....  | 188 |
| Figure 9.4: Débit moyen mesurée avec hydraucap située entre les deux bornes admissibles .....  | 189 |
| Figure 9.5: Hauteur moyenne du bassin amont et aval .....  | 189 |
| Figure 9.6 Enregistrement des températures avec la thermopuce.....   | 190 |
| Figure 9.7: Caillebotis antidérapant.....  | 193 |

---

## Liste des tableaux

---

|  |    |
|--|----|
| Tableau 2.1: Récapitulatif des lois d'échelle.....   | 25 |
| Tableau 2.2: Critères de dimensionnement de la passe à poissons de Rivières déterminés par la Direction des Etudes Technique (Zorzan, 2016)..... | 26 |
| Tableau 2.3 : Critères de dimensionnement suggérés par Baudouin et al (2015).....  | 26 |
| Tableau 2.4: Dimensions des éléments constituant la passe à poissons de Rivières (Zorzan, 2016).....   | 27 |
| Tableau 3.1: Caractéristiques principales de la loche franche.....   | 35 |
| Tableau 3.2 : Résumé des vitesses caractéristiques des loches franches selon Tudorache.....  | 37 |
| Tableau 3.3: Adaptation des vitesses caractéristiques à des loches de 6cm de long.....   | 37 |
| Tableau 3.4: Caractéristiques principales du chabot.....   | 39 |
| Tableau 3.5: Résumé des vitesses caractéristiques des chabots selon Tudorache.....   | 41 |
| Tableau 3.6: Caractéristiques principales du hotu.....   | 42 |
| Tableau 3.7: Inventaire des hotus observés dans la passe à poissons de Tailfer (Ovidio, 2007).....   | 44 |
| Tableau 3.8: Caractéristiques principales de l'anguille.....   | 45 |
| Tableau 3.9: Classification ICE des espèces.....   | 48 |
| Tableau 3.10: Répartition de la taille des loches et proportion de chaque taille.....  | 50 |
| Tableau 3.11: Etapes à suivre pour la phase 1 du traitement d'image avec ImageJ.....   | 57 |
| Tableau 3.12: Tableau résumé des entrées et sorties Hydrocap.....  | 65 |
| Tableau 3.13: Conversion des données mesurées pour connaître le débit dans la passe.....   | 67 |
| Tableau 3.14: Résumé du fichier de calibration.....  | 68 |
| Tableau 3.15: Améliorations apportées au modèle réduit en fonction du type de substrat testé.....  | 71 |
| Tableau 4.1: Description des caractéristiques des substrats.....   | 76 |
| Tableau 5.1: Descriptions des lots et déplacements effectués.....  | 91 |
| Tableau 5.2: Comparaison des taux de répartition pour les temps longs et courts.....   | 92 |
| Tableau 5.3: Descriptions des lots et déplacements effectués.....  | 96 |
| Tableau 5.4: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts.....   | 97 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 5.5: Description des lots et déplacements effectués.....   | 99  |
| Tableau 5.6: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts .....                                | 100 |
| Tableau 5.7 : Description des lots et déplacements effectués.....  | 102 |
| Tableau 5.8: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts .....                                | 103 |
| Tableau 5.9: Description des lots et déplacements effectués.....   | 106 |
| Tableau 5.10: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts.....                                | 107 |
| Tableau 5.11: Descriptions des lots et déplacements effectués.....   | 110 |
| Tableau 5.12: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts.....                                | 111 |
| Tableau 5.13: Descriptions des lots et déplacements effectués.....   | 113 |
| Tableau 5.14: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts.....                                | 114 |
| Tableau 5.15: Taux de répartition pour chaque substrat .....   | 118 |
| Tableau 5.16: Légende du tableau comparatif des critères d'optimisation.....                                     | 130 |
| Tableau 5.17: Tableau comparatif des critères d'optimisation.....  | 131 |
| Tableau 6.1: Présentation des lots de loches pour les expérimentations sur la passe entière.....                 | 136 |
| Tableau 6.2: Répartition des poissons dans les différents bassins.....   | 137 |
| Tableau 6.3: Répartition analysée des poissons pour le substrat 0000.....  | 137 |
| Tableau 6.4: Répartitions analysées des lots pour le substrat optimisé (R42M) .....                              | 139 |
| Tableau 6.5: Présentation des lots et répartition des chabots en fin d'expérience sur les bassins standards..... | 141 |
| Tableau 6.6: Comparaison des taux de répartition des chabots pour des temps longs et courts                      | 142 |
| Tableau 6.7: Présentation des lots pour les chabots sur les expérimentations en passe entière..                  | 145 |
| Tableau 6.8: Répartition des chabots dans les différents bassins sur la passe entière .....                      | 145 |
| Tableau 6.9: Présentation des lots pour les hotus et déplacements effectués au meilleur moment .....             | 149 |
| Tableau 6.10: Présentation des lots et déplacements effectués .....  | 152 |
| Tableau 9.1: Paramètres enregistrés pour la modélisation numériques de l'écoulement sur SolidWorks .....         | 180 |
| Tableau 9.2: Tracabilité des espèces utilisées.....  | 184 |
| Tableau 9.3 : Nourrissage des loches.....  | 184 |
| Tableau 9.4 : Nourrissage des chabots .....  | 185 |
| Tableau 9.5 : Nourrissage des hotus.....   | 185 |
| Tableau 9.6: Paramètres utilisés pour les caméras .....  | 186 |
| Tableau 9.7: Paramètres fixés lors de l'utilisation de la pompe.....   | 186 |
| Tableau 9.8: Séquence d'allumage des lampes pour simuler l'aurore et le crépuscule .....                         | 187 |



# Chapitre 1

---

## Contextualisation

---

### 1.1 Contexte global

Cette sous-section est inspirée du travail de Lucas et Barras (2001) dans le document intitulé « *Migrations of Freshwater Fishes* » ainsi que de la thèse réalisée par Jean-Philippe Benitez qui a pour titre : « *Etude dynamique des déplacements de montaison de poissons holobiotiques potamodromes, par l'intermédiaire de passes migratoires* ».

#### 1.1.1 Intérêt des migrations d'eau douce

Les rivières sont le recueil d'une très large variété d'habitats. Leur variabilité quant à la température, la pente, le débit, la composition chimique de l'eau ainsi que le substrat sont les principaux facteurs qui forment cette large diversité d'habitats dans les rivières (Huet, 1949 ; Townsend, 1989). Cette variabilité est la source de nombreuses stratégies écologiques et des cycles de vie propres à chaque espèce. Dans un cours d'eau, on retrouve diverses espèces en fonction du tronçon de la rivière observée. Cela a permis l'établissement de zonations piscicoles. En fonction de la pente, de la largeur et du gradient amont-aval, quatre zones ont pu être déterminées, celles-ci sont reliées à l'espèce la plus représentative (Huet, 1949). D'amont vers aval les quatre zones sont les suivantes : la zone à truites, la zone à ombres, la zone à barbeaux et la zone à brèmes. Les deux zones les plus en amont forment la zone dite « salmonicole » alors que les deux autres forment la zone dite « cyprinicole ». La zone cyprinicole est constituée de fleuves et rivières assez larges avec une pente faible à moyenne alors que la zone salmonicole est reliée à des ruisseaux ou rivières étroites de petites et moyennes tailles avec une pente forte.

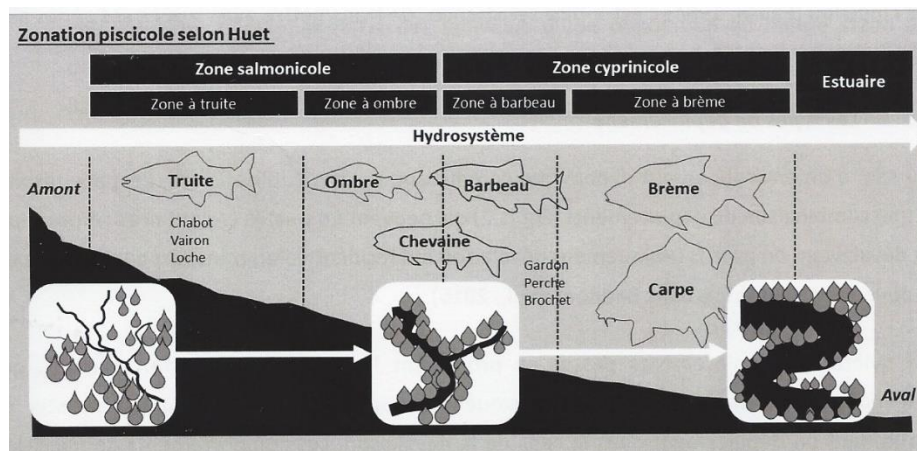


Figure 1.1 : Zonation piscicole selon Huet

Les poissons d'eau douce se déplacent entre les divers habitats, ces déplacements sont nécessaires à leur cycle vital. Un habitat correspond à un élément spatio-temporel du biotope qui possède des caractéristiques physico-chimiques et biologiques précises pour répondre à un besoin donné (Blondel et Bourlière, 1979). Les poissons explorent ces divers habitats afin d'assurer leurs fonctions vitales et améliorer leur processus biologique (Northcote, 1984 ; Lucas et Baras 2001 ; Pander et Geist, 2013 ; Baudoin et al., 2015). Les trois intérêts principaux de ces migrations sont les suivants :

- **Se réfugier** pour échapper aux prédateurs ou pour éviter d'avoir affaire aux contraintes du milieu.
- **Se nourrir** pour assurer leur croissance et leur développement.
- **Se reproduire** pour assurer la pérennité de l'espèce et permettre la survie des poissons juvéniles.

Les mouvements peuvent être latéraux c'est-à-dire d'un côté à l'autre du cours d'eau, verticaux ou encore longitudinaux (dans l'axe de la rivière) entre l'amont et l'aval de la rivière.

### 1.1.2 Types de migrations

Il existe trois schémas de migrations :

- L'océanodromie, décrit les migrations qui n'ont lieu qu'en mer.
- La potamodromie, décrit les migrations qui n'ont lieu qu'en eau douce.
- La diadromie, décrit les migrations entre l'eau de mer et l'eau douce.

Dans le cadre d'une étude liée aux passes à poissons, seules la potamodromie et la diadromie sont abordées puisque les passes n'ont pas d'utilité en eau de mer. L'océanodromie ne sera par conséquent pas présentée de manière plus détaillée. Dans la présente étude, l'accent est davantage mis sur les espèces potamodromes puisque la presque totalité des essais expérimentaux a eu lieu sur des chabots, hotus et loches qui sont des espèces holobiotiques potamodromes. L'objectif central

étant lié à une adaptation des passes visant à favoriser leur franchissabilité par des poissons mauvais nageurs.

### **Diadromie :**

Ce type de migration est en général de longue portée puisqu'elle a lieu entre la mer et l'eau douce. La distance entre deux points d'intérêts est néanmoins fort variable. Ce changement de milieu entraîne régulièrement des déplacements de plusieurs centaines voire plusieurs milliers de kilomètres.

De manière générale, les poissons possèdent un biome (la mer ou l'eau douce) dans lequel ils s'alimentent et croissent et un autre biome où se produit la reproduction. Ce biome est modifié en fonction des espèces. Il existe trois types d'espèces diadromes (Myers, 1949 ; Gross et al., 1988 ; McDowall, 1997) :

- Les espèces catadromes telles que l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), se reproduisent en milieu marin et réalisent leur croissance en eau douce. L'anguille européenne se reproduit dans la mer des Sargasses dans l'Atlantique Nord proche des côtes américaines. Elles réalisent donc une migration de plusieurs milliers de kilomètres pour atteindre les côtes européennes et Nord africaines. Elles croissent ensuite du stade de civelles jusqu'à celui d'anguilles argentées dans les rivières européennes. Ce processus dure plusieurs années. Ensuite, les anguilles argentées retournent vers la mer des Sargasses afin de s'y reproduire (Van Ginneken et Maes, 2005).
- Les espèces anadromes telles que le saumon atlantique (*Salmo salar*) se reproduisent en eau douce alors qu'ils croissent en milieu marin. Les saumons adultes remontent et pondent en rivière, les alevins se développent en rivière jusqu'au stade « smolt ». Ce processus prend un à trois printemps. La smoltification se déroule au printemps, les saumons juvéniles prennent une couleur argentée et dévalent les rivières afin d'atteindre la mer. Ils grandissent ensuite dans ce milieu et remontent en rivière lorsque leur tour est venu de se reproduire (Klemetsen et al., 2003).
- Les espèces amphidromes sont des poissons qui migrent d'eau douce vers la mer et inversement sans se reproduire. Les gobies (*Gobius* sp.) sont des amphidromes (Mc Dowall, 2007).

### **Potamodromie :**

Les espèces holobiotiques potamodromes se retrouvent en eau douce durant l'entièreté de leur vie (Lucas et Baras, 2001). Leur comportement est moins connu que celui des espèces diadromes en raison de leur faible intérêt commercial. Néanmoins, ces espèces ont besoin de se déplacer et d'effectuer des migrations. Ce type de migration est généralement moins conséquent en termes de kilomètres parcourus que la diadromie. Selon les espèces et populations, ces migrations peuvent aller de plusieurs centaines de kilomètres à des migrations beaucoup plus restreintes de seulement quelques centaines de mètres (Lucas et Batley, 1996 ; Ovidio et Philippart, 2002 ; Fredrich, 2003).

Parmi les potamodromes, certaines espèces apprécient le courant (espèces rhéophiles) alors que d'autres aiment davantage les faibles courants et eaux stagnantes (espèces limnophiles).

La saison de reproduction de ces espèces est souvent connue (Philippart et Vranken, 1983 ; Bruslé et Quignard, 2013) et a principalement lieu au printemps et au début de l'été. La période de reproduction entraîne des migrations de reproduction et donc potentiellement une présence accrue dans les passes.

### 1.1.3 Obstacles à la libre circulation de la faune piscicole

L'homme a commencé à modifier l'écoulement des cours d'eau en réalisant des ouvrages d'art tels que des barrages sur ces cours d'eau. Ces barrages étaient construits afin d'alimenter des moulins, des forges ou des piscicultures. Ces constructions sont apparues en grande partie durant les 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècles et ont causé la fragmentation latérale et longitudinale de la plupart des rivières et fleuves. En plus de cela, les barrages perturbent le débit, les régimes thermiques et impactent également l'hydromorphologie des cours d'eau (Dynesius et Nilsson, 1994 ; Nilsson et al., 2005 ; Dudgeon et al., 2006 ; Fullerton et al., 2010 ; Capra et al., 2017).

A partir du 20<sup>ème</sup> siècle, les barrages ont davantage été construits afin de « maîtriser » les cours d'eau, permettre la navigation et produire de l'hydroélectricité (Ward et al., 1999 ; Nilsson et al., 2005). Cette régulation des cours d'eau et production d'électricité sont assurées par des barrages bien plus importants qui ont des conséquences néfastes sur la faune piscicole. Ils empêchent la libre circulation des poissons, leur habitat et modifient la qualité de l'eau (Croze et Larinier, 1999 ; Larinier, 2008).

Les retenues d'eau ainsi que la tendance à l'homogénéisation du débit des cours d'eau modifient le transport de sédiment et de ce fait, les variations morphologiques des cours d'eau dans le temps. L'empêchement de débit très fort tel que des crues réduit fortement les changements morphologiques des fleuves et rivières, ce qui a tendance à homogénéiser les habitats (Guenther et Spacie, 2006), en l'occurrence des habitats profonds avec une faible oxygénation du milieu.

La menace principale de ces ouvrages d'art quant à la biodiversité des poissons d'eau douce reste tout de même la fragmentation longitudinale des cours d'eau (Cowx et Welcomme, 1998 ; Silva et al., 2017). Ces obstacles peuvent, en effet, s'avérer infranchissables pour les poissons. Au-delà de la hauteur du barrage, le débit, la profondeur de la fosse d'appel ou les turbulences peuvent rendre les obstacles infranchissables (Baudoin et al., 2015) et de ce fait, empêcher des migrations de reproduction. Cette entrave à la libre circulation a un impact néfaste sur la richesse spécifique de la faune piscicole et cause des diminutions importantes des populations de poissons (Lucas et Barras, 2001). Des obstacles de plus petite taille peuvent également poser des problèmes pour les migrations. Ceux-ci peuvent perturber le déplacement des poissons et causer des retards à la migration (Ovidio et al., 2007 ; Acou et al., 2008). L'ensemble de ces impacts engendrent un fort déclin voire même l'extinction d'un bon nombre d'espèces de poissons (Silva et al., 2017).

#### 1.1.4 Restauration de la libre circulation

Rétablir la continuité longitudinale des rivières permettrait la restauration de la libre circulation des poissons et rétablirait les fonctions hydrologiques telles que le débit, le transport de sédiments et de nutriments. Une manière efficace de faire serait l'enlèvement des barrages en rivière (Poff et Hart, 2002 ; Tummers et al., 2016). Malgré le fait que la continuité longitudinale soit une des priorités dans le programme de restauration des rivières (Kemp et O'Hanley, 2010), l'arasement des barrages reste une solution très compliquée à mettre en place. Les barrages sont des investissements de grande ampleur ayant généralement une durée de vie d'une centaine d'années. Leur destruction engendrerait de grosses pertes économiques d'autant plus que l'hydroélectricité représentait 16,3% de la production électrique mondiale en 2013. La destruction de ces ouvrages d'art entraînerait également des problèmes hydrologiques, cela empêcherait une bonne régulation des cours d'eau et réduirait la probabilité d'avoir de l'eau pour les cultures ou de l'eau potable tout au long de l'année pour l'agriculture et les villages en aval du barrage. Il existe également d'autres contraintes hydrologiques telles que la fragilisation des berges ou encore des contraintes d'ordre patrimonial ou halieutique comme la disparition du plan amont propice à la pêche. Ce sont principalement ces raisons qui empêchent la restauration de la continuité longitudinale des rivières par destruction des barrages.

Afin de permettre à la faune piscicole d'atteindre le secteur amont en contournant l'obstacle, des dispositifs ont été installés au droit des barrages (Clay, 1995 ; Larinier et Travade, 1998 ; Roscoe et Hinch, 2010 ; Bunt et al., 2015 ; Noonan et al., 2012). Les dispositifs sont fréquemment positionnés sur les rives ou au centre du barrage et sont constitués de structures techniques en béton ou en enrochement.

#### 1.1.5 Types de passes à poissons :

- **Les passes à ralentisseurs ou échelle Denil.** Ce sont des canaux rectilignes qui sont pourvus de plots qui cassent ainsi le courant et permettent de diminuer la vitesse du courant. Ces passes sont très faciles à construire et à intégrer aux ouvrages existants. Elles demandent peu d'études mais sont limitées aux seules espèces endurantes et à l'aise dans des eaux tumultueuses. Etant donné qu'il n'y a pas de zones de repos, le poisson doit remonter la passe en une seule fois et cela demande un effort considérable. Ce type de passe est réservée aux bons nageurs (Katopodis et Williams, 2012).

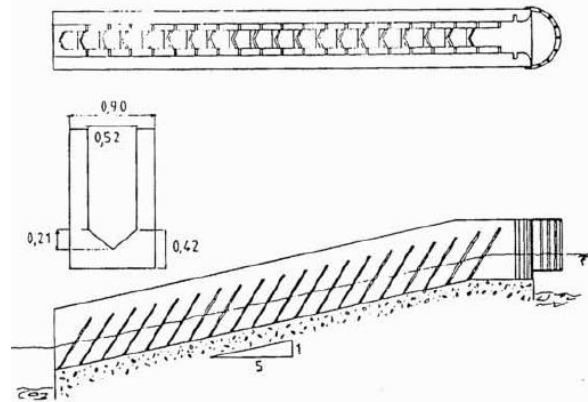


Figure 1.2: Passe à ralentisseurs (Larinier, 1987)

- **Les écluses et ascenseurs.** Le fonctionnement est le même que pour une écluse à bateaux. Les poissons sont placés dans un sas et puis le sas remonte ou redescend pour permettre aux individus de poursuivre leur déplacement. Ce principe est peu efficace car il demande une adaptabilité aux périodes de l'année. Durant les périodes de migrations, elles doivent être opérationnelles et durant les périodes hivernales, l'installation ne doit pas fonctionner. De plus, un entretien important est nécessaire.

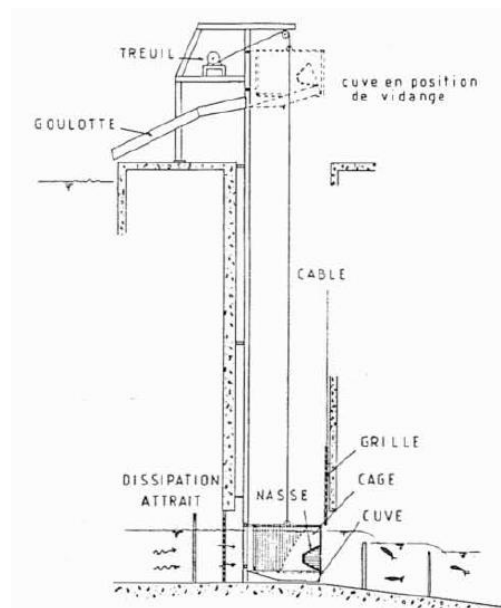


Figure 1.3: Ascenseurs (Larinier, 1987)

- **Les passes à bassins successifs.** Ce sont les passes les plus largement utilisées car ce sont les plus efficaces et elles demandent peu d'entretien. Le principe est de diviser la chute totale en une succession de petites chutes entrecoupées de bassins. L'intérêt de ce type de

dispositif est la création de zones de repos pour permettre aux individus de remonter la passe en plusieurs temps. La turbulence est un facteur à prendre en compte. Les poissons ont tendance à utiliser beaucoup plus d'énergie lors qu'ils se trouvent dans un environnement turbulent par rapport à un écoulement laminaire (Larinier, 1987). Il faudra donc limiter ces turbulences à 150-200 W/m<sup>3</sup> (Bell, 1973 ; Larinier, 1977). Bien que le facteur déterminant du taux de franchissabilité d'une passe soit la vitesse au droit de l'échancrure, la géométrie et l'équipement des bassins sont importants afin de permettre une récupération efficace. Il existe trois types de passes à bassins successifs dont un bassin type est représenté sur la Figure 1.4 dans l'ordre suivant de gauche à droite : les passes à fentes, les passes à échancrures ou à fentes verticales et les passes à déversoirs.

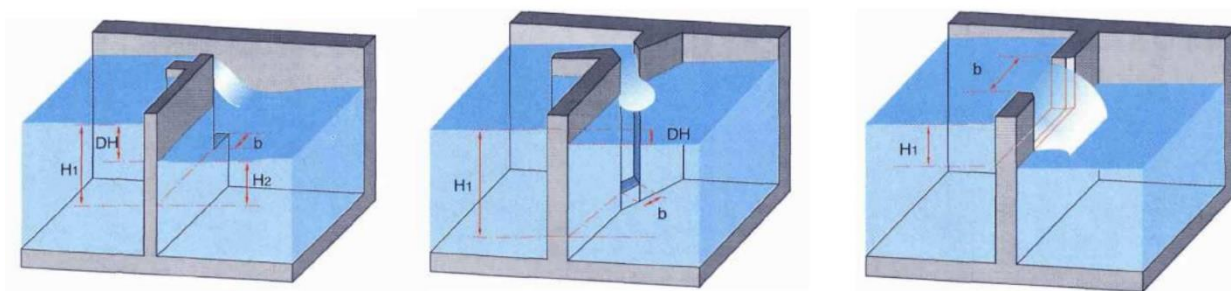


Figure 1.4 : Passes à bassins successifs : passe à fentes, passe à échancrures et passe à déversoirs (Burgun, 2014)

- **Les rivières de contournement.** Ce sont des passes qui reconstituent de manière représentative les conditions de la rivière. Elles jouent sur la reconstitution d'un habitat « naturel » pour le poisson avec une pente maximale de 5 à 6%. Leur longueur est généralement plus importante que celle des autres passes et c'est ce qui permet l'aménagement d'une pente si faible. Ce type d'aménagement s'intègre facilement dans le paysage et est franchissable par la plupart des poissons. Pour réaliser ce type d'ouvrage, il faut bénéficier d'un espace suffisant.



Figure 1.5 : Rivière de contournement (Smavas, 2018)

- **Les passes à anguilles.** Il existe plusieurs types de passes à anguilles, certaines sont réservées aux civelles et anguillettes, d'autres aux plus grosses anguilles. De manière générale, les anguilles n'empruntent pas les passes à poissons classiques en raison de leur incapacité à franchir de faibles chutes. La passe à plots (à gauche) est adaptée aux grosses anguilles (>25cm) alors que les brosses (à droite) sont adaptées aux plus petites. Ces passes ont une pente longitudinale de 15 à 30° et sont alimentées d'un débit faible (tirant d'eau d'1cm). Elles sont implantées le plus près possible des berges.



Figure 1.6 : Passe spécifiques à anguilles. A gauche pour les anguillettes, à droite pour les civelles. (Burgun, 2014)

La problématique du passage dans le sens inverse, c'est-à-dire de l'amont vers l'aval, n'est pas réellement abordée dans cette étude mais a suffisamment d'importance que pour être mentionnée. La présence de retenue cause des modifications du milieu naturel et peut aussi donner lieu à des passages dans les turbines qui peuvent blesser voir tuer les poissons (Buysse et al., 2015; Fjeldstad et al., 2012), dans les évacuateurs de crues, dans les déversoirs et dans les prises d'eau industrielle ou agricoles. Les mortalités dues à la dévalaison peuvent s'avérer conséquentes. Pour éviter ces décès, plusieurs dispositifs peuvent être mis en place, le plus fréquent est l'exutoire de dévalaison.

**Exutoire de dévalaison.** Leur rôle est de permettre le passage des poissons de l'amont vers l'aval du barrage peu importe le débit du cours d'eau et sans passer par les turbines hydroélectriques lorsque le barrage en possède. Il arrive aussi que les poissons utilisent un dispositif de montaison pour se déplacer vers l'aval, les rivières de contournement donnent régulièrement lieu à des dévalaisons (Williams et al., 2012) tandis que les dévalaisons dans les passes à bassins sont plus rares.

## 1.2 Contexte particulier

La présente étude s'inscrit dans un programme de restauration des passes à poissons en Meuse belge. C'est dans ce cadre que le bassin hydrographique mosan sera présenté dans sa globalité. Un rappel historique de l'implantation des passes dans le fleuve sera proposé avant de décrire de manière plus approfondie le programme de restauration et les raisons qui ont poussé à construire un modèle réduit de la passe de Rivière au laboratoire des recherches hydrauliques de Châtelet.

Enfin, les études antérieures à celle-ci sur le modèle réduit seront décrites et les principaux objectifs du mémoire seront exposés.

### 1.2.1 Description du bassin de la Meuse

La Meuse est longue de 950km et son bassin versant couvre une superficie de 34548 km<sup>2</sup> (dont 12000km<sup>2</sup> en Belgique) soit une surface un peu plus large que celle de la Belgique. Le fleuve prend sa source en France, à Pouilly-en-Bassigny en Champagne-Ardenne à 409m d'altitude et se jette dans la mer du Nord dans le bras de mer Haringvliet aux Pays-Bas. Son bassin versant s'étend sur cinq pays : la France, le Luxembourg, la Belgique, l'Allemagne et les Pays-Bas. La Meuse sillonne lors de son parcours les trois pays que sont : la France, la Belgique et les Pays-Bas.

La Meuse est caractérisée par une forte saisonnalité des débits, élevés en hiver et faibles en été (de Wit et al., 2007). Ses principaux sous-bassins hydrographiques sont ceux des affluents de la Chiers et la Semois (France), de la Lesse, la Sambre et l'Ourthe (Belgique) et de la Roer, la Schwalm, la Niers, le Dommel et le Mark (Pays-Bas).

Le fleuve a connu la construction de nombreux barrages sur tout son long. Ces ouvrages assurent la navigation, la régulation du débit et la production d'hydroélectricité. Certains de ces barrages sont munis de passes à poissons modernes et fonctionnelles.

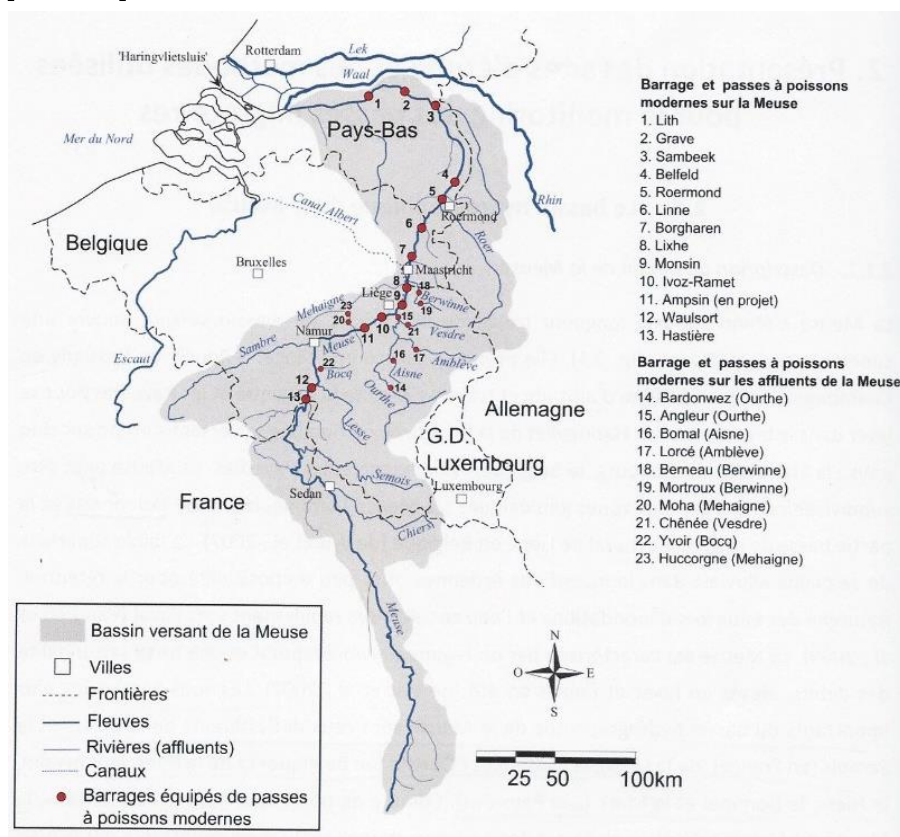


Figure 1.7 : Schéma des barrages et passes à poissons modernes équipés sur la Meuse et ses affluents.

### 1.2.2 Historique des passes en Meuse et programme de restauration

La modernisation des ouvrages d'art en Haute-Meuse namuroise débutant en 1982 jusqu'à 1999. Ensuite, l'installation de centrales d'hydroélectrique sur ce tronçon rendait obligatoire la mise à jour des échelles à poissons. Peu après, la Directive Cadre Européenne sur l'eau datant du 23 octobre 2000 a imposé le maintien de la continuité écologique des cours d'eau au droit des ouvrages créant leur discontinuité. Un accord parallèle avec le Benelux visant à rétablir la libre circulation des grands migrateurs s'est conclu en 1996. Ces poissons sont de taille plus importante et nécessitent des bassins plus larges que ceux installés dans les passes de La Plante à Anseremme (amont de Namur). Ces décisions ont mené à l'établissement d'un programme de restauration des passes à poissons dans la Meuse en général et plus particulièrement aux alentours de Namur.

#### **Etat en 2007**

Le projet a débuté par l'inventorisation des divers ouvrages d'art entravant la circulation des poissons migrateurs. L'état d'efficacité des différentes passes mosanes qui est proposé ci-dessous (Figure 1.8) date de 2007. Les Pays-Bas ont démarré leurs rénovations au droit des barrages néerlandais à partir de 1992 jusqu'en 2007. La décision prise par le Benelux en Avril 1996 visant à rétablir la libre circulation des poissons migrateurs en Nord-Meuse-Ourthe pour 2010 a poussé la Belgique à réaliser un plan de rénovation de ses passes mosanes jugées inefficaces ou peu efficaces.

Il est à noter que ce schéma informe uniquement sur les dispositifs de montaison et pas de dévalaison. En effet, lorsqu'une centrale hydro-électrique est équipée, il est nécessaire de prévoir un dispositif pour repousser les poissons ou encore un chenal de dévalaison<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> <http://www.meuse-maas.be/CIM/media/EspacePublic-Documents/Publications/1997-2002/PUBLHINDERNISF.pdf?ext=.pdf>

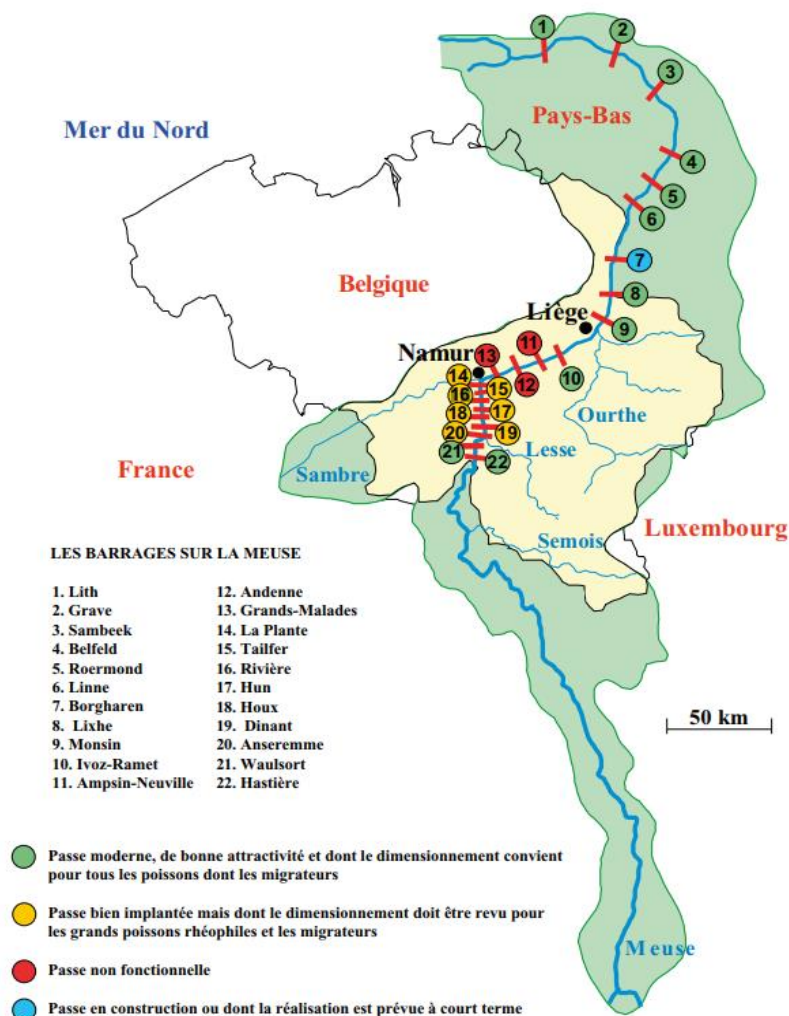


Figure 1.8: Implantation des passes à poissons sur la Meuse aux Pays-Bas et en Belgique (Région Wallonne, 2007)

En effet, comme illustré sur la (Figure 1.8), trois passes belges situées juste en aval de Namur (Grands-Malades, Andenne et Ampsin-Neuville) étaient inefficaces en 2007 alors que le dimensionnement de sept autres passes situées juste en amont de Namur (La Plante, Tailfer, Rivière, Hun, Houx, Dinant et Anseremme) devait être revu à cette même date<sup>2</sup>. Les bassins ont été jugés comme étant trop étroits que pour assurer le passage des grands migrateurs.

Un objectif intermédiaire de l'accord avec le Benelux était de rétablir la libre circulation de ces espèces en Nord-Meuse-Ourthe pour 2010. Toute la partie mosane en aval de l'Ourthe est ouverte à la libre circulation hormis la passe de Borgharen qui est prévue pour être fonctionnelle dans un futur proche à 2007.

<sup>2</sup> <http://environnement.wallonie.be/publi/education/saumon2000.pdf>

Le programme de rénovation des passes à poissons mosanes belges a débuté en 1996 par l'inauguration de la passe et du barrage moderne de Waulsort suivie deux ans plus tard par celle de la passe de Lixhe et du nouveau barrage d'Hastière suivie des inaugurations de la passe de Monsin en 2001 et Yvoz-Ramet en 2002. Le barrage des Grosses-Battes dans l'Ourthe qui est un affluent de la Meuse dont le point de confluence avec la Meuse se situe entre Monsin et Ivoz-Ramet a lui aussi été équipé d'une passe moderne en 2009. Une initiative de la Direction des Cours d'Eau non navigables de la Région wallonne a également suscité la construction de deux barrages sur la Berwinne (rivière salmonicole non navigable se jetant dans la Meuse juste en aval du barrage de Lixhe) respectivement à Berneau en juillet 2002 et à Mortroux en septembre 2004. Tous ces investissements hormis ceux de Waulsort et Hastière se situaient dans la continuité de la décision internationale de 1996 pour la libre circulation des espèces migratrices en Nord-Meuse-Ourthe. Les aménagements tels que décrits permettront le passage des salmonidés mais aussi des autres espèces afin de rétablir les disparités géographiques des espèces. Le programme de rénovation des passes à poissons mosanes a donc commencé par l'aval du fleuve avant de remonter progressivement vers l'amont.

### **Etat actuel**

En 2012, d'autres projets sur la Meuse étaient également prévus. Parmi ceux-ci figurait celui d'une passe à anguilles au barrage d'Ivoz-Ramet qui a été réalisé en 2015. La rénovation de la passe de Tailfer (n°15) a touché à sa fin en 2018.

En 2018, les passes mosanes belges, qui ne sont pas encore modernisées d'aval en amont sont les suivantes : Ampsin-Neuville, Andenne, Grands-Malades, La Plante, Rivière, Hun, Houx, Dinant et Anseremme ; soit les passes n°11 à n°20 sur le schéma, hormis Tailfer (n°15).

Pour ce qui est de la France, la plupart des passes à poissons sont peu efficaces.

### **Projets en cours**

Pour ce qui est du tronçon aval à Namur, une nouvelle échelle à poissons de type rivière de contournement est prévue à Ampsin-Neuville. La construction est simultanée à celle d'une nouvelle écluse. Ce projet débute cette année et sa fin est prévue pour 2022<sup>3</sup>. Aucune source ne mentionne des projets en cours pour le barrage d'Andenne et Grands-Malades.

En ce qui concerne le tronçon amont à Namur (Haute-Meuse namuroise), sept barrages de La Plante à Anseremme ont été équipés des mêmes passes à poissons. Il s'agit de passes à faible débit (150l/s) avec des bassins de dimensions et de profondeurs trop faibles pour assurer le passage des plus grands migrateurs. Les deux barrages les plus en amont (Hastière et Waulsort) ont été équipés de passes à échancrures (ou fentes verticales) de plus grandes dimensions et équipées elles-mêmes

---

<sup>3</sup> <http://www.ecluseampsin.be/>

d'un canal d'attrait débitant 2 à 3 m<sup>3</sup>/s. L'ensemble de ces rénovations en Haute Meuse ont eu lieu entre 1982 et 1999<sup>4</sup>.

Les passes d'Hastière et Waulsort sont donc fonctionnelles alors que les sept autres doivent être rénovées pour assurer le passage des grands migrateurs et aussi en vue de la construction des nouvelles centrales hydroélectriques au droit des différents barrages. Ces centrales seront équipées sur la même rive que les passes à poissons et le débit de 150l/s ne sera plus perceptible par les poissons, la présence d'un canal d'attrait sera donc indispensable. Ce sont les deux principales raisons motivant la rénovation des passes de La Plante à Anseremme (n°14 à n°20).

Comme dit précédemment, la passe de Tailfer (n°15) a déjà été rénovée et un avant-projet est en cours sur la passe de Rivière (n°16) depuis 2012. La construction du barrage de Rivière date de 1983. En effet, le dimensionnement de cette passe était à revoir (2007). Elle a donc été revue et construite à une échelle réduite 1/5 au laboratoire des recherches hydrauliques situé à Châtelet en 2013. Des recherches approfondies quant aux rapports d'échelle, dimensions principales caractéristiques ainsi que sur les valeurs cibles pour la conception de la passe ont été effectuées jusqu'en 2016 (Zorzan). Les plans finaux de la passe de Rivière ont ainsi été mis à jour pour la dernière fois à cette date. Cette passe est de type passe à bassins à échancrures ou fentes verticales. Les rénovations en amont de Namur donneront lieu à des passes de ce type.

Ces recherches antérieures à la construction de la passe ont un intérêt économique. En effet, l'investissement lié au passage à une passe moderne est de l'ordre du million d'euros par unité. Le nombre de passes non fonctionnelles ou partiellement fonctionnelles étant au nombre de neuf en Meuse belge, il s'avère intéressant de s'interroger sur leur efficacité avant de lancer la construction, d'autant plus que les passes à poissons sont des ouvrages d'art généralement prévus pour une longue durée de vie.

| Meuse   |                 |                    |                   |           |                          |                         |                   |                  |
|---------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------|--------------------------|-------------------------|-------------------|------------------|
| Cumulée | Dénomination    | Longueur utile (m) | Largeur utile (m) | Chute (m) | Flottaison normale amont | Flottaison normale aval | Niveau busc amont | Niveau busc aval |
| 4.014   | Hastière        | 100,00             | 12,00             | 2,89      | 98,41                    | 95,69                   | 93,12             | 92,94            |
| 8.931   | Waulsort        | 100,00             | 12,00             | 2,32      | 95,69                    | 93,29                   | 90,71             | 90,54            |
| 16.112  | Anseremme       | 100,00             | 12,00             | 2,23      | 93,29                    | 91,02                   | 88,45             | 88,27            |
| 19.900  | Dinant          | 100,00             | 12,00             | 1,83      | 91,02                    | 89,20                   | 86,45             | 86,45            |
| 23.430  | Houx            | 100,00             | 12,00             | 2,02      | 89,20                    | 87,17                   | 84,42             | 84,42            |
| 28.430  | Hun             | 100,00             | 12,00             | 2,80      | 87,17                    | 84,36                   | 81,61             | 81,61            |
| 33.210  | Rivière         | 100,00             | 12,00             | 2,05      | 84,36                    | 82,34                   | 79,59             | 79,59            |
| 38.625  | Tailfer         | 100,00             | 12,00             | 2,22      | 82,34                    | 80,08                   | 77,51             | 77,33            |
| 44.900  | La Plante       | 100,00             | 12,00             | 1,73      | 80,08                    | 78,35                   | 75,56             | 75,56            |
| 48.258  | Grands-Malades  | 200,00<br>(87+110) | 25,00             | 4,15      | 78,35                    | 74,20                   | 73,40             | 69,20<br>69,20   |
| 63.110  | Andenne-Seilles | 200,00<br>(110+87) | 25,00             | 5,05      | 74,20                    | 69,15                   | 69,20             | 65,25<br>65,25   |

Figure 1.9 : Caractéristiques des passes à poissons en Haute-Meuse (Région Wallonne, 2007)

<sup>4</sup> <http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/export/sites/met.dg2/doc/fr/nouv/modernisation.pdf>

Comme on peut le voir sur la Figure 1.9, les échelles à poissons de La Plante à Hastière ont des dimensions très similaires, il ne reste que six d'entre elles à rénover. Leur longueur et leur largeur sont à chaque fois similaires et la hauteur de chute tourne autour des deux mètres. Il est par conséquent intéressant de travailler sur un seul modèle avec possibilité d'extrapoler les résultats pour l'ensemble du tronçon amont au confluent Sambre et Meuse. Le modèle réduit de l'échelle de Rivière a été construit en prévoyant la possibilité d'adapter le modèle pour étudier les autres sites.

Ce modèle réduit de la passe de Rivière a été construit comme expliqué plus tôt afin d'analyser l'écoulement et la débitance du canal d'attrait ainsi que l'écoulement dans les bassins avals de l'échelle dont la géométrie ne correspond pas à la géométrie standard. Après cette étude, le SPW représenté par le Laboratoire des Recherches Hydrauliques a décidé d'utiliser le modèle au-delà de l'analyse de l'écoulement pour expérimenter sur le vivant. C'est dans ce cadre de recherche que plusieurs mémoires successifs encadrés par Mr Bousmar et Mr Rollin ont été rédigés. D'abord, un travail sur la modélisation numérique de l'écoulement dans une passe à poissons a été réalisé par A. Baugnée et J.C. De Greef (2013-2014). Un mémoire élaborant le protocole ainsi que des premières études sur la franchissabilité des saumons a été réalisé par J.C. Pype durant l'année académique 2014-2015. Celui-ci a été suivi d'un mémoire réalisé par E. Courtois et L. Van Audenhaege (2016-2017) étendant les expériences sur diverses espèces telles que les chevaines, ablettes et chabots. Ces expériences ont abouti sur des résultats convaincants en termes de franchissabilité pour les chevaines et saumons, un peu moins convaincants pour les ablettes et très mauvais pour les chabots. L'objectif majeur de la présente étude est d'étudier et améliorer l'aménagement de la passe afin qu'elle convienne mieux aux espèces moins bonnes nageuses sans entraver le passage des bons nageurs. Pour ce faire, l'efficacité de plusieurs substrats sur diverses espèces de fond sera étudiée. Cette étude permettra d'évaluer l'effet des éléments de macro-rugosité au sein des bassins de la passe mais aussi d'en optimiser leur géométrie.

En résumé, sept passes à poissons de la Haute-Meuse namuroise nécessitaient des rénovations pour permettre le passage des grands migrateurs dont font partie les salmonidés. Des études ont eu lieu sur l'écoulement dans la passe et sur la débitance du canal d'attrait sur un modèle réduit de la passe de Rivière et ce modèle est depuis quelques années utilisé afin de ressortir des tendances plus générales quant à la franchissabilité de ces passes par différentes espèces et la possibilité d'aménager les bassins pour faciliter les montaisons des moins bons nageurs.

### 1.3 Objectifs et enjeux

Le contexte global dans lequel s'insère cette étude est de prédire et améliorer la franchissabilité des poissons mauvais nageurs dans un dispositif de franchissement sur base d'expérimentations en modèle réduit. L'étude a pour objectif d'évaluer la possibilité d'augmenter la population et la multi-spécificité des poissons capables d'atteindre l'amont de passes à bassins successifs et capables, de ce fait, de réaliser leurs migrations de montaison.

Dans ce contexte, l'objectif propre au travail est d'étudier dans un modèle réduit de passes à bassins le comportement des poissons. La recherche se place dans la continuité de l'étude réalisée par J.C. Pype (2014) et celle de E. Courtois et L. Van Audenhaege (2016) en y complétant le côté multi-spécifique et en introduisant l'aménagement de la surface de fond du modèle réduit. Pour ce faire, des loches, chabots, hotus et civelles ont été expérimentés et sept types de substrat de fond ont été conçus et adaptés sur les bassins du modèle réduit.

Les objectifs partiels sont explicités ci-dessous dans un ordre similaire à l'organisation de cet écrit.

Premièrement, les détails de la similitude entre le modèle réduit et le futur dispositif de Rivière sont exposés. Une loi d'échelle déterminant la taille des poissons à introduire dans le modèle réduit pour les expériences afin de respecter les similitudes sera établie en se basant sur les capacités de nage et non plus sur un simple rapport des longueurs. Par ailleurs, l'analyse de l'impact des substrats sur le courant dans le fond de la passe sera étudiée à l'aide d'une simulation numérique.

Deuxièmement, les espèces expérimentées seront présentées de manière approfondie et les caractéristiques du matériel vivant tel que la taille, la disparité, la provenance, etc... seront abordées. Afin de s'assurer du maintien des conditions expérimentales tout au long des expériences, un système de contrôle des conditions environnementales sera également développé.

Ensuite, il est souhaitable de développer une méthodologie appropriée aux espèces utilisées, fiable et reproductible. Pour ce faire, la standardisation du nombre d'individus, du temps d'expérience ainsi qu'un protocole de lancement et d'arrêt d'expérience seront prévus. La stratégie d'optimisation et la conception des substrats seront aussi détaillés.

L'objectif principal est d'évaluer l'impact des différents éléments de fonds sur les espèces benthiques et d'en déduire un optimal. Pour ce faire, l'analyse du comportement intra et interbassins des loches face à la présence de substrats et son évolution en fonction du type d'éléments de fonds permettra de ressortir des tendances comportementales nécessaires à l'optimisation.

Enfin, l'efficacité du « substrat optimal » sera évaluée sur une autre espèce benthique qu'est le chabot et sur un bon nageur qu'est le hotu. L'objectif de cette partie sera de s'assurer que ce substrat ne convient pas qu'à une espèce benthique et qu'il ne gêne pas les meilleurs nageurs dans leurs déplacements.



# Chapitre 2

---

## Modèle

---

### 2.1 Etat de l'art

---

Afin de dimensionner une passe à poissons, il faut d'abord s'intéresser au fonctionnement des êtres vivants qui vont l'emprunter. L'élément sur lequel se base la conception est la musculature du poisson. Les poissons possèdent entre 50 et 70% de muscles par rapport à leur poids total. Deux types de muscles peuvent être distingués : les muscles blancs qui sont utilisés pour les activités courtes et intenses et les muscles rouges qui sont plus utilisés dans la durée, pour une activité moins soutenue. Il est important de séparer les deux types de muscles lorsqu'on étudie une espèce dans une passe à poissons car ils sont tous les deux utilisés mais à des moments différents. Lorsque des poissons nagent dans un bassin, ce sont les muscles rouges qui vont travailler, de lents mouvements sont opérés et une certaine récupération physique est effectuée. Lors du franchissement de l'échancrure ou de manière générale lorsqu'un poisson dépasse une certaine vitesse seuil, les muscles blancs sont sollicités. En effet, le poisson doit réaliser un effort conséquent pour atteindre sa vitesse de pointe. Cette vitesse ne peut pas être maintenue durant plus de quelques secondes et doit être suivie d'un moment de récupération.

De manière générale, les poissons de fond, qui ont de faibles capacités natatoires ont une proportion de muscles rouges très faible (Huss H, 1999). Par conséquent, cette faible capacité à se mouvoir sans effort dans les bassins doit être améliorée pour permettre à ces espèces de remonter la passe, bassin par bassin.

Lors de la construction des premières passes à poissons, la franchissabilité de la passe a été principalement étudiée à partir des capacités de nage des poissons. Trois types de nages peuvent être distingués (Blaxter, 1969 ; Webb, 1975).

- La nage soutenue qui peut être maintenue durant quelques minutes (muscles rouges et blancs).
- La vitesse de croisière qui est une vitesse à laquelle le poisson peut nager pendant des heures sans se fatiguer (muscles rouges).
- La vitesse de pointe qui est comparée à un sprint et qui ne peut être maintenue que durant quelques secondes (muscles blancs).

Afin de construire les meilleurs dispositifs de remontées possibles, la vitesse de pointe ne doit jamais être dépassée. Il faut également prévoir des zones de repos avec des vitesses plus petites que la vitesse de croisière afin de permettre une récupération physique des individus. Étant donné que les poissons sont capables de percevoir de très légères variations de champ de vitesse (Larinier, 1987), il est primordial de dimensionner les bassins pour donner assez de zones de repos à plusieurs poissons à la fois.

Quatre éléments sont importants lors du design d'une passe à poissons (Orsborn, 1987) :

- La vitesse du courant doit être optimisée pour minimiser le temps de présence dans les bassins, réduire le stress et les blessures au maximum mais doit éviter les déplacements aval non contrôlés. Il est important que la passe soit adaptée à toute une série d'espèces aux capacités de nages variées.
- Minimiser l'utilisation de l'eau lorsqu'il s'agit d'un aménagement hydroélectrique car ce sont des pertes de charges nettes qui diminuent le rendement énergétique.
- Maximiser la période d'utilisation de la passe lorsque les poissons l'empruntent. Malgré la fluctuation des niveaux d'eau au cours de l'année, la passe doit rester fonctionnelle.
- Diminuer les coûts de production et de maintenance au maximum. Lors de la rénovation d'une passe devenue obsolète, l'aménagement doit s'inscrire dans le cadre de la passe à rénover.

Le choix du type de passe se fera en analysant l'obstacle à franchir, la place allouée au dispositif de franchissement, les types d'espèces cibles, les caractéristiques hydrologiques du cours d'eau, ... Selon Larinier, quand plusieurs espèces sont visées, une passe à bassins successifs est à privilégier pour la polyvalence de celle-ci. Les espèces à capacités natatoires élevées franchiront la passe sans se reposer mais les espèces à faibles capacités natatoires pourront profiter des zones de repos pour remonter le dispositif plus lentement. Les passes à ralentisseurs sont plus sélectives et sont utilisées pour les saumons ou les truites de mer principalement. Quant aux ascenseurs, ils seront privilégiés pour les obstacles très hauts. Étant donné que dans le cas de la passe de Rivière, la chute est de 2,05 m et qu'une multitude d'espèces sont visées (bons et mauvais nageurs), la passe à bassins successifs sera préconisée.

Il reste maintenant à déterminer la forme des bassins et le type d'échancrures qui sera utilisé. Chaque système a des avantages et des inconvénients (Larinier, 1992). Pour les passes dont l'échancrure est très large, une augmentation du niveau d'eau engendre une augmentation rapide du débit et de la turbulence. Les passes à orifices noyés sont très efficaces pour maintenir un débit

constant mais par contre, la taille des orifices est assez dépendante de la taille des poissons. Les passes à fentes verticales ont un avantage important, c'est-à-dire que le débit et le volume d'eau présent dans les bassins croissent linéairement avec le niveau dans le bassin amont. Ce qui rend les vitesses et le niveau de turbulence assez constants lors des variations de hauteur (Larinier, 1992), cette particularité permet de garder les éléments les plus déterminants sous contrôle.

Le dernier élément important à prendre en compte est l'attractivité de la passe. Pour que la passe soit fonctionnelle, il est évident que les poissons doivent d'abord en trouver l'entrée. L'attractivité d'un dispositif est déterminée par la localisation de l'entrée et par les conditions hydrodynamiques (Larinier, 1987). Pour simuler la continuité du cours d'eau, il faut que la vitesse du courant sortant de la passe soit plus grande que la vitesse moyenne du cours d'eau. Les espèces migratrices affectionnent les vitesses élevées mais ces vitesses doivent permettre aux autres espèces aux capacités natatoires limitées d'emprunter également la passe. Une vitesse située aux alentours de 2.5 m/s est souvent acceptée (Larinier, 1992 ; Orsborn, 1985) mais dépend fortement du type d'espèce visés. Concernant l'emplacement de l'ouverture, le comportement général des poissons est de remonter le cours d'eau jusqu'à ce qu'un obstacle les empêche de continuer. L'entrée se fera donc le plus en amont possible (Carling et al, 1992). Cependant, d'autres facteurs doivent être étudiés en plus de cette règle générale : le risque de crue de la zone, le taux de débris qui peut s'y accumuler, la présence de remous près de cette zone à cause de turbines, ... On évitera de placer l'entrée de la passe près d'une turbine où des remous peuvent brouiller les signaux attirant le poisson. Chaque passe à poissons doit être étudiée séparément et ensuite, une solution amenant au meilleur compromis sera appliquée.

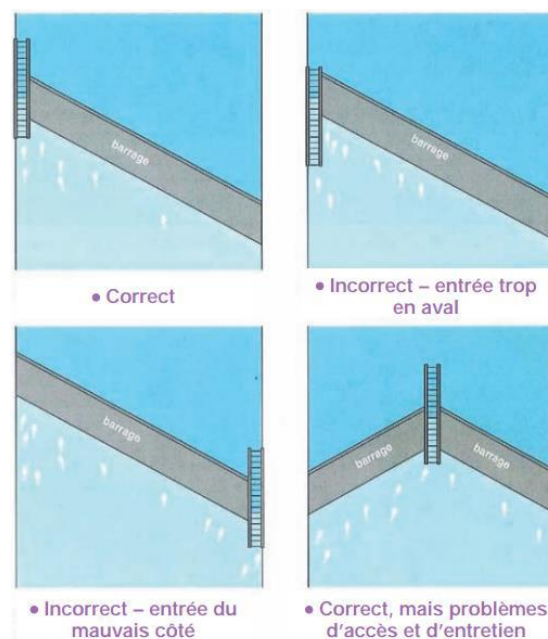


Figure 2.1: Placement optimal d'une passe à poissons en fonction de la forme du barrage (Larinier, 1992)

## 2.2 Travaux réalisés sur le modèle réduit

Deux travaux ont été réalisés avec le vivant sur le modèle réduit présent dans le laboratoire. Dans un premier, l'étude comportementale de salmonidés a été réalisée par Jean-Charles Pype durant l'année académique 2014-2015. Il s'agissait d'étudier le comportement des saumons dans la passe. Pour cela trois éléments ont été observés en détail.

- **L'effet de la lumière du jour** sur le nombre de remontées par heure. Plusieurs tests ont été réalisés avec les lumières allumées et d'autres, avec les lumières éteintes. Le résultat de cette comparaison est un déplacement accru lors du passage du jour à la nuit ou inversement. Etant donné que les salmonidés juvéniles ont une forte activité lors du crépuscule, l'auteur de l'étude considère que ce phénomène est tout à fait normal.
- **Le temps de remontée** des individus a été étudié. Le phénomène d'apprentissage n'a pas été démontré mais la quantité d'échantillons n'était pas suffisante pour réaliser un test statistique sûr. Une certaine homogénéité a été observée pour toutes les remontées d'un même individu.
- **La taille des poissons** a été mise en parallèle avec les temps de remontée. Une corrélation a été mise en évidence entre la taille et le temps nécessaire à une remontée complète de la passe.

Les zones de présences préférentielles des salmonidés ont été observées :

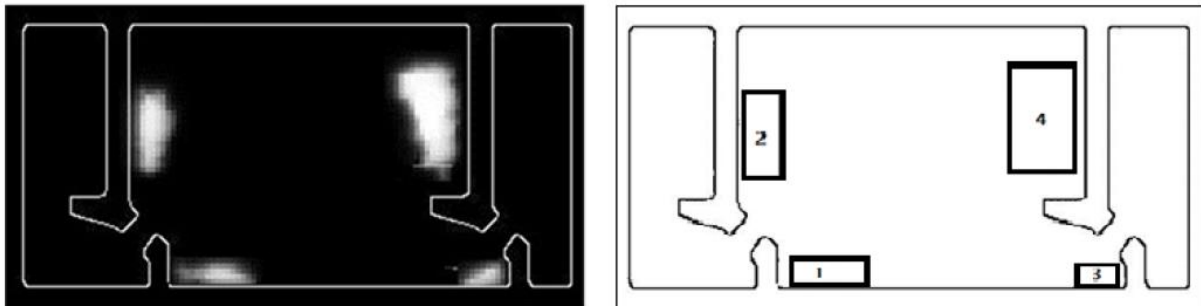


Figure 2.2: Zones de présence des salmonidés dans un bassin standard (Pype, 2015)

Un second travail a été réalisé sur d'autres espèces de poissons par Courtois et Van Audenhaege en 2016-2017. En plus de salmonidés, des ablettes communes, des chevaines ainsi que des chabots ont été introduits dans la passe. Le travail portait sur l'étude comportementale de différentes espèces de poisson dans un modèle réduit.

Ce travail a permis de comparer le comportement de plusieurs espèces de poissons aux capacités de nages bien différentes. Les poissons très bons nageurs comme le saumon ou les chevaines n'ont aucun mal à se déplacer dans les différents bassins. Mais les chabots qui sont bien moins bons nageurs se faisaient emporter par le courant. Plusieurs facteurs d'intérêt ont été analysés pour permettre une analyse précise de chaque espèce.

Les différentes zones de repos, les vitesses ainsi que les trajectoires empruntées par les poissons ont été trouvées en filmant les bassins et en appliquant un traitement d'images. Le franchissement des échancrures a été mesuré par un système RFID permettant de suivre les individus à tout moment.

La conclusion de ce travail est que les chevaines et les ablettes ont des capacités natatoires suffisantes pour se déplacer librement dans la passe et donc remonter celle-ci. Cependant, elles sont moins à l'aise que les salmonidés et choisissent de se reposer dans les zones de repos à chaque bassin. Les chabots ne se comportent pas bien dans la passe et les turbulences de l'écoulement emportent les petits chabots.

## 2.3 Principe de similitude

Afin de réaliser des expériences sur un modèle réduit et les interpréter de la meilleure des manières, il est nécessaire de vérifier que la transposition des résultats du modèle vers le prototype est fiable. Pour ce faire, les lois de similitudes sont étudiées.

L'échelle liant la longueur du modèle à celle de la passe in situ a été fixée à 1/5. Il faut trouver les échelles correspondantes pour le débit, la vitesse, la puissance dissipée dans le but de paramétrer le modèle.

Lors des études précédentes, l'échelle liant la longueur des poissons en réalité (à l'âge adulte) à ceux utilisés dans le modèle réduit (juvéniles) était similaire à l'échelle des longueurs du modèle. Or, les capacités natatoires des poissons ne sont pas directement proportionnelles à leur longueur. On proposera dans cette partie une loi d'échelle basée sur les capacités de nage car c'est cet aspect qui est représentatif de la difficulté d'un poisson à remonter les bassins de la passe à échancrures.

On proposera, dans un premier temps, de rappeler brièvement les rapports d'échelle des paramètres de l'écoulement :

La loi d'échelle des longueurs est une donnée et permettra de définir les autres.

Rapport d'échelle géométrique :  $\lambda_L = \lambda = 1/5$

Respect de la similitude de Froude (échelle des vitesses) :

$$F_r = \frac{V_1^2}{D_1 \cdot g} = \frac{V_2^2}{D_2 \cdot g} = \text{const.}$$

En sachant que le nombre de Froude est une constante, on peut écrire :

$$V \sim D^{1/2}$$

$$\lambda_V = \lambda^{1/2} = \left(\frac{1}{5}\right)^{1/2}$$

Afin de déterminer la loi d'échelle des débits, on débutera le raisonnement en évoquant la loi de continuité du débit :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{L^2}$$

On considère, ensuite, les pertes de charges comme constantes (loi de Darcy) et on remplace la vitesse à l'aide de l'équation de continuité, on obtient :

$$j = \frac{V^2 \phi}{2 \cdot g \cdot L} \sim \frac{Q^2}{L^5} = \text{const.}$$

On peut donc écrire :

$$Q \sim L^{5/2}$$

$$\lambda_Q = \lambda^{5/2}$$

Enfin, on peut trouver le rapport d'échelle pour la puissance dissipée via la formule suivante :

$$P = \rho g Q h$$

$$\lambda_P = \lambda_\gamma \lambda_Q \lambda_L = \frac{\lambda_N}{\lambda_L^3} \lambda_L^{5/2} \lambda_L$$

Avec  $\lambda_N = 1$ , on obtient :

$$\lambda_P = \lambda_L^{1/2}$$

Maintenant que les rapports d'échelle des paramètres de l'écoulement sont trouvés, on s'intéresse à la définition d'une loi liée aux capacités de nage.

Les capacités natatoires des poissons dépendent principalement de leur longueur et intrinsèquement de leur quantité de muscles, ces deux facteurs sont bien entendu liés entre eux. Ces capacités dépendent également du style de nage et de la température de l'eau.

La température de l'eau à Châtelet est en moyenne de 10 à 11°C alors que la température moyenne annuelle dans la Meuse fluctue entre 11 et 14°C en fonction des années et de la latitude. On observe sur le graphique suivant des relevés de la passe de Waulsort que les poissons empruntent majoritairement la passe en mars-avril-mai. A cette période l'eau est à une température proche de celle de Châtelet.

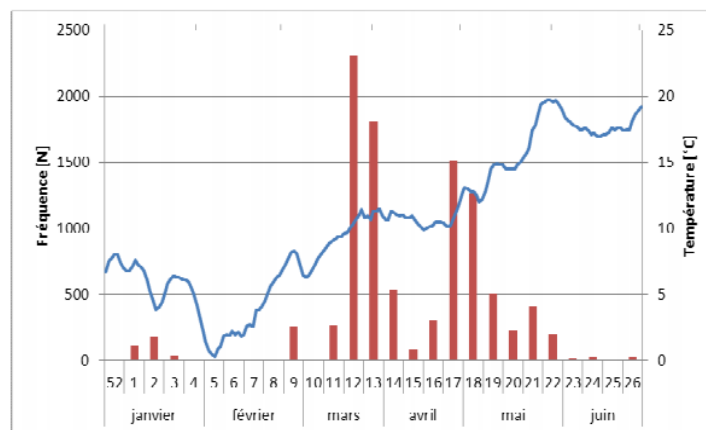


Figure 2.3: Evolution des observations de poissons à la passe de Waulsort et de la température (°C) de la Meuse du 1 Janvier 2012 au 1 juillet 2012 (SPW, DG03, Département de la Police et des Contrôles - Direction des Contrôles) (2012)

Les capacités de nage des différentes espèces mosanes en fonction de la température de l'eau sont mal connues et varient en fonction des espèces. En effet, deux espèces distinctes ne sont pas forcément au maximum de leurs capacités pour une même température.

La méconnaissance de l'évolution des capacités de nage en fonction de la température et la forte similitude entre la température de la Meuse en période de migration et celle de l'eau du laboratoire des recherches hydrauliques ont poussé à mettre ce paramètre de côté dont l'influence ne devrait pas biaiser les résultats expérimentaux.

De manière théorique, les deux principaux paramètres nécessaires pour franchir une échancre sont la vitesse maximale d'un poisson afin de franchir l'échancre et la vitesse de croisière permettant de se maintenir durablement dans un bassin.

La vitesse maximale est probablement plus déterminante que la vitesse de croisière dans le cadre de l'étude. En effet, les substrats réduisant les vitesses par endroit, le poisson ne pouvant pas supporter un courant trop important de manière continue aura la possibilité de se réfugier à un endroit plus calme afin de se maintenir dans le bassin. Néanmoins, deux approches seront proposées, l'une basée sur la vitesse maximale et la seconde sur la vitesse de croisière.

Deux formules empiriques ont été proposées par Kapotodis et Gervais (1991) se basant uniquement sur des mesures de vitesses expérimentales faites sur des poissons nord-américains de 38mm à 60cm à nage subcarangiforme. La première permet de définir la vitesse maximale d'un poisson pour un temps d'endurance d'une seconde en fonction de sa longueur alors que la seconde informe sur la vitesse de croisière pour un temps d'endurance de trente minutes toujours en fonction de la longueur. Ces formules ne sont pas représentatives pour toutes les espèces de poissons étant donné que tous les poissons n'ont pas le même type de nage et que leur vitesse maximale n'évolue pas de la même manière pour toutes les espèces. Néanmoins, cette relation a été établie sur plusieurs espèces différentes et se base sur les résultats moyens. Elle s'avère davantage fondée qu'un simple rapport des longueurs entre la passe réelle et le modèle réduit.

Pour plus d'informations quant à la détermination de cette formule, les auteurs renverront au mémoire de E. Courtois et L. Van Audenhaege.

Dans un premier temps, le raisonnement pour la vitesse maximale sera détaillé. Ensuite, la même méthode de calcul sera utilisée pour la vitesse de croisière sans encombrer l'explication par des développements similaires.

La formule de Katopodis et Gervais liant la longueur du poisson à sa vitesse maximale s'écrit :

$$V_{max} = 6,3353L_p^{0,6735}$$

Avec :  $L_p[m]$ , la longueur du poisson.

$V_{max}[m/s]$ , la vitesse maximale sur une seconde d'un poisson de longueur  $L_p$ .

On peut déduire de cette formule que :

$$V \sim L_p^{0,6735}$$

$$L_p \sim V^{\frac{1}{0,6735}}$$

En définissant  $\lambda_p$  l'échelle liant la longueur d'un poisson d'une espèce en Meuse à la longueur du poisson de cette même espèce dans le modèle réduit, on peut écrire :

$$\lambda_p = \lambda_V^{\frac{1}{0,6735}} = \lambda^{0,742}$$

On peut également utiliser la formule de Kapotodis Gervais d'une autre manière en écrivant :

$$\begin{aligned} V_{max} &= 6,3353 L_p^{0,6735} \\ v_{max} &= 6,3353 l_p^{0,6735} \end{aligned}$$

Avec :  $V_m$  [m/s], la vitesse maximale du poisson étudié de longueur  $L_p$  dans la Meuse.  
 $v_m$  [m/s], la vitesse maximale du poisson correspondant de longueur  $l_p$  dans le modèle réduit.

Par la similitude de Froude, on peut écrire :

$$v_{max} = V_{max} \cdot \lambda^{1/2}$$

En remplaçant dans les deux équations précédentes :

$$L_p^{0,6735} \cdot \lambda^{1/2} = l_p^{0,6735}$$

Et donc :

$$l_p = L_p \cdot \lambda_p = L_p \cdot \left(\frac{1}{5}\right)^{0,742} = 0,303 \cdot L_p$$

Cette relation indique qu'un poisson à nage subcarangiforme dans la passe doit mesurer en moyenne 30,3% de sa taille adulte en Meuse pour avoir une vitesse maximale respectant les lois de similitude.

Une seconde analyse se base sur la vitesse de croisière. La formule élaborée par Kapotodis et Gervais concernant cette vitesse s'écrit comme suit :

$$V_{moy} = 1,3898 L_p^{0,562}$$

Avec :  $L_p$  [m], la longueur du poisson.

$V_{moy}$  [m/s], la vitesse de croisière (30 minutes) d'un poisson de longueur  $L_p$ .

En réalisant exactement les mêmes développements que pour la vitesse maximale, on obtient comme solution finale :

$$l_p = L_p \cdot \left(\frac{1}{5}\right)^{0,89} = 0,239 \cdot L_p$$

Cette relation indique qu'un poisson à nage subcarangiforme dans la passe doit mesurer en moyenne 23,9% de sa taille adulte en Meuse pour avoir une vitesse de croisière respectant les lois de similitude.

Intuitivement, la vitesse maximale est plus représentative que la vitesse de croisière puisqu'elle détermine si un poisson est capable de franchir une échancrure. Néanmoins, les deux facteurs ont leur importance et on peut conclure qu'en moyenne, la taille d'un poisson expérimenté dans le modèle doit se situer entre 23,9% et 30,3%.

Tableau 2.1: Récapitulatif des lois d'échelle

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| Longueur                            | $\lambda_L = 1/5$                              |
| Vitesse                             | $\lambda_V = \left(\frac{1}{5}\right)^{1/2}$   |
| Débit                               | $\lambda_Q = \left(\frac{1}{5}\right)^{5/2}$   |
| Puissance                           | $\lambda_P = \left(\frac{1}{5}\right)^{1/2}$   |
| <b><math>V_{max}</math> poisson</b> | $\lambda_p = \left(\frac{1}{5}\right)^{0,742}$ |
| <b><math>V_{moy}</math> poisson</b> | $\lambda_p = \left(\frac{1}{5}\right)^{0,89}$  |

## 2.4 Description du modèle réduit

Le modèle réduit présent dans le laboratoire de la direction des recherches hydrauliques du service public de Wallonie est une représentation de la future passe à poissons du barrage de Rivière à l'échelle 1/5. Une passe à poissons est déjà partiellement fonctionnelle mais des travaux de rénovation vont être entrepris et des études sont réalisées pour en améliorer l'écoulement et la franchissabilité. L'intérêt de construire une passe à l'échelle 1/5 est avant tout pratique. En effet, il est plus facile de construire un ouvrage à des dimensions humaines où une observation et des manipulations sont possibles plutôt que de garder les dimensions réelles. De plus, le laboratoire dans lequel se trouve le modèle abrite d'autres modèles et la place étant limitée, un rétrécissement est nécessaire.

La passe à poissons a pour but de relier le bassin amont au bassin aval du barrage. Cela correspond à 2,05 m de dénivelé. La solution qui est proposée est de diviser cette chute en 7 en plaçant des bassins intermédiaires entre deux chutes. Cet enchaînement de chutes et de bassins va former la passe à poissons, d'où l'autre nom : échelle à poissons. La nouvelle échelle à poissons a des contraintes strictes du point de vue géométrique. Elle doit s'insérer dans l'échelle existante et donc les améliorations doivent se restreindre à la forme des bassins et à l'écoulement de l'eau à travers les échancrures. La passe a été dimensionnée à partir de bassins à fentes verticales. En ce qui concerne le dimensionnement de cet ouvrage, plusieurs critères sont à respecter afin d'assurer une franchissabilité aux espèces cibles. Les critères déterminés par la Direction des Etudes Techniques qui sont reprises ci-dessous :

Tableau 2.2: Critères de dimensionnement de la passe à poissons de Rivières déterminés par la Direction des Etudes Technique (Zorzan, 2016)

| Critères  | Prototype                                | Modèle                            |
|---|--|-----------------------------------|
| Débit total $Q_t$                               | $>2.5 \text{ m}^3/\text{s}$              | $>0.045 \text{ m}^3/\text{s}$     |
| Chute $\Delta H_e$ au droit du seuil à l'entrée | $< 20\text{...}25 \text{ cm}$            | $< 4\text{...}5 \text{ cm}$       |
| Débit dans la passe $Q_p$                       | $\sim 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$          | $\sim 0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Chute $\Delta H_b$ entre bassins                | $< 30 \text{ cm}$                        | $< 6 \text{ cm}$                  |
| Puissance dissipée $p$                          | $< 130 \text{ W}/\text{m}^3$             | $58 \text{ W}/\text{m}^3$         |
| Vitesse de pointe maximale $V_{max}$            | $< 1 \text{ m}/\text{s}$                 | $< 0.45 \text{ m}/\text{s}$       |
| Vitesse moyenne maximale $V_{moy}$              | $< 0.25\text{...}0.3 \text{ m}/\text{s}$ | $< 0.13 \text{ m}/\text{s}$       |

Baudouin et al. (2014) ont réalisé un travail en proposant des hauteurs de chute maximales permettant aux espèces ciblées de remonter l'obstacle. Pour les espèces de fonds comme la loche ou le chabot, la chute de hauteur d'eau entre deux bassins stipulée est de 15 cm mais peut monter jusqu'à 35 cm si on accepte de ne laisser passer statistiquement que 66% des loches les plus véloces. Il prescrit également une vitesse maximale inférieure à 0,7 m/s pour permettre à ces espèces de remonter la passe, ce qui est moins exigeant que les critères déterminés par la Direction des Etudes Techniques. Ces critères de dimensionnement suggéré par Baudouin et al pour les poissons à faible capacité natatoire sont les suivants :

Tableau 2.3 : Critères de dimensionnement suggérés par Baudouin et al (2015)

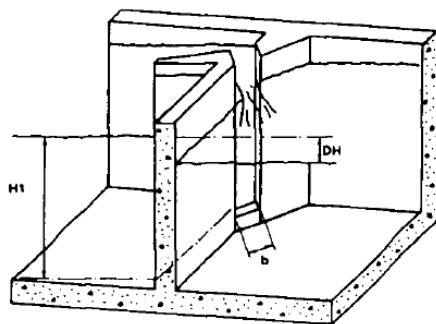
| Critères             | Prototype         | Modèle           |
|----------------------|-------------------|------------------|
| Niveau d'eau         | $>10 \text{ cm}$  | $>2 \text{ cm}$  |
| Hauteur de seuil     | $< 20 \text{ cm}$ | $< 4 \text{ cm}$ |
| Longueur du bassin   | $>1.25 \text{ m}$ | $>25 \text{ cm}$ |
| Profondeur du bassin | $>50 \text{ cm}$  | $>10 \text{ cm}$ |

A l'aide de ces critères, les dimensions suivantes ont été choisies pour construire la passe :

Tableau 2.4: Dimensions des éléments constituant la passe à poissons de Rivières (Zorzan, 2016)

| Critères              | Prototype | Modèle |
|-----------------------|-----------|--------|
| Longueur totale       | 50 m      | 10 m   |
| Longueur d'un bassin  | 5 m       | 1 m    |
| Largueur d'un bassin  | 3 m       | 0,6 m  |
| Hauteur d'eau moyenne | 1 m       | 0,2 m  |
| Chute entre bassins   | 30 cm     | 6 cm   |
| Hauteur du seuil      | 10 cm     | 2 cm   |
| Largueur échancrure   | 30 cm     | 6 cm   |

Afin de vérifier si les différentes dimensions sont cohérentes avec les débits prescrits, la formule suivante est utilisée :



$$Q = C_d \times b \times H_1 \times \sqrt{2gDH}$$

Figure 2.4: Expression du débit passant dans une passe à échancrures (Larinier, 1992)

Un débit de  $0,0083 \text{ m}^3/\text{s}$  est trouvé à l'aide de la formule. D'après les études réalisées par la Direction des études techniques et plus particulièrement par Zorzan en 2016, le débit à utiliser est de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la passe à poissons de Rivière. En appliquant la loi de similitude, le débit dans le modèle réduit est de  $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ce qui confirme donc que les géométries proposées sont cohérentes.

La rugosité des parois et du fond de la passe a été négligée étant donné que l'état de surface est très correct et présente peu d'aspérités. Le liquide qui a été considéré est bien entendu de l'eau.

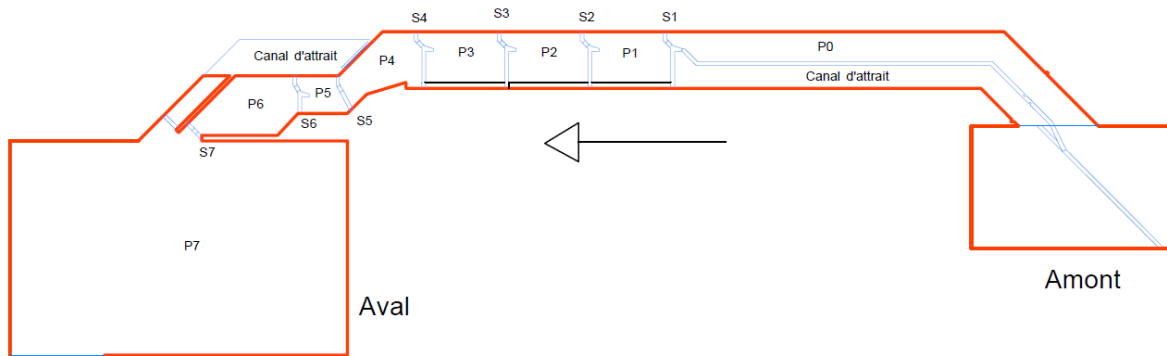


Figure 2.5: Dénomination des bassins et des seuils du modèle réduit

La géométrie du bassin est la suivante. Trois bassins sont des bassins standards, qui sont souvent utilisés sur diverses passes à poisson et trois autres bassins sont propres à cette passe pour pouvoir correspondre aux critères de dimensions.

Les bassins ont été nommés d'après le mot anglais 'pool' pour P et sont numérotés de l'amont vers l'aval. Ainsi, le bassin amont est P0 et le bassin aval est P7. Les seuils sont nommés avec la lettre S et sont numérotés de la même façon, avec S1 le premier seuil en partant de l'amont.

Le canal d'attrait passe sous la passe à poissons, il permet d'amener un débit suffisant dans le bassin aval (P7) pour attirer le poisson. En effet, pour que les individus trouvent l'entrée de la passe, il faut qu'un débit suffisant soit appliqué. Le débit présent dans la passe en elle-même ne l'est pas. Ainsi, un canal auxiliaire amenant entre 3 et 4 fois plus de débit est installé.

## 2.5 Modélisation numérique de l'écoulement

### 2.5.1 Modélisation TELEMAC

Dans les travaux réalisés précédemment sur le modèle réduit, un mémoire a été rédigé par Adeline Baugnée et Jean-Christophe de Greef concernant la modélisation numérique de l'écoulement d'une échelle à poissons. Quelques résultats intéressants sont ici présentés afin de comprendre l'écoulement présent dans un bassin et donc mieux visualiser l'environnement dans lequel les poissons évoluent. La modélisation numérique a été réalisée avec le logiciel TELEMAC<sup>®</sup> qui est un logiciel résolvant des équations aux éléments finis. Ensuite, des mesures de vitesses ont eu lieu pour comparer le modèle numérique avec la réalité. Cette modélisation numérique a été réalisée sur le prototype réel et les vitesses équivalentes sur le modèle réduit ont été adaptées grâce aux lois de similitude (Section 2.3).

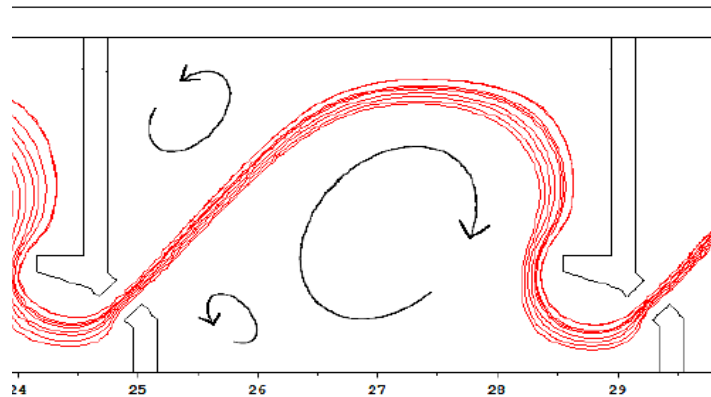


Figure 2.6: Représentation du courant principal et de zones de recirculation (Bagnée et De Greef, 2014)

En premier lieu, une représentation des lignes de courants principales ainsi que des zones de recirculations sont représentées sur la figure suivante. On observe un flux assez bien défini qui traverse le bassin jusqu'au mur opposé à l'échancrure en amont et puis revient vers l'échancrure en aval. Le flux crée également des recirculations qui vont engendrer des zones où l'eau tourbillonne et où la vitesse décroît rapidement.

Ensuite, viennent les champs de vitesse de l'eau dans un bassin :

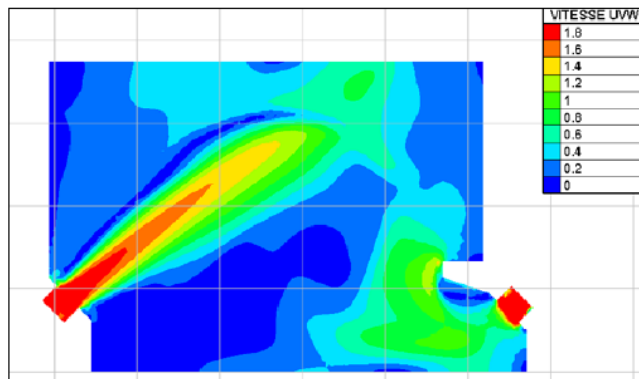


Figure 2.7: Modélisation numérique de l'écoulement à la surface libre dans un bassin standard du prototype de la passe à poissons du barrage de Rivière. Vitesses exprimées en m/s. (Bagnée et De Greef, 2014)

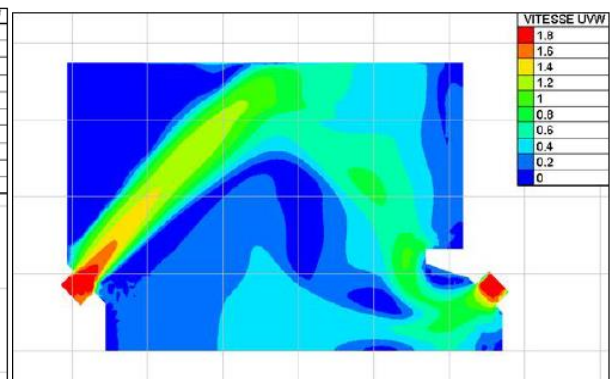


Figure 2.8: Modélisation numérique de l'écoulement au fond d'un bassin standard du prototype de la passe à poissons du barrage de Rivière. Vitesses exprimées en m/s. (Bagnée et De Greef, 2014)

On remarque clairement qu'il y a un flux principal qui est représenté par les couleurs rouge-orange et que les zones de recirculations sont des zones où les vitesses n'excèdent pas 0,6m/s. Dans le fond de la passe, les vitesses sont comparativement plus petites mais le profil de répartition de vitesse est assez similaire. Les zones à faible vitesse sont plus grandes et donc impliquent plus de zones de repos par rapport à la surface. La passe favorise la présence des espèces à faible capacité natatoire dans le fond de la passe.

Les vitesses mesurées par Bagnée et De Greef sur le modèle réduit ont montré que les vitesses maximales de surface se trouvaient entre 0,5 et 0,6 m/s. Elles sont donc inférieures aux valeurs

calculées numériquement qui se situaient entre 0,89 et 1,34 m/s. La modélisation numérique tend à surestimer les vitesses dans le bassin et cela a son importance quand on travaille avec des espèces à faible vitesse de pointe. Pour respecter les critères de dimensionnement d'un bassin, la vitesse maximale doit être inférieure à 0,45 m/s, ce qui semble être légèrement dépassé pour le modèle réduit. Ces champs de vitesse sont présentés dans le tableau suivant :

Figure 2.9: Champs de vitesse obtenus lors de la modélisation numérique de l'écoulement dans un bassin standard du prototype de la passe à poissons du barrage de Rivière (Bagnée et De Greef, 2014)

|                                    | Vitesse prototype<br>[m/s] | Vitesse modèle<br>[m/s] |
|------------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Vitesse maximale surface           | 2 à 3                      | 0,89 à 1,34             |
| Vitesse maximale fond              | 1,5                        | 0,67                    |
| Vitesse maximale mesurée surface   | -                          | 0,5 à 0,6               |
| Vitesse zone de repos dans le fond | 0,2                        | 0,089                   |

### 2.5.2 Modélisation SolidWorks

Cette modélisation a été réalisée par les auteurs de ce travail afin d'accroître la connaissance des champs de vitesse en fonction des substrats. En effet, la forme et la répartition des plots vont avoir un impact sur l'écoulement local dans le fond de la passe. Pour connaître ces différentes vitesses. La simulation numérique de l'écoulement a été réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks FlowSimulation ®. Ce logiciel a été développé par Dassault Systemes en 2014. Il est présenté comme un logiciel d'analyse dynamique des fluides CFD (Computational Fluid dynamics). Dans cette section, le fonctionnement général du logiciel est présenté.

#### Equations utilisées

Pour créer un modèle physique et simuler la réalité, le logiciel va s'appuyer sur les équations de Navier-Stokes qui sont les lois de conservation de la masse, du moment et de l'énergie. Les équations sont reprises ci-dessous :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\tau_{ij}^R}{\partial x_j} + \rho \epsilon + S_i u_i + Q_H$$

$$\text{avec } H = h + \frac{u^2}{2}$$

Le logiciel de SolidWorks calcule l'écoulement en déterminant s'il est turbulent ou laminaire. Dans le cas des passes à poissons, l'écoulement est turbulent sur toute la passe. Il est donc possible de cocher l'option « uniquement turbulente » pour accélérer le calcul. Il n'y a pas de différence d'observation de champs de vitesse entre le calcul ou bien la spécification de l'écoulement.

### Maillage

Le logiciel utilise deux types de maillage pour réaliser les calculs, d'abord un maillage grossier qui est le choix par défaut sur le modèle. Il est composé de mailles de 3-4 cm de côté et permet d'avoir un temps de calcul raisonnable. Pour les zones frontières du modèle, un maillage plus fin est utilisé. Cela permet d'avoir une plus grande précision aux endroits où la géométrie est plus complexe. Dès qu'une maille globale est coupée par une frontière du modèle, elle est divisée en 4 pour former de plus petites mailles.

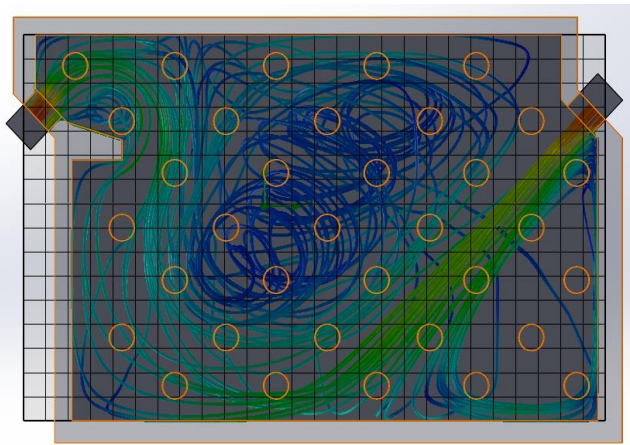


Figure 2.10: Maillage grossier utilisé par défaut pour la modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks (SolidWorks FlowSimulation)

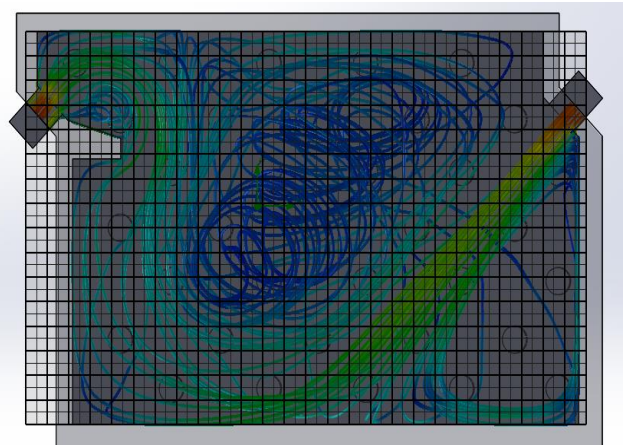


Figure 2.11: Maillage affiné pour les géométries plus complexes pour la modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks (SolidWorks FlowSimulation)

L'avantage d'utiliser ce type de logiciel est qu'il permet de calculer un écoulement en éléments finis tout en gardant une grande maniabilité de la géométrie du modèle. La simulation peut être faite pour chaque substrat et une analyse de la vitesse du courant pourra être réalisée. Dans le cadre de ce travail, l'intérêt premier sera de d'avoir un plan du bassin à 1 cm du fond avec en chaque point la vitesse de l'écoulement. Ce plan pourra être mis en relation avec les zones de repartitions des poissons. Etant donné que les poissons benthiques restent la plupart du temps collés au fond du bassin, ce sont les distributions de vitesse à 1 cm du fond qui sont représentatives de ce que peuvent endurer les espèces benthiques.

La modélisation permet de représenter quelques lignes de courant dans la passe :

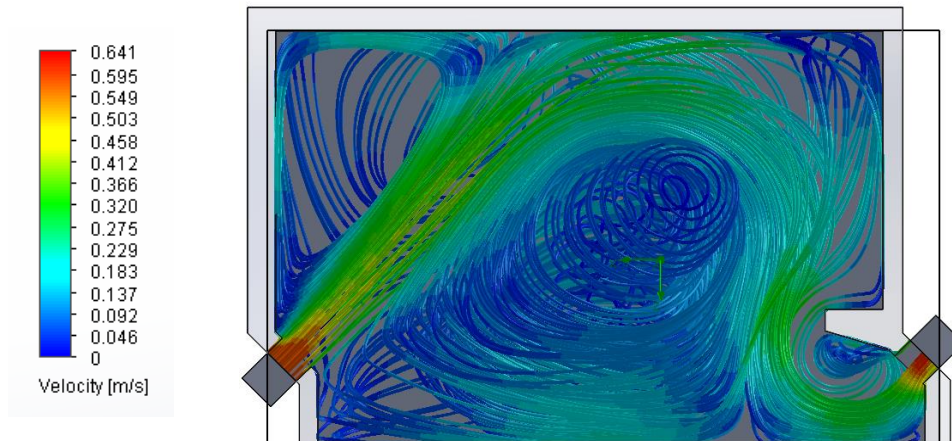


Figure 2.12: Représentation de quelques lignes de courant vu du dessus de la modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks

On remarque que la forme du flux principal est très proche de la modélisation réalisée avec TELEMAC. Du point de vue des valeurs des vitesses, une similitude peut également être faite. Concernant la valeur de départ, une vitesse de 0,67 avait été trouvée par le logiciel TELEMAC et pour le logiciel SOLIDWORK, une vitesse de 0,641 est observée. Les zones de recirculations sont facilement visibles sur cette image, la perte de vitesse dès qu'on y entre est bien représentée par les couleurs bleues.

Les différents résultats sont présentés dans la section 5-Optimisation car chaque champ de vitesse est spécifique au type de substrat utilisé.

Les paramètres fixés lors de la description du modèle sont présents en Annexe B.



# Chapitre 3

---

## Matériel

---

### 3.1 Description du matériel vivant

#### 3.1.1 Loche

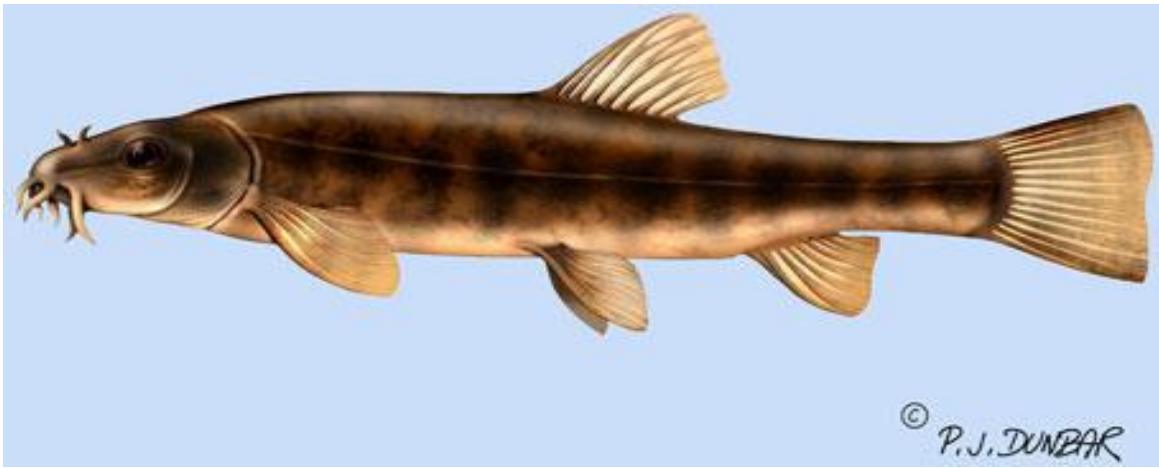


Figure 3.1: Loche franche (ref : Dunbar)

Tableau 3.1: Caractéristiques principales de la loche franche

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| Nom                                 | Loche franche  |
| Ordre                               | Cypriniformes  |
| Famille                             | Nemacheilidae  |
| Nom scientifique                    | Barbatula barbatula  |
| Habitat                             | Etang, rivière calme, bras de rivière mort                                   |
| Comportement                        | Se cache dans les substrats au fond de la masse d'eau, surtout actif la nuit |
| Régime alimentaire                  | Vers, larve, plancton  |
| Statut                              | Préoccupation mineure  |
| Durée de vie                        | 7 ans (10 maximum)   |
| Taille courante                     | 15 cm  |
| Distribution géographique           | Toute l'Europe   |
| Présence dans les passes à poissons | Oui mais peu   |
| Vessie natatoire                    | Oui  |

Appelée en latin *Barbatula barbatula*, la loche franche tient son nom des barbillons qu'elle a près de la bouche. Barba signifie barbe en latin et donc le nom est resté (Romero, P., 2002).

La loche franche est présente dans toute l'Europe, du sud de la France à la Russie. C'est un poisson très présent en Europe occidentale et donc aussi dans la Meuse. C'est un poisson d'eau douce qui vit dans des eaux avec un PH situé entre 7 et 7.7.

La taille maximale d'une loche adulte est de 21 cm (Berg, L.S., 1964) mais dans la Meuse, la taille adulte tournera plutôt autour de 12-15 cm (Claude Delbeuck ; Baudouin et al, 2014).

La loche se trouve habituellement dans des cours d'eau calmes ou des bras de rivières avec peu de courant et affectionne les fonds marins sablonneux ou graveleux. On peut également les retrouver dans des lacs ou des canaux. La loche est un poisson benthique (Baudouin et al, 2014 ; Vinyoles et al, 2010), c'est-à-dire qu'il vit le plus souvent dans le fond de la masse d'eau qu'il occupe, éloignée de la surface. La loche aime se camoufler dans la vase, sous des pierres et préfère se déplacer la nuit. C'est un poisson social qui aime rester en groupe. Outre le fait de chercher de la nourriture dans les fonds marins, leurs barbillons leur permettent de se toucher entre eux.

Leur régime alimentaire consiste en de petits invertébrés tels que les larves d'insectes ou des petits organismes marins. Ils se nourrissent également de vers.

La loche est une espèce très résistante (Rollin X., comm perso, 2018) et une des espèces qui refait le plus vite son apparition dans un cours d'eau réaménagé. Lors du chômage de la Meuse, les loches se réimplantent très vite et ne sont pas trop impactées par la détérioration de la qualité d'eau. Une autre spécification de la loche est sa faculté à pouvoir survivre à des épisodes de sécheresse. En effet, lorsque le niveau du cours d'eau diminue, la loche se camoufle dans la vase encore mouillée et peut survivre pendant quelques jours comme cela.

La loche peut frayer plusieurs fois par an quand les conditions sont optimales mais la plupart du temps, la femelle pond des œufs visqueux dans l'eau courante et ceux-ci vont s'attacher à des substrats lors de la dévalaison. La loche peut commencer à se reproduire à partir de 3 ans et peut vivre une dizaine d'années. La période correspondant à la ponte des loches commence à la fin mars et s'achève vers la mi-mai. (Baudouin et al, 2014).

La loche n'est pas menacée actuellement (CITES, UNEP-WCMC, 2017) et ne présente pas un danger pour l'homme. La loche est très peu pêchée car elle ne représente pas une grande valeur d'un point de vue économique mais peut servir d'appât pour d'autres poissons.

Il a été observé que la respiration branchiale des loches ne leur permet pas de nager et que le canal intestinal leur sert de second organe respiratoire (Lunel G.). Les loches partent à la surface et avalent de l'air qui leur permettra d'assurer leur nage.

La littérature n'est pas très précise concernant la présence de vessie natatoire sur les loches franches mais elle existe bel et bien dans la famille des Cobitidés d'où vient la loche donc il est assez logique de trouver cette vessie natatoire sur la loche. Pour rappel, cet organe va permettre au poisson de

mieux gérer sa hauteur dans la masse d'eau et donc d'économiser ses muscles pour rester à la hauteur voulue (Lunel G.). La loche est un poisson physostome, c'est-à-dire que leur vessie natatoire est reliée à leur œsophage par un conduit.

#### Capacité de nage

D'un point de vue morphologique la loche est adaptée à la nage, son corps fin (1/8 de la longueur totale) et élancé lui confère une bonne pénétration dans l'eau (Lunel G.).

Cependant, la capacité natatoire des loches n'est pas très bonne (Tudorache C., 2008), en comparaison avec d'autres espèces comparables (carpes, tanches), à des tailles semblables, la vitesse de la loche franche est la plus faible. Baudouin et al. classent la loche dans la catégorie 9b, soit avec les mauvais nageurs.

Tudorache a réalisé des tests de nage sur des loches avec une taille comprise entre 6,7 et 7,7 cm. Le principe du test est de placer un poisson dans un tunnel de nage et d'accentuer la vitesse du courant pour déterminer les différentes valeurs caractéristiques. Les données sont les suivantes pour la loche :

Tableau 3.2 : Résumé des vitesses caractéristiques des loches franches selon Tudorache

| Taille [cm] | Vitesse de croisière [m/s] | Vitesse soutenue [m/s] | Vitesse max (10°C) [m/s] | Vitesse max (15°C) [m/s] | Vitesse max (20°C) [m/s] | Vitesse max eau [m/s] |
|-------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 7,2         | 0,185                      | 0,252                  | 1,08                     | 0,83                     | 0,72                     | 0,62                  |

Les formules de Kapotodis et Gervais mentionnées dans la section 'similitude' (section 2.3) indiquent pour des poissons de 7,2cm une vitesse maximale de 1,077m/s et une vitesse de croisière de 0,317m/s. La corrélation est excellente pour ce qui est de la vitesse maximale à 10°C ( $t^\circ$  au sein du modèle réduit) mais est nettement moins bonne pour la vitesse de croisière.

Les lois de similitude conseillent d'une taille de 25 à 30% de la taille adulte pour les expérimentations. La taille adulte des loches pouvant atteindre 15 cm, les poissons testés sur le modèle réduit à Châtelet ont des tailles légèrement supérieures à ce qui est conseillé. En effet, la taille moyenne des loches testées tourne autour de 6 cm.

En appliquant la loi d'échelle pour les vitesses maximales et de croisière on obtient une bonne estimation des capacités de nage des loches de 6 cm, celles-ci sont décrites dans le tableau suivant :

Tableau 3.3: Adaptation des vitesses caractéristiques à des loches de 6cm de long

| Taille [cm] | Vitesse de croisière [m/s] | Vitesse soutenue [m/s] | Vitesse max (10°C) [m/s] | Vitesse max (15°C) [m/s] | Vitesse max (20°C) [m/s] | Vitesse max eau [m/s] |
|-------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 6,00        | 0,157                      | -                      | 0,94                     | 0,72                     | 0,63                     | 0,54                  |

Selon les mesures réalisées sur les vitesses d'écoulement dans la passe (Baugnée et De Greef, 2014), le courant dans le modèle réduit a une vitesse maximale située entre 0,5 et 0,6 m/s, ce qui correspond à la vitesse maximale qu'une loche de 6cm peut atteindre. En théorie, la loche de 6cm a donc des capacités physiques suffisantes pour remonter le modèle réduit.

Certaines études sur le Rhône ont estimé la vitesse maximale d'une loche entre 1,1 et 1,6 m/s (Baudouin et al, 2014 ; Gomes et al, 2005) mais cela a été déterminé sur un groupe de poissons dont faisait partie la loche, donc avec des espèces possédant des capacités natatoires accrues. En appliquant le principe de similitude, la vitesse maximale de la loche de 6cm avoisine 0,94 m/s, ce qui reste dans le même ordre de grandeur que les valeurs obtenues par Baudouin et al.

Il faut noter que la vitesse optimale de nage dépend de la taille du poisson. En effet, un poisson plus petit va avoir une vitesse optimale plus faible qu'un poisson plus grand. En plus de cela, les petits poissons vont utiliser un plus grand pourcentage de leur champ d'activité physique, c'est-à-dire une plus grande proportion musculaire. Ainsi les petits poissons vont avoir un double désavantage par rapport aux plus gros poissons. (Tudorache, 2008).

Il a également été observé par Tudorache que la capacité d'absorption d'oxygène chez la loche est relativement faible en comparaison avec les autres espèces. Leur champ d'activité physique est également assez faible ( $16,5 \mu\text{mol.g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) et cela peut mener à la conclusion que l'effort permettant la nage n'est pas uniquement anaérobie. Cela peut expliquer le fait que la loche reste souvent dans le fond des bassins, là où il n'est pas nécessaire de nager pour maintenir sa position. L'environnement de la passe à poissons n'est donc pas très avantageux pour cette espèce car même avec de faibles vitesses, le fond lisse du seuil ne leur permet pas de rester immobiles sans entreprendre une nage.

La loche peut avoir une vitesse suffisante pour franchir l'échancrure mais ne saura pas remonter la passe en une seule fois. Sa vitesse de pointe étant principalement aérobie, la loche devra se reposer entre chaque échancrure pour pouvoir poursuivre sa montaison.

### Migration

La loche franche est listée comme espèce migratrice (Lucas M et al, 2008) et a déjà été observée dans des passes à poissons en Wallonie (Ovidio et al, 2005). Il a été observé que ces poissons migraient pendant le printemps et que des femelles avaient leurs gonades gonflées ce qui laisse suggérer une période de fraie imminente. (Lucas M. et al, 2008). Cela est donc une des causes de la migration. Des distances de quelques centaines de mètres sont parcourues par les loches mais dépassent rarement le kilomètre. (Lelek, 1987). Dans le rapport de convention sur la réhabilitation du saumon dans la Meuse réalisé par le SPW, il a été enregistré à Tailfer 3 loches en 2010 et 1 en 2015. (Ovidio et al, 2015)

## 3.1.2 Chabot



Figure 3.2: Chabot (ref : Plongée poisson)

Tableau 3.4: Caractéristiques principales du chabot

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| Nom                                 | Chabot commun  |
| Nom latin                           | Cottus gobio   |
| Ordre                               | Scorpaeniformes  |
| Famille                             | Cottidae   |
| Habitat                             | Substrats dans rivière                                   |
| Comportement                        | Se cache dans les pierres des rivières et chasse la nuit |
| Régime alimentaire                  | Vers, larve, œufs de truite                              |
| Statut                              | Préoccupation mineure                                    |
| Durée de vie                        | 3 à 5 ans (10 maximum)                                   |
| Taille courante                     | 15 cm  |
| Distribution géographique           | Toute l'Europe   |
| Présence dans les passes à poissons | Oui mais peu   |
| Vessie natatoire                    | Non  |

Le chabot, ou *Cottus gobio* en latin, est un poisson de fond présent dans de nombreuses rivières en Europe. Le chabot vit en eau douce partout en Europe sauf dans le sud (Espagne, Italie, Portugal, Balkans, Corse)

Le chabot est un poisson atypique, l'avant de son corps est assez volumineux et lui confère une forme triangulaire qui paraît démesuré par rapport au reste de son corps. Il est pourvu de deux nageoires dorsales basses en épine. Ces nageoires accentuent l'apparence d'un poisson large et peu adapté à la nage à grande vitesse. Il possède des yeux rapprochés situés sur le haut de sa tête. Les chabots peuvent atteindre 15cm et 18cm pour les mâles. Sa pigmentation jaune-brune permet de se camoufler efficacement dans le fond des rivières. De plus, les chabots ont la possibilité de faire varier la luminosité de leurs écailles et donc de s'adapter à leur environnement.

Son habitat se situe dans les rivières avec peu de courant et des substrats de fonds tel que des pierres pour s'y cacher. Le chabot ne possède pas de vessie natatoire et ne se déplace que très peu dans la rivière. La présence de nombreuses cachettes et une bonne qualité d'eau est nécessaire à la présence de l'espèce (Maison de la pêche, non publié).

Cette espèce chasse la nuit et se nourrit de vers, de larves d'insectes, d'œufs de poisson, ... C'est un animal très vorace qui peut arriver à manger ses propres œufs pour survivre. (Linnaeus, 1748). Il se nourrit en aspirant les petits animaux qui passent près de sa bouche.

Le chabot est une espèce plutôt solitaire, cela est un aspect absolument primordial lors des tests réalisés dans une passe à poissons. Les loches ont tendance à se regrouper et à vivre les uns avec les autres tandis que les chabots auront tendance à s'éparpiller et donc à vouloir occuper plus largement la passe. Cette façon de vivre est à prendre en compte lors de l'analyse des résultats car la motivation des poissons est un élément crucial.

Le statut du chabot est assez clair car il est d'une préoccupation mineure. En France, l'espèce n'est pas située sur une liste rouge mais en Allemagne et Autriche, son statut est surveillé et la préoccupation est plus grande.

Le chabot ne présente pas beaucoup d'intérêt pour l'homme. Il n'est pas pêché mais sert occasionnellement de leurre pour la pêche de plus gros poissons. (Froese et Pauly, 2016). Il ne représente pas de danger pour l'homme (Baker et al., 2015)

La présence de chabot dans une rivière est synonyme d'une qualité d'eau élevée (INPN, Linnaeus, 1748) car c'est une espèce très sensible à la pollution.

La période de reproduction du chabot se situe en février-mars-avril (Baudouin et al, 2014, Linnaeus, 1748) pour l'Europe centrale. Pour la reproduction, le mâle creuse dans le substrat pour y aménager un espace sécurisé pour recevoir les œufs. La femelle y pond une centaine d'œufs rose-jaune collants et sont gardés par le mâle jusqu'à l'éclosion de la portée.

### Capacité de nage

Espèce de classe 9b (Baudouin et al, 2014), comme la loche et donc considérée comme mauvais nageur.

Comme expliqué précédemment, le chabot n'a pas la physiologie d'un poisson bon nageur. Son corps large constitue un frein à sa pénétration dans l'eau. Des études ont été réalisées (Tudorache et al, 2008) sur cette espèce.

Tableau 3.5: Résumé des vitesses caractéristiques des chabots selon Tudorache

| Taille<br>[cm] | Vitesse de<br>croisière<br>[m/s] | Vitesse<br>soutenue<br>[m/s] | Vitesse max<br>(10°C) [m/s] | Vitesse max<br>(15°C) [m/s] | Vitesse max<br>(20°C) [m/s] | Vitesse<br>max eau<br>[m/s] |
|----------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 7,4±0,9        | -                                | -                            | 1,12                        | 0,9                         | 0,83                        | 0,61                        |

Cette espèce possède une faible capacité de nage, comparable aux loches mais profite de la rugosité du fond pour se déplacer sans trop d'effort. Elle aime les eaux froides ou fraîches (Linnaeus, 1748) et cela se voit grâce à une certaine corrélation entre les vitesses maximales dans des températures de 10°C qui sont plus élevées que les vitesses à 20°C.

Les formules de Kapotodis et Gervais mentionnées dans la section 'similitude' (section 2.3) indiquent pour des poissons de 7,4cm une vitesse maximale de 1,097m/s. La corrélation entre le modèle de Kapotodis et Gervais et les mesures réelles à 10°C est excellente pour ce qui est de la vitesse maximale.

Les chabots expérimentés sont de taille fortement variable et ont par conséquent des capacités de nage très différentes. La moyenne du lot est d'approximativement 8cm, les vitesses déterminées expérimentalement donnent une estimation quantitative des capacités de nage des chabots moyens expérimentés. La vitesse maximale du modèle a été mesurée et ne dépasse pas 0,6m/s. Les chabots de 7,4cm ou plus sont théoriquement capables de franchir les échancrures.

### Migration

Cette espèce a été beaucoup étudiée ces dernières années à propos de sa mobilité. Pendant longtemps, il a été cru que le chabot était extrêmement sédentaire mais grâce aux nouvelles techniques de traçage, il a été montré que les chabots s'établissent sur un territoire pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. (Ovidio et al., 2009, Knaepkens et al, 2004).

Des chabots ont déjà été observés dans des passes à poisson dans le sud de la Belgique (Ovidio et al., 2005,2007). Parmi les recensements effectués dans la passe à poissons de Tailfer, un chabot a été recensé en 2010 et 5 en 2011.

## 3.1.3 Hotu

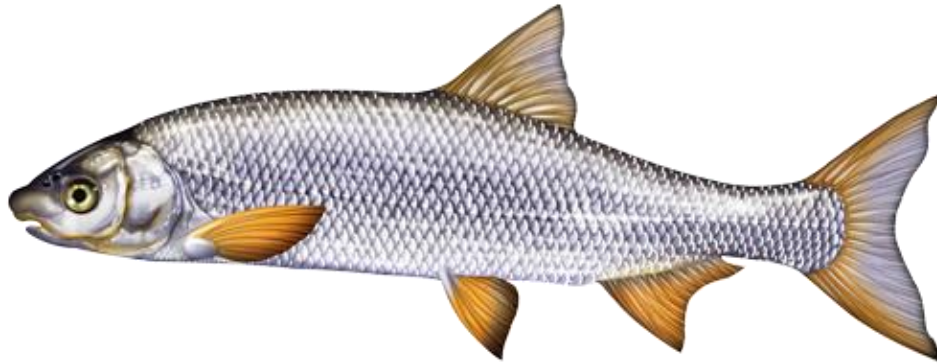


Figure 3.3: Hotu (ref : école de pêche)

Tableau 3.6: Caractéristiques principales du hotu

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Nom                                 | Hotu  |
| Nom latin                           | Chondrostoma nasus  |
| Ordre                               | Cypriniformes   |
| Famille                             | Cyprinidae  |
| Habitat                             | Dans le courant d'une rivière                                   |
| Comportement                        | Nage dans le courant de la rivière                              |
| Régime alimentaire                  | Adulte : algues et détritiques<br>Juvénile : petits invertébrés |
| Statut                              | Préoccupation mineure, surveillé                                |
| Durée de vie                        | Maximum 15 ans  |
| Taille courante                     | 25-50 cm  |
| Distribution géographique           | Europe centrale   |
| Présence dans les passes à poissons | Oui   |
| Vessie natatoire                    | ?   |

Le hotu est présent partout en Europe centrale, jusqu'au Rhin, il affectionne les rivières d'eau courante à fond caillouteux. C'est un poisson rhéophile, c'est-à-dire qu'il apprécie le courant. Cela le différencie des autres espèces jusqu'ici présentées. Il aime particulièrement les endroits où la vitesse du courant se situe entre 0.5 et 1m/s avec des sédiments grossiers dans le fond.

Il a une taille de 25cm en moyenne à l'âge adulte mais elle peut aller jusqu'à 50cm chez les plus grands spécimens. Il peut vivre jusqu'à 15 ans. Comme son nom latin l'indique (*nasus* signifie nez), le hotu a un museau proéminent et une bouche en position inférieure. Son corps est fin et adapté à la pénétration dans l'eau. Il dispose de nageoires de couleur rouge-orange, excepté pour la dorsale qui est grise. Le poisson est argenté sur le côté. C'est un poisson grégaire, c'est-à-dire qu'il vit en groupe.

Le hotu adulte est un poisson se nourrissant de proies très petites, il se nourrit d'algues (diatomées) ou de détritiques (Corolla et al, 2014) présents sur les substrats de fond. Les hotus juvéniles sont plus polyvalents et se nourrissent de petits invertébrés également.

La période de reproduction se passe entre mars et avril et peut entraîner des mouvements d'un grand nombre d'individus. Une fois que l'endroit a été choisi, la femelle pond ses œufs dans le fond de la rivière, dans l'eau courante. Les juvéniles n'hésitent pas à former des groupes avec d'autres espèces. Pratique qui disparaît lorsqu'ils atteignent l'âge adulte. (Corolla et al, 2014)

L'espèce n'est pas menacée mais possède un statut différent en fonction des pays. En France, il est inscrit en tant que préoccupation mineure tandis qu'en Belgique, il est considéré comme étant une espèce partiellement protégée. Elle est en effet inscrite dans l'annexe 3 de la convention de Berne (1979) qui stipule qu'une réglementation est mise en œuvre pour maintenir l'espèce hors de danger. Le hotu n'est que très rarement pêché car son corps est pourvu de nombreuses arêtes. Sa tendance à se faire de plus en plus rare serait dû à l'eutrophication de son habitat à cause de la canalisation des rivières et de la présence de barrages. (Maison de la pêche, non publié)

### **Capacité de nage**

Le hotu fait partie du groupe 7a (Baudouin et al, 2014), soit les cyprinidés rhéophiles qui ont une taille assez conséquente. Leur vitesse maximale de nage se situe entre 2.5 et 4m/s. Ce qui en fait un bon nageur. Il n'est pas capable de réaliser de saut mais sait passer de petits obstacles tels que des barrages naturels en rochers. (Capra et al, non publié)

### **Migration**

Cette espèce a un réel besoin de migration et se déplacent sur plusieurs kilomètres, voir sur plusieurs dizaines de kilomètres (Ovidio et al., 2007, Baras, 1992). Pour cette raison, les hotus sont souvent repérés dans les passes à poissons (Ovidio et al, 2007). L'inventaire des captures à l'échelle à poissons de Tailfer est repris ci-dessous pour les hotus :

*Tableau 3.7: Inventaire des hotus observés dans la passe à poissons de Tailfer (Ovidio, 2007)*

| <i>1989</i> | <i>1990</i> | <i>1991</i> | <i>1992</i> | <i>1994</i> | <i>2010</i> | <i>2011</i> | <i>2013</i> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>141</i>  | <i>567</i>  | <i>774</i>  | <i>689</i>  | <i>102</i>  | <i>27</i>   | <i>21</i>   | <i>1</i>    |

Les hotus sont bien présents dans les passes et ne semblent pas avoir du mal à remonter le courant. Dans le cas de l'analyse de substrat de fond, cette espèce servira de référence pour les poissons nageant dans la colonne d'eau. Le but de l'optimisation du substrat étant d'améliorer la franchissabilité de la passe pour les espèces mauvaises nageuses mais cela ne doit pas porter préjudice aux espèces empruntant déjà la passe efficacement.

## 3.1.4 Civelle/Anguille



Figure 3.4: Civelles (ADERA-CERACA)

Tableau 3.8: Caractéristiques principales de l'anguille

|  |   |
|--|---|
| <b>Nom</b>                                 | Civelle/Anguille  |
| <b>Ordre</b>                               | Anguilliformes  |
| <b>Famille</b>                             | Anguillidae   |
| <b>Nom scientifique</b>                    | Anguilla anguilla   |
| <b>Habitat</b>                             | Substrats dans rivière  |
| <b>Comportement</b>                        | Chasse principalement la nuit et se cache entre les substrats |
| <b>Régime alimentaire</b>                  | Vase, larves d'insectes, petits crustacés, petits poissons    |
| <b>Statut</b>                              | En danger critique d'extinction                               |
| <b>Durée de vie</b>                        | 10-15 ans mais certaines vivent plus de 100 ans               |
| <b>Taille courante</b>                     | 50 cm pour les mâles et 2m pour les femelles                  |
| <b>Distribution géographique</b>           | Europe, dans les cours d'eau atteignables par la mer          |
| <b>Présence dans les passes à poissons</b> | Oui   |
| <b>Vessie natatoire</b>                    | Oui   |

La civelle de l'anguille européenne est une espèce très particulière. On la trouve à peu près partout en Europe et elle vit dans les mares, les cours d'eau accessibles depuis la mer. C'est l'alevin (poisson juvénile) de l'anguille d'Europe qui est le type d'anguille que l'on retrouve dans les rivières d'Europe. Ce poisson est distinctif par son corps allongé, cylindrique sur l'avant et plat du côté de la queue. Le mot anguille vient du latin *anguis* qui signifie serpent, animal qui lui ressemble fortement. (Le Gurun, 2013). L'anguille est pourvue d'une multitude de petites écailles et d'un mucus la rendent insaisissable.

Elle se nourrit de vase, de larves d'insectes, de petits crustacés et de petits poissons (S. Collin, 2010). C'est une espèce benthique, elle vit donc dans le fond des cours d'eau et se cache sous des pierres ou entre des substrats de fond. L'anguille se nourrit souvent la nuit.

L'anguille est inscrite en temps qu'espèce en danger critique d'extinction. Le fait de s'intéresser à cette espèce pour la franchissabilité des passes à poissons est primordial. Dans les années 80-90, la population d'anguilles dans l'Europe occidentale a terriblement chuté. D'une part à cause de la qualité médiocre de l'eau (Baisez, 2001) et d'autre part à cause de la prolifération d'aménagements hydroélectriques qui bloquent ainsi le déplacement des civelles. (Lafaille et al, 2004, S. Collin, 2010)

La température de l'eau joue un rôle important chez les anguilles, en dessous de 10°C elles ont tendance à s'immobiliser et aucune migration n'est entreprise. Passé les 12-13°C, les anguilles recommencent à bouger et une migration peut reprendre son cours.

La reproduction des anguilles se fait entre mars et juillet en mer des Sargasses (S. Collin, 2010) et chaque kg de femelle pond en moyenne 1 million d'œufs. (Boetius et al, 1980)

### **Capacité de nage**

Selon la classification de Baudouin et al, l'anguille se classe dans la catégorie 11. C'est une catégorie bien spécifique car l'anguille est la seule espèce présente. L'anguille est une bien plus mauvaise nageuse que sa taille pourrait le laisser penser. Ce groupe est subdivisé en deux sous-groupes dépendant de la taille. Pour les individus plus grands que 12cm de longueur (11a), la vitesse de pointe peut atteindre 1.5 m/s mais pour le deuxième sous-groupe (11b), qui comprend les individus plus petits que 12cm, la vitesse maximale sera de 0.5 m/s. Une autre valeur disponible dans la littérature pour la vitesse maximale d'une anguille subadulte est de 1.14 m/s (Blaxter et Dickson, 1959). La nage des anguilles et des civelles est particulière. Les anguilles ondulent tout leur corps, cela s'appelle la nage sinusoidale et consomme entre 20 et 30% d'énergie en plus que la nage droite. Parmi toute les nages ondulatoires, c'est la nage de l'anguille, la nage anguilliforme qui déforme le plus le corps (jusqu'à 80% du corps est déformé) et qui est la moins efficace. (Matar, 2013)

### **Migration**

Le cycle de vie de l'anguille est particulier. Ce sont des grandes migratrices, elles naissent pour la plupart dans la mer des Sargasses, dans les Caraïbes et traversent l'océan atlantique sous leur

forme juvénile. Une fois arrivées près des côtes européennes, elles remontent les cours d'eau pour grandir dans l'eau douce. Une fois arrivées à leur taille adulte, les anguilles dévalent le cours d'eau qu'elles ont remonté plusieurs années auparavant et retournent dans la mer des Sargasses pour y pondre leurs œufs. La présence d'obstacles dans les rivières est un frein à la montaison des anguilles. Bien qu'étant capables de franchir des petits barrages ou de grimper sur des petits murs, les civelles sont incapables de franchir de grands barrages et leur survie est compromise.

Pour les individus adultes, il est commun de voir des anguilles se déplacer sur l'herbe et contourner les obstacles. Cela est dû au fait qu'elles sont capables de respirer de l'air grâce à leur peau. Pour cela il faut que la berge soit accessible et qu'un mur de béton ne vienne cantonner les anguilles dans le bassin amont. Pour les petites anguilles (jusqu'à 12cm de long), la tension de surface qu'il y a entre leur corps et le sol leur permet de gravir de petits murets. Seuls les petits spécimens ont la possibilité de faire ça car une fois trop lourds, leur poids les fait tomber. En France, les rampes à anguilles ont des pentes comprises entre 5 et 45% (Porcher, 1992) et l'espacement des différents substrats se situe entre 7mm pour les civelles et 21mm pour les anguilles (Legault). Des brosses sont souvent utilisées pour optimiser la surface de contact avec les individus. Comme on peut le voir sur les dessins ci-dessous (Jens, 1982), les passes à poissons et civelles sont séparées car elles ne présentent pas les mêmes géométries ni les mêmes aménagements.

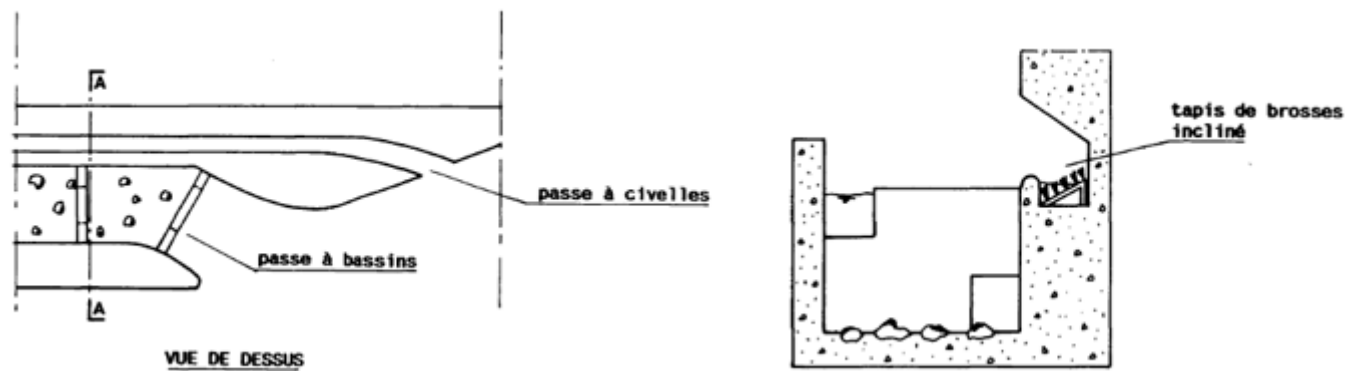


Figure 3.5: Représentation graphique de passe à anguilles (Larinier, 1992)

### 3.1.5 Classification

La classification des espèces expérimentées est synthétisée dans le tableau suivant :

Tableau 3.9: Classification ICE des espèces

| Groupe d'espèce ICE | Espèce           |
|---------------------|------------------|
| 7a                  | Hotu             |
| 9b                  | Chabot           |
| 9b                  | Loche franche    |
| 11                  | Anguille/Civelle |

Au plus le chiffre de l'indice ICE est grand, au plus le poisson a de faibles capacités natatoires.

### 3.1.6 Description des lots

#### 3.1.6.1 Loches

Un total de 160 loches a été obtenu à la pisciculture d'Erezée en novembre 2017. Lors de la mise à sec des bassins abritant des salmonidés, une cinquantaine d'individus se trouvaient dans chaque bassin. Ils ont été récupérés à l'épuisette et séparés des branchages et autres substrats naturels. Ces poissons n'étaient pas censés se retrouver dans ces bassins. En pompant l'eau de la rivière pour pouvoir y stocker les saumons, il est fort probable que ces poissons aient été aspirés par la pompe et qu'ils se retrouvent donc dans le bassin. Malgré le fait qu'ils partagent cet habitat avec des prédateurs, ils ont réussi à s'implanter dans le bassin. On peut parler d'espèce d'origine sauvage opportuniste car elle vient de la nature mais s'est implantée dans un environnement d'élevage.

Au total, 166 mesures sur des loches ont été effectuées. Ces mesures se faisaient à l'aide d'une toise graduée en fin de chaque expérience. L'entièreté des individus n'était pas mesurée, en général, les mesures se faisaient sur 5 à 6 loches par bassin. Le descriptif de l'expérience et le palier dans lequel se retrouve chaque mesure de loche ont été recensés. Une image illustrant la mesure d'une loche sur la toise est donnée ci-dessous (Figure 3.6). Les individus ont été mesurés à 0,5cm près compte tenu de la difficulté à réaliser une mesure plus précise.

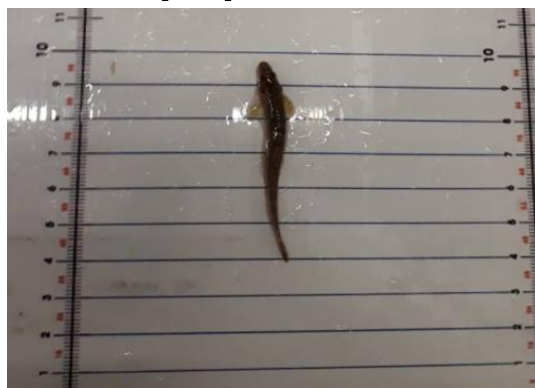


Figure 3.6: Mesure d'une loche à l'aide de la planche de la toise graduée

L'ensemble de ces mesures a permis de déterminer une moyenne générale ainsi qu'un écart-type relatif à ce lot de loche. Ces résultats ont également été utilisés afin d'évaluer l'importance de la longueur du poisson quant à sa tendance à remonter les échancrures.

Moyenne et écart-type des tailles sur l'échantillon :

*Moyennes:*  $\mu = \bar{X} = 6,18 \text{ cm}$

*Ecart – type:*  $\sigma = S = 0,63 \text{ cm}$

Nombre de mesures :  $n = 166$  [/]

Etant donné le grand nombre de mesures, on peut se fier à la moyenne et à l'écart-type calculés pour dresser une loi normale-type relative au lot de loche et comparer cette loi-type avec un récapitulatif des mesures.

Le graphe de la loi normale type a été dressée en calculant la différence  $F(x)$  entre la probabilité que la mesure soit inférieure à 6,25cm et la probabilité qu'elle soit inférieure à 5,75cm comme probabilité d'obtenir une longueur de 6cm lors d'une mesure quelconque. Cette méthode a été utilisée pour chaque demi-centimètre. Mathématiquement, la démarche peut s'écrire comme suit :

$$F(x = 6,25\text{cm}) = P(X \leq 6,25\text{cm})$$

$$P(x = 6\text{cm}) = F(-6,25\text{cm}) - F(x - 5,75\text{cm})$$

Sur le graphe suivant (Figure 3.7), il est aisé d'observer que la distribution du lot de loches est fort proche de celle d'une loi normale centrée en 6cm avec un écart-type assez faible. Une petite différence entre l'échantillon de loches présentes à Châtelet et la loi normale est néanmoins présente. En effet, un plus grand nombre de poissons sont de 6cm que ce qui est prévu par la loi.

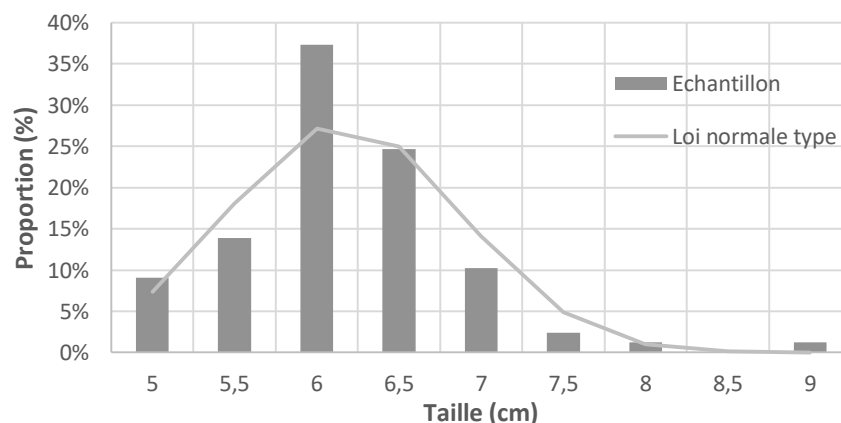


Figure 3.7: Distribution de la taille des loches expérimentées dans le laboratoire

Les détails sur les 166 mesures sont donnés sur le tableau ci-dessus. Plus de 60% des loches mesurent entre 5,75 et 6,75cm. L'échantillon de mesure est peu dispersé, seules quelques valeurs atteignent les 8cm.

Tableau 3.10: Répartition de la taille des loches et proportion de chaque taille

|                       |    |     |    |     |    |     |   |     |   |
|-----------------------|----|-----|----|-----|----|-----|---|-----|---|
| <i>Taille [cm]</i>    | 5  | 5,5 | 6  | 6,5 | 7  | 7,5 | 8 | 8,5 | 9 |
| <i>Proportion [%]</i> | 9  | 14  | 37 | 25  | 10 | 2   | 1 | 0   | 1 |
| <i>Nombre</i>         | 15 | 23  | 62 | 41  | 17 | 4   | 2 | 0   | 2 |

L'amplitude du lot est de  $9 - 5 = 4\text{cm}$  et 98% des individus mesurent entre 5 et 8 cm. On arrive à la conclusion que la population testée est assez homogène et ne présente pas de grande variation au niveau de la taille.

### 3.1.6.2 Chabot

Quelques 94 chabots ont été pêchés dans l'Orne, à Court-Saint-Etienne grâce au service de pêche du service public de Wallonie. Une pêche électrique a été réalisée le 27 février 2018 dans le cours d'eau. Le principe de cette pêche électrique est de faire circuler un faible courant via une longe dans l'eau. Ce courant va perturber les poissons et les pousser à sortir de leur cachette. Ensuite, les poissons sont récupérés par épuisette.

La répartition des tailles est fort variable. En effet, il n'est pas évident de n'attraper que des poissons correspondant à la taille souhaitée. Quand un chabot est bien plus grand que la valeur cible, il est automatiquement relâché, les plus petits chabots sont de l'année alors que les plus gros sont adultes.



Figure 3.8: Bac de stockage des chabots avant la présence de cachettes

Afin d'obtenir des informations chiffrées sur les tailles des chabots, des mesures au demi-centimètre près à la fin de chaque d'expérience ont été réalisées. Seule une partie des poissons expérimentés étaient mesurés. Ceux-ci étaient pris au hasard dans les différents bassins mais le numéro du bassin dans lequel ils étaient présents était enregistré.

Un total de 94 mesures a été effectué sur les chabots. Ces mesures ont permis de déterminer la moyenne et l'écart-type du lot.

$$\sigma = 1,38cm$$

$$\mu = 7,92cm$$

Un graphique reprenant la distribution des mesures réalisées sur les chabots est proposé ci-dessous (Figure 3.9). Une comparaison avec une loi normale type de même moyenne et même écart-type figure également sur le graphique. La loi normale type est dressée selon la même méthode que celle explicitée pour les loches.

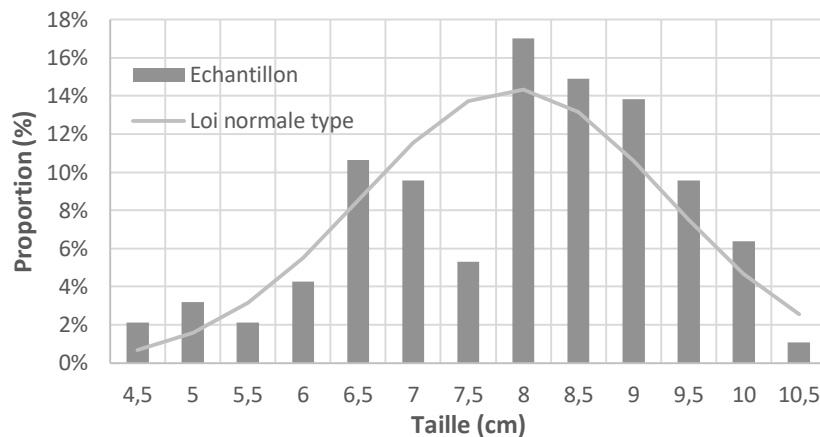


Figure 3.9: Distribution de la taille des chabots expérimentés en laboratoire

On observe que très peu des poissons ont donné une mesure de 7 ou 7,5cm. On aura ainsi des gammes de tailles plus représentées que d'autres.

Un chabot adulte mesure entre 10 et 15cm. Une bonne partie des individus expérimentés ne respecte donc pas les lois de similitude (30% de la taille adulte). L'amplitude du lot est de  $10,5 - 4,5 = 6cm$  et l'écart type de  $1,38cm$  indiquent que ce lot est bien plus éparpillé en terme de taille que les loches.

### 3.1.6.3 Hotu

Une soixantaine d'hotus ont été obtenus à la pisciculture d'Erezée. Ces poissons étaient présents dans des cuves de manutention. Leur taille était très homogène avec des individus compris entre 8 et 8,5cm. Aucune analyse détaillée n'a été réalisée car la dispersion de leur taille était négligeable. Le Hotu adulte mesurant couramment de 25 à 50cm, ce lot correspond aux lois de similitude.

#### 3.1.6.4 Civelles

Plusieurs centaines de civelles ont été pêchées dans le sud de la France et amenée à Erezée, une cinquantaine d'entre elles ont été amenées à Châtelet. Ces civelles avaient une taille de 7-8 cm et n'ont pas fait l'objet d'une analyse détaillée non plus car leur participation au test a été très brève. S'agissant d'un test préliminaire, il ne semble pas primordial de caractériser spécifiquement ce lot.

#### 3.1.7 Bien-être animal

Travailler sur une espèce vivante implique son lot d'incertitudes, afin de ne pas fausser les résultats expérimentaux plus qu'ils ne le sont déjà en raison des limites du modèle réduit, il est nécessaire de respecter certaines règles. En effet, il est primordial de traiter correctement les poissons en les stressant le moins possible et en leur donnant une qualité de vie la plus proche possible de celle vécue dans la nature. Tout d'abord, un poisson correctement traité aura tendance à se comporter de manière naturelle et donc à fournir des données non-biaisées. Le stress est un des facteurs limitant dans l'expérimentation animale. Ensuite, pour des raisons éthiques, il est primordial de traiter les êtres vivants de la meilleure manière qu'il soit et ainsi réduire au maximum la mortalité.

Le domaine de la pisciculture n'est pas fort connu et le fait d'avoir été au conservatoire du saumon mosan situé à Erezée a été une découverte du monde piscicole. Se familiariser avec les méthodes de transport, de stockage était primordial et une reproduction des conditions de stockage a été réalisée dans le hall de la direction des recherches hydrauliques du SPW. Côtayer les professionnels du métier permet également de manipuler correctement les individus lors des tests.

##### 3.1.7.1 Formation

Une formation de base a été suivie concernant le bien-être animal. Celle-ci s'est déroulée dans la faculté de médecine de l'UCL et comporte une formation théorique ainsi que formation pratique sur le terrain. Cela permet d'avoir une vision globale des règles à suivre lorsqu'on manipule des animaux. Les attestations de suivi de la formation se trouvent en Annexe C.

##### 3.1.7.2 Capture

La capture des différentes espèces s'est déroulée en présence de professionnels, et de manière non intrusive. Pour la pêche des loches, hotus et civelles, les techniciens de la pisciculture d'Erezée ont effectués les manipulations et concernant les chabots, c'est le service pêche du SPW qui a opéré. Les poissons n'ont pas été blessés durant la phase de capture. Les pêches des loches et des chabots se sont faites à l'aide d'une épuisette.

##### 3.1.7.3 Transport

Le transport des poissons de leur lieu de capture jusqu'au modèle réduit s'est passé de la même façon pour toutes les espèces. Des sacs à eau ont été utilisés en remplissant le sac d'oxygène quand c'était possible (Figure 3.10). L'oxygène est injecté sous pression et le sac est fermé hermétiquement. Les durées des transports n'ont pas excédé 2h et aucune mortalité n'a été observée à l'ouverture des sacs.



Figure 3.10: Sac d'eau utilisé pour le transport des poissons

#### 3.1.7.4 Adaptation

Lors de l'arrivée des poissons dans le laboratoire, ils ne peuvent être directement plongés dans de l'eau locale à cause de la différence de température. En effet, il arrivait que la température de l'eau des sacs de transport soit de 3°C et dans le laboratoire à Châtelet de 10°C. Il fallait donc adapter progressivement la température pour éviter un choc thermique. Pour cela, une trentaine de litres d'eau a été rajoutée à l'eau froide de transport toutes les 30 minutes pour faire grimper progressivement la température. Pour les civelles, la température de départ était de 8°C donc une adaptation plus rapide a été réalisée.

#### 3.1.7.5 Stockage

Les différentes espèces sont stockées dans des grands bacs en plastique de 1x2m. Chaque espèce est stockée dans un bac différent afin de faciliter la formation de lots lors des expérimentations. Le bac est rempli à moitié pour atteindre environ 250l d'eau. Une pompe à air est également présente pour assurer un bon taux d'oxygène dans l'eau. Il est à noter aussi la présence de pierres dans le fond du bassin pour simuler des caches que les poissons de fond affectionnent particulièrement (Figure 3.11). Il est important d'installer assez de caches pour le nombre total de poissons car certaines espèces aiment se répartir le territoire et trop peu de cachettes empêcheraient certains individus de profiter des aménagements prévus.



Figure 3.11: Présence de pierres pour créer des cachettes et imiter le milieu naturel

L'eau a été changée dès que la qualité de celle-ci était jugée trop faible durant la phase expérimentale. Cette qualité était caractérisée par deux manières : la transparence de l'eau et la quantité de dépôt présent. Afin de ne pas avoir de différences notables entre la qualité de l'eau de stockage et l'eau de test (qui a la qualité d'eau de baignade), un changement d'eau est nécessaire tous les mois au minimum.

### 3.1.7.6 Nourrissage

Concernant la nourriture, il était important de nourrir les poissons une fois qu'ils sont stockés dans l'eau à 10°C à Châtelet. Dans de l'eau froide, comme celle au conservatoire du saumon mosan à Erezée le poisson entre dans une forme d'hibernation et il dépense très peu d'énergie. L'alimentation du poisson n'est donc pas nécessaire. Mais lorsque la température monte, le poisson devient beaucoup plus alerte et son nourrissage doit être bien dosé.

Concernant le type de nourriture, des vers de vase sont donnés pour que la quantité soit de 2% de la biomasse du poisson (Rollin X., 2018, comm. perso), la quantité est ensuite adaptée en fonction des besoins. Cette nourriture est une nourriture basique qui convient aux espèces présentes dans les rivières mosanes. Un exemplaire de la nourriture donnée est présent plus bas (Figure 3.12). Afin d'éviter toute propagation de maladie et de décomposition des vers, la nourriture est congelée durant le stockage et n'est amenée au laboratoire qu'une fois nécessaire. La nourriture est donnée, souvent en fin de journée, juste avant l'extinction des lumières simulant la nuit tombante. Etant donné que la loche et le chabot sont des poissons nocturnes et lucifuges (Rollin X., 2018, comm. perso), leur nourrissage se fait principalement la nuit.



Figure 3.12: Emballage de la nourriture donnée aux poissons (Origine Tom&Co)

### 3.1.7.7 Réintroduction dans le milieu naturel

Une fois les expérimentations terminées, il n'est plus nécessaire de garder les différentes espèces dans le hall d'expérimentation. Afin de respecter les normes éthiques liées à l'expérimentation animale, les poissons ont été remis à l'endroit d'où ils venaient. Ainsi les chabots ont été relâchés dans leur rivière d'origine, c'est-à-dire l'Orne. Les loches et les hotus sont retournés à la pisciculture

d'Erezée. Pour des raisons pratiques, les civelles ont été relâchées dans la Sambre, à Châtelet. Etant donné que les individus ont été nourris, possédaient des caches simulant leur environnement naturel, se trouvaient en compagnie de congénères et qu'aucune intervention intrusive n'a été opérée, leur réintroduction ne devrait pas poser problème.

### 3.1.7.8 Mortalité

La mortalité des différentes espèces est un indicateur-clé concernant le bien-être des animaux. Pour les loches, 14 individus sont morts durant les 3 mois et demi de présence au laboratoire. Pour les chabots, 10 morts ont été constatés sur une période de 2 mois et demi, aucune civelle n'est morte mais leur contribution aux tests est très limitée. Enfin, 10 hotus n'ont pas survécu à leur séjour d'un mois et demi. Un tableau récapitulatif est présenté ci-dessous :

| <i>Espèce</i>   | <i>Nombre de mort</i> | <i>Nombre d'individus initial</i> | <i>Temps de présence</i> | <i>Taux de mortalité par mois</i> |
|-----------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| <i>Loche</i>    | 14                    | 160                               | 3 mois et demi           | 2,5%                              |
| <i>Chabot</i>   | 10                    | 95                                | 2 mois et demi           | 4,2%                              |
| <i>Hotu</i>     | 10                    | 65                                | 1 mois et demi           | 10,2%                             |
| <i>Civelles</i> | 0                     | 50                                | 2 semaines               | 0%                                |

Conformément à la littérature, la loche semble bien être une espèce résistante et s'acclimate assez bien à des environnements différents.

## 3.2 Description du matériel d'analyse

### 3.2.1 Acquisition des images

Trois caméras de type Marlin M131 B ont été utilisées pour filmer les différents bassins. Les caméras sont placées au-dessus de la passe et de manière à filmer les paliers P1, P2 et P3. Une fois les images obtenues, un traitement ImageJ ainsi qu'un traitement Matlab a été réalisé pour recenser puis gommer les détections indésirables telles que les bulles d'air ou bien les remous à la surface. Ce traitement est expliqué dans la section suivante.



Figure 3.13: Caméra Marlin M131 B utilisée pour filmer les bassins standards



Figure 3.14: Disposition des caméras au dessus des trois bassins standards

Le placement des caméras est le suivant :

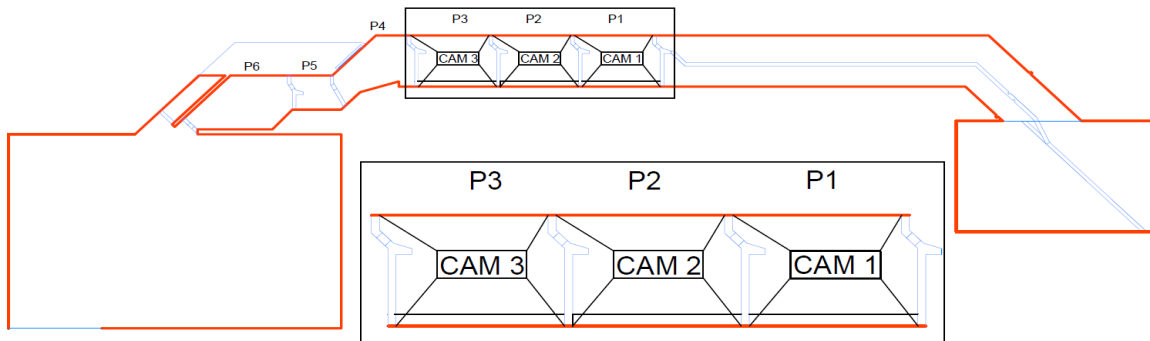


Figure 3.15: Placement des caméras sur les trois bassins standards

Afin d'avoir une image plus nette des différents bassins, une solution a été trouvée par la pose d'une plaque de plexiglass sur la surface de l'eau. Cette plaque transparente va appuyer sur la surface de l'eau et va aplatir les remous formés par la turbulence. Cet ajout permet d'éviter un grand nombre de zones d'ombre formées par les remous en surface. De plus, sur le périmètre du bassin, sur l'arête entre la paroi verticale et horizontale, il y a de nombreuses zones où l'image n'est pas nette. L'ombrage dans cette zone peut facilement être confondu avec un poisson. Sur le rendu de droite, la limitation du bassin est bien plus claire et une mésinterprétation devient plus rare.

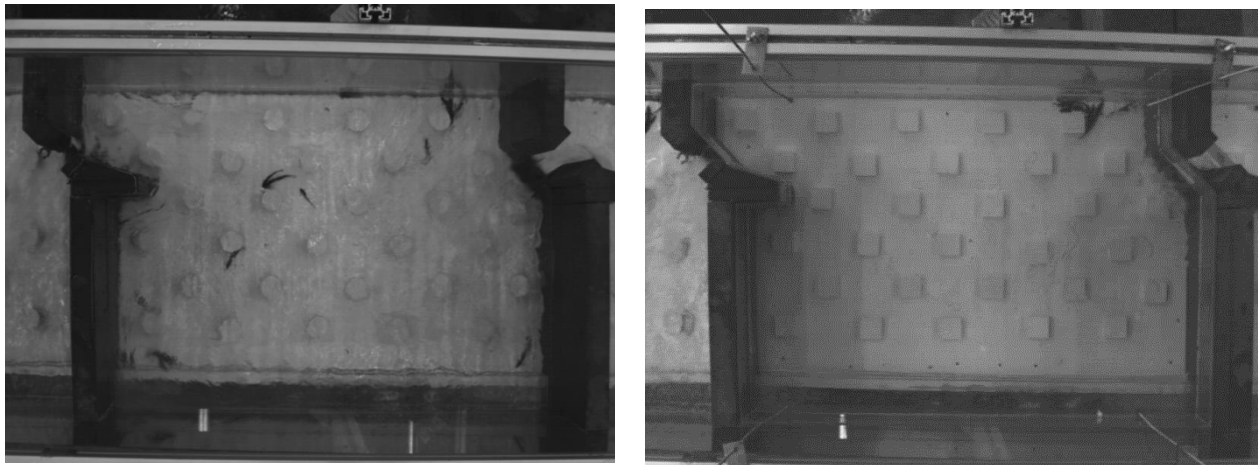


Figure 3.16: Comparaison entre les images obtenues sans (à gauche) et avec plexiglass (à droite)

### 3.2.2 Traitement des images

Le code utilisé pour le traitement d'image provient du mémoire de Courtois et Van Audenhaege (2017) et a été adapté aux expérimentations réalisées dans ce travail. Les codes peuvent être retrouvés en annexe F et H. Cette section est inspirée de leur travail.

Les images obtenues par les caméras présentées ci-dessus sont des images brutes, une représentation fidèle de la réalité. Ces images permettent de pouvoir décompter manuellement les poissons dans un bassin. Cependant, il n'est pas possible d'analyser numériquement ces images telles quelles et un traitement d'image doit être réalisé. Ce traitement se passe en deux étapes.

La première étape va être réalisée avec ImageJ qui est un logiciel créé par Wayne Rasband (NIH) et qui permet de traiter des images. Les différentes phases d'analyses seront expliquées plus tard. En entrée de ce logiciel seront les piles d'images obtenues lors d'un test et une matrice contenant des informations sur chaque détection sera la sortie.

La deuxième étape est un traitement Matlab. C'est un langage de programmation développé par MathWorks et qui permet de traiter des matrices, de mettre en œuvre des algorithmes,... Un tri des différentes détections est réalisé sur la matrice obtenue grâce au logiciel ImageJ. En sortie seront obtenues deux styles de graphes, d'abord un graphe reprenant les densités de répartition des loches dans un bassin et ensuite une répartition des vitesses dans le bassin.

### Phase 1: Conversion de la pile d'image en matrice détection (ImageJ)

Les étapes suivantes sont réalisées pour obtenir la matrice des détections :

Tableau 3.11: Etapes à suivre pour la phase 1 du traitement d'image avec ImageJ

| <i>Etape</i> | <i>Opération</i>                             |
|--------------|--|
| 1            | Définition et soustraction de l'image témoin |
| 2            | Définition de la région d'intérêt            |
| 3            | Application d'un filtre                      |
| 4            | Application d'un seuil de couleur            |
| 5            | Obtention d'une ligne de matrice             |

Ces opérations se font pour l'ensemble de la pile d'images à l'aide de la macro ImageJ fournie en annexe F, pour l'explication, seul le procédé appliqué à une seule détection sera proposé.

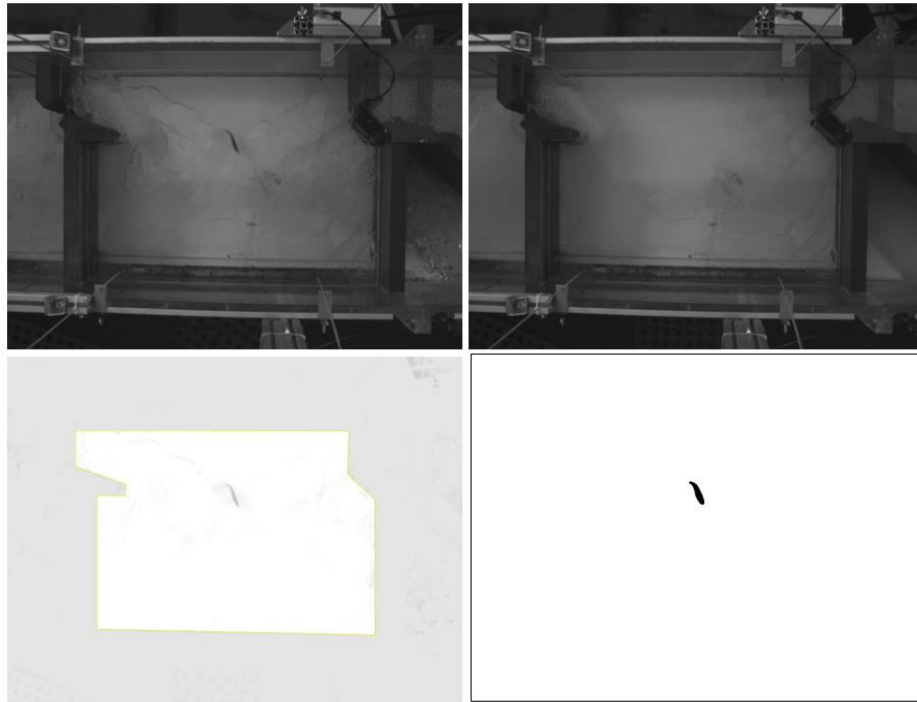


Figure 3.17: Séquences du traitement d'image réalisé par ImageJ. Dans le sens de lecture : Image initiale, image témoin, soustraction de l'image témoin et définition de la région d'intérêt et application du seuil de couleur (Courtois et Van Audenhaege, 2017)

### Etape 1

La première étape est de définir l'image moyenne qui va permettre d'isoler le poisson dans son environnement. Pour cela, une centaine d'images sont choisies parmi toutes celles présentes dans la pile d'images. Le but étant de sélectionner des images sans poissons dans le bassin. Cette image moyenne va ensuite être soustraite à toutes images de la pile d'images. Cette opération permet d'avoir des images où tous les éléments fixes sont éliminés (parois, plots, seuils,...).

Commandes à utiliser : Image > Stacks > Z project > Average Intensity

Process > Image Calculator > Subtract

### Etape 2

Pour ne pas avoir de détections dans des zones de l'image qui ne sont pas pertinentes, une zone d'intérêt est délimitée aux bassins. Un polygone sera dessiné au pied des parois tout autour du bassin et la région extérieure à ce polygone sera exclue.

Commandes à utiliser : Analyze > Tools > ROI Manager > Add[t] & More > Fill

### Etape 3

Une des limitations de l'analyse image est la présence de bruit, de petits détails qui peuvent polluer l'image en y ajoutant des éléments non pertinents. Afin de limiter le bruit au maximum et donc

la présence de petites taches de couleurs, le filtre Gaussian blur est utilisé. Il s'agit de l'utilisation d'une fonction Gaussienne pour lisser les niveaux de gris de l'image et donc effacer les petites tâches qui peuvent se trouver sur l'image. L'intensité du filtre est l'écart-type de la fonction Gaussienne et est fixée à 2. Cette valeur est obtenue par un compromis entre un lissage assez fort pour éliminer les petites tâches et assez faible pour éviter de trop déformer les tâches correspondantes aux poissons.

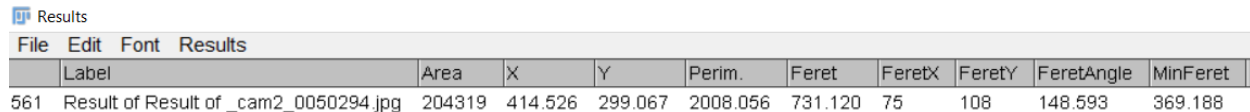
#### Etape 4

Les images qui sont analysées par ImageJ sont d'abord transformées en image 8-Bit, les couleurs deviennent des nuances de gris. Ainsi, chaque pixel aura une valeur numérique comprise entre 0 pour le noir et 255 pour le blanc. Pour déterminer si un poisson est présent sur l'image, un seuil de couleur est appliqué. Ce seuil permettra d'isoler le poisson en noir du reste du bassin en blanc. Cela explique pourquoi il faut que le fond de la passe et les substrats soient blancs, le poisson de couleur sombre va ressortir sur les images.

Commandes à utiliser : Image > Adjust > Threshold

#### Etape 5

Les détections obtenues sont des taches noires sur un fond blanc. Pour pouvoir analyser cette tâche noire représentant un poisson, une ligne de matrice est écrite (Figure 3.18) avec les informations suivantes :



| File                                      | Edit   | Font    | Results |          |         |        |        |            |          |  |  |
|---|--------|---------|---------|----------|---------|--------|--------|------------|----------|--|--|
| Label                                     | Area   | X       | Y       | Perim.   | Feret   | FeretX | FeretY | FeretAngle | MinFeret |  |  |
| 561 Result of Result of _cam2_0050294.jpg | 204319 | 414.526 | 299.067 | 2008.056 | 731.120 | 75     | 108    | 148.593    | 369.188  |  |  |

Figure 3.18: Ligne de matrice obtenue après la phase 1 du traitement d'image

Label : Le nom de l'image avec un numéro pour pouvoir identifier séparément chaque image.

Area : L'aire que recouvre cette tâche, elle est exprimée en nombre de pixel recouverts. C'est une information très importante car elle permet de savoir si la détection correspond bien à un poisson. En effet, si l'aire est trop petite, il peut s'agir d'une bulle ou d'une impureté et doit être éliminée des détections.

X & Y : Les coordonnées du centroïde de la tâche. Le centroïde est le centre de gravité de la tâche, il peut être en dehors de la tâche si elle a la forme d'un 'U'. Ces coordonnées permettent de localiser le poisson dans le bassin et donc de savoir où se trouve le poisson lorsqu'une détection est observée. Ces données sont exprimées en pixels également en partant de l'origine qui se trouve en haut à gauche de l'image.

Perim. : Le périmètre de la tâche, permet d'éliminer les tâches qui ne correspondent pas au ratio périmètre/aire d'un poisson.

Feret : La distance qui définit le plus long segment de droite qu'il est possible de placer dans la tâche. De cette distance peuvent être déterminés d'autres paramètres tels que FeretX et FeretY. Ces deux valeurs correspondent aux coordonnées de l'extrémité du segment de droite. FeretAngle est aussi obtenu, il s'agit de l'angle entre le diamètre de Feret et une droite horizontale. MinFeret est la distance minimale du segment de droite qui est parallèle au diamètre de Feret. Ces paramètres permettent une représentation graphique simplifiée du poisson. Une représentation graphique de ces paramètres est proposée ci-dessous :

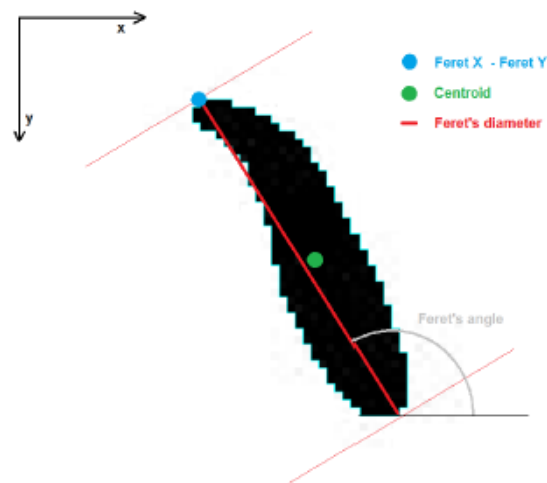


Figure 3.19: Représentation graphique des paramètres définissant le poisson (Courtois et Van Audenhaege, 2017)

### Limitations de la phase 1

Plusieurs limitations empêchent une utilisation optimale du traitement d'image. Des améliorations peuvent être réalisées mais il n'est pas évident d'analyser précisément des tâches de couleur peu précises.

D'abord, l'éclairage pose problème. Pour pouvoir obtenir des images utilisables, il est nécessaire d'avoir une quantité de lumière suffisante. Durant près de 12h, la nuit empêche d'avoir la moindre image et donc le comportement des poissons n'est observable que durant la moitié du temps d'expérimentation.

Ensuite, il s'agit des détections erronées. Les tâches détectées ne sont pas toujours des poissons mais peuvent être des bulles ou bien des détritiques qui peuvent être pris en compte alors que ce ne sont pas des poissons. A l'inverse, certains poissons se plaquent contre les parois, là où il y a des zones d'ombre. Quand ils sont dans une zone d'ombre, il n'est pas possible de détecter la présence du poisson et leur détection est manquée.

Enfin, il y a la problématique du regroupement de poissons. Quand les individus se rassemblent et s'entassent les uns sur les autres, il n'est pas possible de séparer les poissons et une seule détection est alors comptée.

Afin de résoudre ces problèmes, une analyse post-traitement est réalisée à l'aide du logiciel Matlab. Pour affiner les détections au maximum, il est nécessaire de choisir les bons paramètres de détection mais il restera toujours des détections non voulues qui doivent être analysées. De plus, ImageJ s'occupe de chaque image séparément et l'analyse d'un fichier lourd prend beaucoup de temps. Le fait d'utiliser Matlab permet de travailler avec des matrices sur lesquelles un grand nombre d'opérations peuvent être réalisées rapidement.

### Transition : fichier de sortie ImageJ (.xls) vers fichier d'entrée Matlab (.xlsx)

Avant de commencer l'analyse du traitement Matlab, une modification de quelques paramètres doit être réalisée avec le logiciel Excel. Ce n'est pas d'une étape à proprement parlé car elle ne concerne que la réécriture de la ligne de détection obtenue. Il s'agit de raccourcir le label pour ne garder que le numéro de la détection. Cela permet une appellation plus aisée de chaque détermination. Ensuite, les autres modifications constitueront à éliminer les décimales des différentes valeurs. Le protocole ainsi que la macro Excel sont détaillées en annexe G. La ligne de détection est désormais de la forme suivante :

|     | <i>Label</i> | <i>Area</i> | <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Perim.</i> | <i>Feret</i> | <i>FeretX</i> | <i>FeretY</i> | <i>FeretAngle</i> | <i>MinFeret</i> |
|-----|--------------|-------------|----------|----------|---------------|--------------|---------------|---------------|-------------------|-----------------|
| 561 | 50294        | 204319      | 415      | 299      | 2008          | 731          | 75            | 108           | 149               | 369             |

Figure 3.20: Ligne de matrice obtenue après la phase 1 du traitement d'image et le traitement Excel

### Phase 2 : Tri de la matrice détection

L'analyse post-traitement est assez complexe et comprend de nombreuses parties. Dans cette section ne seront expliquées que les notions générales. Le code Matlab étant présenté en annexe H. L'analyse se présente en trois points :

D'abord, une élimination des détections non pertinentes est opérée. Quand une détection est observée sur une image mais ne l'est plus sur les images suivantes c'est que la détection était une bulle et non un poisson. En effet, un poisson est toujours détecté sur plusieurs images successives. Le principe appliqué pour éliminer ces fausses détections est d'observer au moins 75 détections pour 100 images analysées. Si ce n'est pas le cas, les lignes correspondantes à ces 100 images sont supprimées. Il s'agit de l'erreur la plus commune.

Ensuite, une séparation des images ne contenant qu'un seul poisson des images contenant plusieurs poissons est réalisée. Encore une fois, si une seule détection est observée sur 75 sur 100 alors on considère qu'il n'y a qu'un seul poisson dans le bassin. Cela permet d'appliquer des conditions de validation plus sévères quand on sait que le poisson ne peut se placer dans un groupe.

Enfin, des filtres sont appliqués sur les images ne comprenant qu'une détection. L'aire détectée est limitée par le haut, donc les lignes dont les aires sont plus grandes que la valeur fixée seront

éliminées. La valeur cible varie en fonction des espèces de poissons et de la taille des poissons. Le ratio périmètre/aire est aussi analysé, quand il ne correspond pas à celui d'un poisson, la ligne de la matrice sera éliminée. Pour finir, la distance entre deux détections est aussi un facteur limitant, si deux détections consécutives correspondent bien à la géométrie d'un poisson mais sont séparées d'une trop grande distance, alors c'est qu'il s'agit d'une bulle. La ligne sera également supprimée.

## Limitations de la phase 2

Il est évident que l'analyse post-traitement ne règle pas tous les problèmes liés au traitement de l'image. Quand une détection correspond bien aux critères géométriques (aire et ratio périmètre/aire) et se trouve souvent au même endroit, il peut aussi bien s'agir d'un poisson ou bien de bulles. Il n'est pas possible pour le programme de différencier ces deux détections. De plus, la vitesse est un facteur très sensible. Si un poisson se déplace rapidement d'un coin à l'autre du bassin, il est possible qu'il dépasse la vitesse maximale préétablie. L'autre limitation bien plus embêtante est la présence de nombreux poissons entassés les uns sur les autres. Le programme n'a pas la capacité de savoir combien de poissons sont présents quand ils forment une tâche difforme. Il est compliqué de trouver une solution à ce problème car même en observant les images à l'œil il n'est pas possible de différencier les différents individus.

En conclusion, il est important de comparer les résultats obtenus avec les observations visuelles. Quand on regarde le comportement des poissons lors des expériences, il est facilement possible de comparer les graphes obtenus avec les observations faites. Lors de chaque graphe obtenu, une vérification générale des images est réalisée pour valider les résultats.

Deux types de graphes sont obtenus par l'analyse des images : la densité de répartition des poissons et la vitesse de ceux-ci. Les différents graphes sont présentés dans les sections 5 et 6.

## Graphe de densité

Chaque détection de poisson obtenue par ImageJ est représentée par un point sur le graphe. Le graphe est quadrillé, un élément de ce quadrillage (200x150) correspond à 1 point/pixel de coordonnées (X, Y). Quand plusieurs détections mènent aux mêmes coordonnées, un comptage commence et le point se colore de couleurs plus chaudes. Ainsi les points bleus sur le graphe sont les détections où les poissons ne restent pas longtemps. Les points jaunes montrent une présence prolongée des loches à cet endroit.

Pour éviter d'avoir une gamme trop large de valeur, le choix d'utiliser une échelle logarithmique a été fait. Ainsi la valeur « 2 » sur le graphe veut dire qu'au total des expérimentations menées sur le substrat, un poisson s'est trouvé sur un pixel coloré en jaune-orange pendant  $10^2 = 100$  secondes.

On peut se poser la question de savoir quel pixel est utilisé pour représenter le poisson. Le choix s'est porté sur le centroïde du poisson. Il s'agit du centre de gravité du poisson vu du dessus, c'est

en effet un point qui va rester assez stable et va donc empêcher d'avoir des mouvements continus du poisson parce qu'il bouge un peu la queue. Cela a pour conséquence que le centroïde peut se trouver à côté du poisson si il s'arcboute et qu'il forme un demi-cercle. Cela explique pourquoi, dans le cas de substrat étroit, le point représentant le poisson peut se situer sur le substrat.

### Graphes de vitesse

Un deuxième graphe a été réalisé avec les vitesses des détections. Encore une fois, il s'agit d'une échelle logarithmique. Ainsi si la légende indique 0, la vitesse sera de 1 m/s.

En annexe, les graphes de densité ainsi que les graphes de vitesses pourront être retrouvés pour chaque lot testé. Un total sera réalisé pour le graphe de densité pour toutes les expériences courtes et pour toutes les expériences longues. Ainsi une comparaison aisée sera possible entre ces deux durées d'expériences.

### 3.2.3 Mesure et analyse de l'environnement

#### 3.2.3.1 Débitmètre

Pour mesurer le débit circulant dans la passe, un débitmètre ABB a été utilisé. Ce dispositif permet d'avoir une valeur numérique précise du débit qui circule dans la passe à poissons et dans le canal d'attrait.



Figure 3.21: Débitmètre ABB permettant de quantifier le débit

#### 3.2.3.2 Pompe

Pour faire circuler l'eau dans le modèle, une pompe de la marque Stork est utilisée. Elle est reliée à une conduite elle-même divisée en 2 conduites alimentant la passe à poissons et le canal d'attrait. Cette pompe fonctionne à l'aide d'un variateur de fréquence et permet donc de faire varier le débit de manière grossière. Afin d'atteindre le débit-cible de manière précise, les vannes papillons dans

les conduites d'eau peuvent également être réglées. Pour l'ensemble des expérimentations, les paramètres choisis sont présents en annexe.



Figure 3.22: Pompe, raccordement de la pompe aux bassins de la passe à poissons et ouverture de la vanne du canal d'attrait

### 3.2.3.3 Hydrocap

Une carte d'acquisition (National Instrument Daq Pad) reliée à trois capteurs de distance à ultrasons Boomer UNAM (AI02, AI03 et AI04) et deux débitmètres (AI00 et AI01) ont été placés sur la passe. En reliant cette carte d'acquisition à un ordinateur du SPW contenant le logiciel Hydrocap 3, il est possible d'enregistrer la tension renvoyée par ces capteurs à distance. Cette tension varie en fonction de la hauteur d'eau pour les capteurs de distance et du débit pour les débitmètres. L'objectif visé en utilisant le logiciel Hydrocap est d'enregistrer chaque hauteur d'eau (mm) en fonction du temps et de la tension renvoyée par les boomers (V) tout au long des expériences ainsi que d'enregistrer au cours du temps les valeurs de débit en fonction de la tension renvoyée par les débitmètres. La conversion de la tension vers la hauteur d'eau où le débit se fait au moyen d'un fichier de calibration (.txt). L'élaboration de ce fichier sera présentée pour les différents boomers et débitmètres.

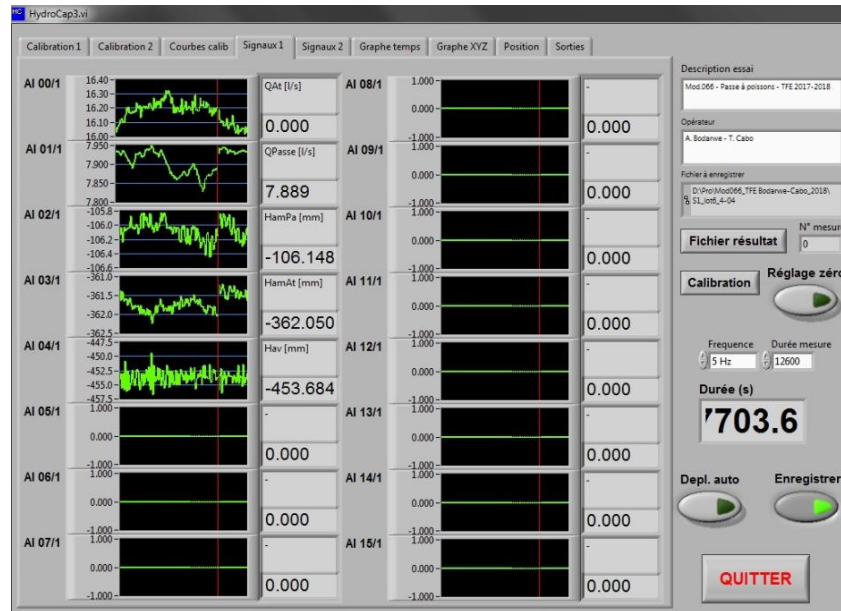


Figure 3.23: Capture Hydrocap avec fichier calibré

On voit sur la figure ci-dessus une capture d'écran du logiciel Hydrocap utilisant le fichier de calibration (.txt) qui sera présenté par la suite. On observe également que 5 entrées sont branchées sur les 16 possibles.

Notons également que les différentes hauteurs d'eau mesurées par les capteurs de niveaux renvoient des valeurs par rapport à une hauteur d'origine. Si on veut modifier cette hauteur d'origine il est nécessaire le changer le fichier de calibration.

Tableau 3.12: Tableau résumé des entrées et sorties Hydrocap

|      |   |
|------|---|
| AI00 | Capteur de débit dans le canal d'attrait    |
| AI01 | Capteur de débit dans la passe              |
| AI02 | Capteur niveau à l'amont de la passe        |
| AI03 | Capteur niveau à l'amont du canal d'attrait |
| AI04 | Capteur niveau à l'aval                     |

### Calibration capteurs de niveau

Pour effectuer la calibration des capteurs de niveaux, un trusquin électronique positionné au droit des capteurs est nécessaire. Le principe est de faire varier le débit (et donc le niveau d'eau) en modifiant la fréquence de la pompe, d'attendre approximativement 5 minutes pour que l'écoulement dans la passe se stabilise et enfin prendre les mesures de hauteur d'eau au trusquin et d'enregistrer à une fréquence de 5Hz durant 30 secondes la tension renvoyée par les capteurs sur Hydrocap qui en fera une moyenne. Chaque mesure donnera une hauteur d'eau et une tension, en répétant le processus 5 à 10 fois, une droite de calibration sera formée.

Les sept relations hauteur-tension calculées dans le bassin aval sont représentées sur le graphe ci-contre, ceux-ci forment la droite de calibration du capteur AI04. Une régression linéaire permet d'obtenir les coefficients a et b. Ces mêmes coefficients ont été calculés pour la hauteur à l'amont et dans le canal d'attrait.

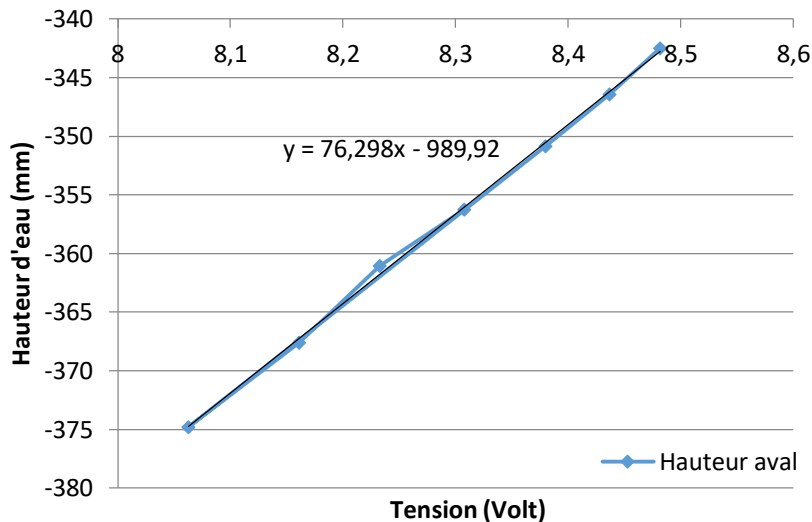


Figure 3.24: Droite de calibration linéaire hauteur d'eau - tension

### Calibration débitmètre

La calibration des débitmètres est différente de celle des capteurs de niveau. Celle-ci peut être réalisée pour les deux entrées (AI00 et AI01) de manière simultanée.

Tout d'abord, il faut avoir à l'esprit que le circuit est réglé sur une intensité de  $4\text{-}20\text{mA}$  et comporte une résistance de  $470\text{ ohms}$  pour une tension de sortie  $0\text{-}10\text{V}$ . Cela signifie que lorsqu'aucun débit n'est injecté dans la passe, le courant est de  $4\text{mA}$ , la tension de sortie est d'approximativement  $V = 4 * 10^{-3} * 470 = 1,88\text{V}$  et que le débit maximum correspond à un courant de  $20\text{mA}$  soit une tension de sortie approximative de  $9,4\text{V}$ . Il est donc nécessaire de fixer avant calibration le débit maximum visé dans le canal d'attrait et dans la passe. Les valeurs posées sont  $100\text{l/s}$  pour le débit d'attrait et  $20\text{l/s}$  pour la passe.

Pour réaliser les mesures, il faut imposer un courant dans le circuit et observer le voltage renvoyé sur Hydrocap via la carte d'acquisition. Le courant est imposé lorsque la pompe est éteinte. Une fois que l'on a les voltages en fonction de l'intensité, il faut déterminer le débit correspondant aux différentes tensions. Les valeurs de voltage trouvées sont issues d'une moyenne sur un enregistrement à  $5\text{Hz}$  pendant une durée de 30 secondes sur Hydrocap.

Tableau 3.13: Conversion des données mesurées pour connaître le débit dans la passe

| Intensité<br>(mA) | Voltage attrait<br>(V) | Voltage passe<br>(V) | Débit attrait<br>(l/s) | Débit passe<br>(l/s) |
|-------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| 4                 | 1,88                   | 1,87                 | 0                      | 0                    |
| 6                 | 2,82                   | 2,8                  | 12,43                  | 2,49                 |
| 9                 | 4,26                   | 4,2                  | 31,11                  | 6,23                 |
| 10                | 4,7                    | 4,66                 | 37,35                  | 7,48                 |
| 12                | 5,65                   | 5,6                  | 49,84                  | 9,98                 |
| 15                | 7,06                   | 7                    | 68,61                  | 13,73                |
| 18                | 8,48                   | 8,41                 | 87,43                  | 17,49                |
| 20                | 9,43                   | 9,35                 | 100                    | 20                   |

Pour définir le débit en fonction de la tension on procède comme suit (exemple pour le débit d'attrait) :

$$V_{20mA} - V_{4mA} = 7,5508 \text{ (V)}$$

$$Q_{6mA} = 100 * \frac{2,8223 - 1,8836}{7,5508} = 12,4319 \text{ [l/s]}$$

Et on répète ceci pour toutes les intensités, ce qui nous fournira un rapport entre le voltage et le débit.

Il suffit dès lors de tracer la droite de calibration et d'en dessiner la courbe de tendance pour obtenir les paramètres de calibration.

Les deux droites de calibration sont illustrées ci-dessous :

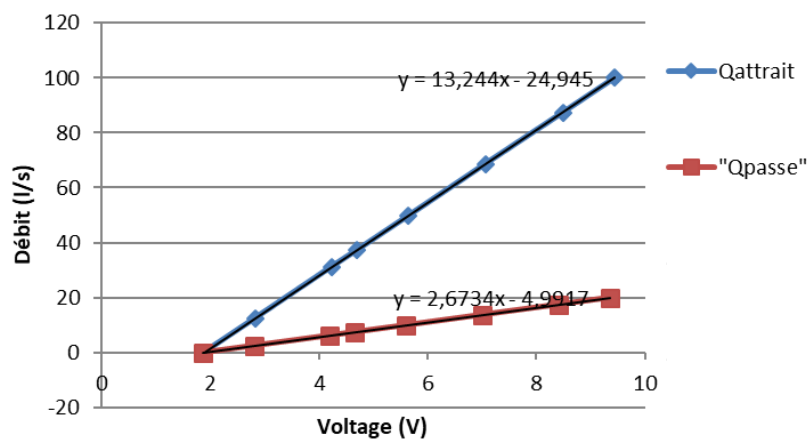


Figure 3.25: Droites de calibration linéaire débit-tension

On trouve les équations :

$$Q_{At} = 13,244V - 24,945 \text{ [l/s]}$$

$$Q_{Passe} = 2,6734V - 4,9917 \text{ [l/s]}$$

Le fichier de calibration (.xlsx) se présente comme suit (la première ligne ne sert qu'à expliciter la signification des différentes colonnes):

Tableau 3.14: Résumé du fichier de calibration

| <i>Entrée</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Description<br/>Hydrocap</i> | <i>Description capteur</i> |
|---------------|----------|----------|---------------------------------|----------------------------|
| <i>ai00</i>   | 13,244   | -24,945  | Qat [l/s]                       | Débitmètre (l/s)           |
| <i>ai01</i>   | 26,734   | -49,917  | Qpasse [l/s]                    | Débitmètre (l/s)           |
| <i>ai02</i>   | 81,148   | -784,99  | HamPa [mm]                      | Capteur niveau xyz (mm)    |
| <i>ai03</i>   | 80,812   | -990,33  | HamAt[mm]                       | Capteur niveau xyz (mm)    |
| <i>ai04</i>   | 76,298   | -989,92  | Hav[mm]                         | Capteur niveau xyz (mm)    |

La 4<sup>ème</sup> colonne sert tout simplement à nommer sur Hydrocap la valeur renvoyée par le capteur. Les coefficients a et b font le lien entre la tension renvoyée par les capteurs de distance et débitmètres (x) et la valeur indiquée sur hydrocap (y) selon l'équation :  $y = ax + b$ .

Hydrocap demande, à son entrée, un fichier de calibration (.txt), il s'agit du fichier présenté plus haut pour lequel les différentes colonnes sont en fait séparées d'une tabulation. Pour ouvrir un fichier (.txt) sur Excel, il suffit de l'ouvrir sur Excel et de sélectionner tabulation et virgule lorsque cela est demandé. Lorsqu'on effectue les mesures de calibration, il est nécessaire d'entrer un fichier non calibré avec des valeurs de coefficient a=1 et b =0 dans hydrocap.

#### 3.2.3.4 Thermopuces & thermomètre

Deux thermopuces sont placées dans la passe. Toutes les heures, une mesure est enregistrée sur chacune d'elle. Cette mesure permet de mesurer efficacement la température de l'eau et d'avoir une bonne idée de l'évolution de cette dernière tout au long des expérimentations.



Figure 3.26: Thermopuce permettant de mesurer la température toute les heures de manière automatique

Les différents graphes relatifs à l'environnement (température, hauteur bassin amont, hauteur bassin aval, débit dans la passe) sont présentés en annexe C.

### 3.2.4 Gestion de la luminosité

Afin d'éclairer le modèle bâché, un système d'éclairage *Led* a été couplé à un automate pour simuler la lumière du jour pour le modèle bâché. Le système d'éclairage fonctionne de 7h à 19h mais la séquence d'allumage n'est pas encore optimale. Une proposition d'optimisation est expliquée en annexe.

#### 3.2.4.1 Bâchage

Un bâchage complet du modèle a eu lieu, ce qui permet de créer un environnement complètement contrôlé. Où les durées d'éclairage sont constantes et ponctuelles.



Figure 3.27: Bâchage du modèle vu de l'intérieur et de l'extérieur

Une autre raison pour laquelle la bâche était nécessaire réside dans le placement de la plaque en plexiglass. Cette plaque aplatit la surface de l'eau et élimine toutes les turbulences qui pouvaient nuire à la qualité de l'image. Il y a cependant un aspect négatif qui découle de cette amélioration : les reflets des tubes lumineux présents au plafond du hall. Pour éviter d'avoir deux traces lumineuses blanches et donc de perdre de l'information, le haut de la passe doit impérativement être bâché pour avoir un rendu sans défaut.

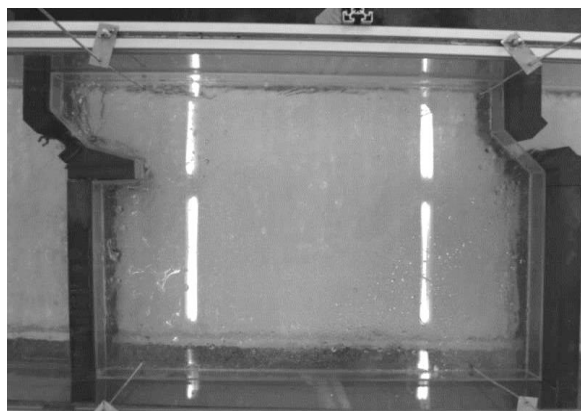


Figure 3.28: Rendu sans bâchage

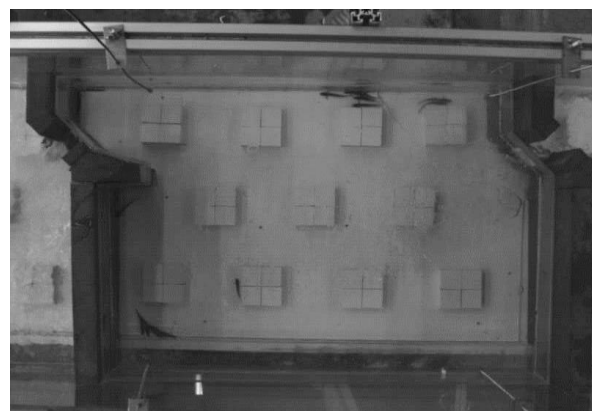


Figure 3.29: Rendu avec bâchage

### 3.2.4.2 Matériel d'éclairage

Le matériel d'éclairage est composé de cinq lampes Led attachées à la structure en acier soutenant les bâches. Pour éviter d'éblouir les poissons avec une luminosité excessive, tous les spots sont dirigés vers le haut et la lumière éclaire le modèle par diffusion. C'est également important pour ne pas submerger l'objectif des caméras de lumière. Une image toute blanche est observée quand trop de lumière est absorbée par la lentille de l'objectif et plus aucun contraste n'est visible. La répartition des caméras est représentée ci-dessous :

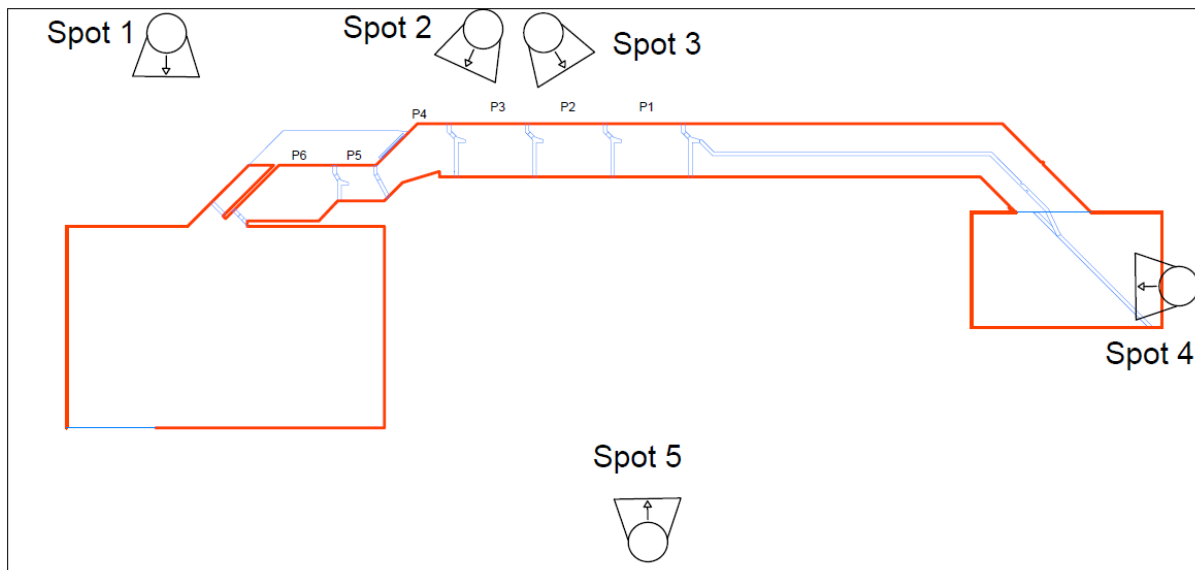


Figure 3.30: Placement des Spots LED sur le modèle réduit

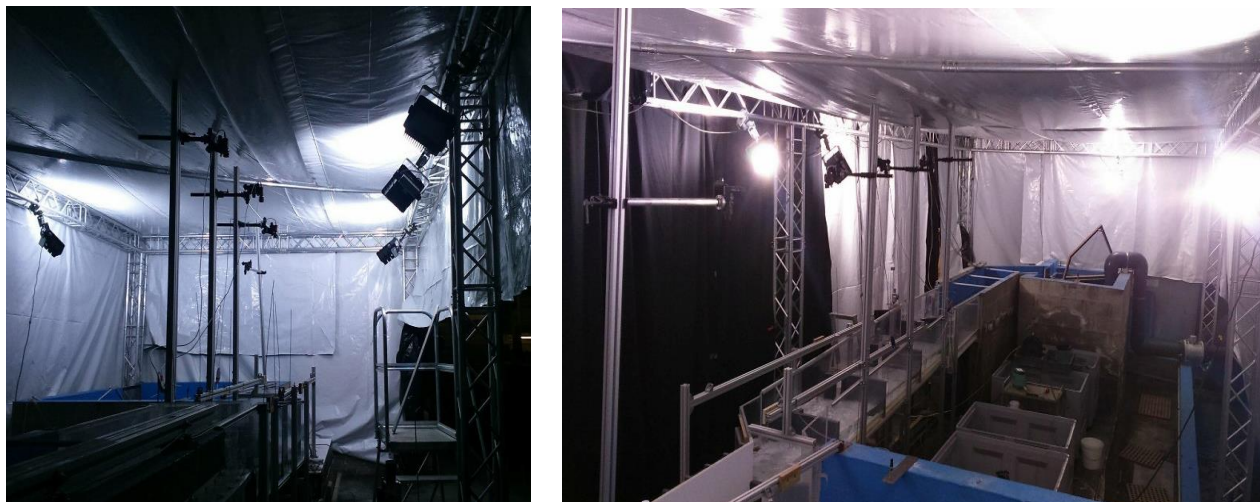


Figure 3.31: Modèle réduit éclairé par les Spot LED

### 3.2.4.3 Automate pour lumière du jour

Pour imiter un cycle circadien, c'est-à-dire un cycle naturel de lumière, un automate a été utilisé. Le logiciel LOGO conçu par la société Siemens a servi à programmer les séquences d'allumages et d'extinction des lampes. Le programme est basé sur une programmation filaire, et il n'est dès lors pas intéressant de le présenter en annexe. Etant donné que l'automate n'est devenu fonctionnel que tardivement dans la séquence d'expérimentations, la simulation de l'aurore et du crépuscule sont restés à un stade basique, c'est-à-dire que l'allumage et l'extinction complets des cinq lampes sont réalisés sur un laps de temps d'une minute. En annexe, une proposition de simulation du cycle circadien sera présentée.

### 3.2.5 Amélioration de la passe dans le temps

Durant la phase d'optimisation du substrat, plusieurs évolutions ont été apportées à la passe. Les améliorations ont pour but de faciliter l'analyse post-expérimentale et de standardiser les tests pour pouvoir comparer les résultats de manière rigoureuse.

Tableau 3.15: Améliorations apportées au modèle réduit en fonction du type de substrat testé

| Type de substrat  | Date        | Améliorations  |  |                                |
|-------------------|-------------|--|--|--------------------------------|
| R42M              | 07-09/03    | Pose des caméras                                       | Prises de température avec thermomètre           | /                              |
| R44M              | 12-15/03    | Standardisation du palier initial & nombre d'individus | Pose de la plaque de plexiglass en P2            | Création d'un bassin tampon    |
| 0000              | 15/02-4/04  | Bâchage partiel de la passe                            | Pose de la 2 <sup>ème</sup> plaque de plexiglass | 2 bassins consacrés aux loches |
| C84B              | 20-21/03    | Mesure du débit avec Hydrocap                          | Réparation des fuites                            |                                |
| C82B              | 22-26/03    | /  | /  | /                              |
| R42E              | 26-28/03    | /  | /  | /                              |
| C42M              | 28/03-30/03 | Prise de température avec thermopuces                  | /  | /                              |
| Substrat optimisé | 09/04       | Bâchage total  | Installation des lampes                          | /                              |
| Substrat optimisé | 17/04       | Automatisation de l'allumage des lampes                | /  | /                              |



# Chapitre 4

---

## : Méthodes

---

L'objectif de ce travail est d'optimiser la forme des substrats placés dans le fond de la passe à poissons. Seul des éléments de macro-rugosité seront étudiés dans ce document. Pour obtenir les caractéristiques optimales des différents éléments de substrat, deux phases vont se succéder.

La première phase sera l'optimisation du substrat en tant que tel en n'utilisant qu'une seule espèce de poisson (la loche). Leur comportement va être analysé pour chaque substrat et les différences de comportement seront relevées pour déterminer quel substrat favorise les déplacements amont dans la passe. Pour cette phase, des lots avoisinant les 25 individus seront placés dans le bassin P2. Les durées d'expérimentation sont de deux types : les temps courts ( $\pm 4h$ ) et les temps longs ( $\pm 20h$ ). Lors de chaque substrat expérimenté, deux tests courts et deux tests longs vont être réalisés, cela permettra une comparaison du comportement sur le court et le long terme. Deux caméras filmant les bassins P2 et P3 vont enregistrer les mouvements des poissons.

La deuxième phase est l'analyse du comportement d'autres espèces avec ce substrat optimisé. Une autre espèce à faible capacité natatoire sera utilisée (chabot) ainsi qu'une espèce nageant bien dans les eaux vives (hotu). Cela permet d'observer l'impact qu'ont les substrats sur une espèce qui utilise bien les passes actuelles. Enfin, le comportement de civelles (anguilles juvéniles) sera présenté à l'aide d'une expérimentation préliminaire. Elles utilisent des passes à anguilles qui diffèrent fortement de la géométrie des passes à poissons classiques. La présence de substrat sera donc bénéfique et l'amélioration de la passe pour cette espèce très spécifique sera discutée. Les durées d'expérimentations seront plus longues (24h) pour permettre aux individus de se répartir le plus possible dans les différents bassins amont.

---

## 4.1 Stratégie de la phase d'optimisation

---

### 4.1.1 Facteurs d'intérêt pour l'optimisation

Les facteurs testés au cours des expériences visant à optimiser le substrat pour les poissons de fond sont les suivants :

- La densité
- La hauteur
- La largeur
- La forme

La possibilité de jouer sur le débit n'est pas envisagée. Lors d'expériences (Silva et al., 2011), il a été prouvé que le fait de mettre un débit plus élevé pouvait augmenter la montaison. Une augmentation de débit complexifie le maintien dans la passe pour les individus mais augmente l'attractivité des bassins amont de la passe. C'est par conséquent un élément-clé mais qui ne variera pas lors des expériences. Le débit-cible dans le modèle réduit est fixé à de 8 l/s (Zorzan, 2016).

#### **La densité**

On s'attend à ce qu'une forte densité soit favorable pour les plus petits poissons et moins bons nageurs alors qu'une plus faible densité favorisera les poissons plus volumineux. Le fait d'avoir une densité élevée peut surprotéger les poissons et finalement leur donner un abri à long terme. La passe doit absolument rester un lieu de passage où l'implantation des poissons doit être évitée à tout prix pour ne pas transformer les passes en terrain de chasse facile pour les prédateurs.

#### **La forme/taille**

Les substrats seront de deux formes distinctes : soit des parallélépipèdes rectangles, soit des cylindres. Les arêtes et les angles des plots ont tendance à couper net le courant les heurtant. Avec des formes plus arrondies, le courant va plus facilement contourner l'obstacle mais les cylindres épousent mieux la forme d'un poisson. Une comparaison des deux formes va être réalisée même si peu de différences sont attendues.

#### **La hauteur**

La hauteur des substrats joue un rôle prépondérant dans l'efficacité des plots à protéger des zones de forts courants. Augmenter cette hauteur va mieux protéger les zones de recirculation et donc amener un environnement plus propice. Au contraire, la diminuer va permettre de moins protéger ces zones et donc de ne pas surprotéger les poissons. Si les poissons se trouvent dans un environnement trop ressemblant à leur milieu naturel, ils seront moins enclins à chercher de nouveaux territoires et à explorer la passe. La difficulté de l'optimisation du substrat est de trouver un juste milieu entre l'attractivité du bassin amont et la création de zones de repos dans

les différents bassins. La passe doit rester un endroit de passage où les poissons n'ont pas envie de s'installer.

Une autre solution pour aider les poissons benthiques à franchir la passe est d'installer une rugosité de fond tel qu'une herbe synthétique. Cette solution a l'avantage d'aider les poissons de fond à se maintenir dans la passe par frottement sans créer de zones surprotégées. Néanmoins, la présente étude ne se base que sur les éléments de macro-rugosité et cette autre solution est considérée comme une perspective pour les études futures.

#### 4.1.2 Présentation des substrats

Les valeurs suivantes sont choisies pour les facteurs :

- La forme du substrat, carré ou ronde.
- La taille du substrat, 4 ou 8cm de large.
- La hauteur du substrat, 2 ou 4cm.
- La densité du substrat, basse (11 plots), moyenne (30 plots) ou élevée (60 plots)

Afin de faciliter la désignation des substrats un code reprenant ces 4 caractéristiques est utilisé dans ce travail. Il s'agit d'un code à 4 caractères, un pour chaque caractéristique du substrat.

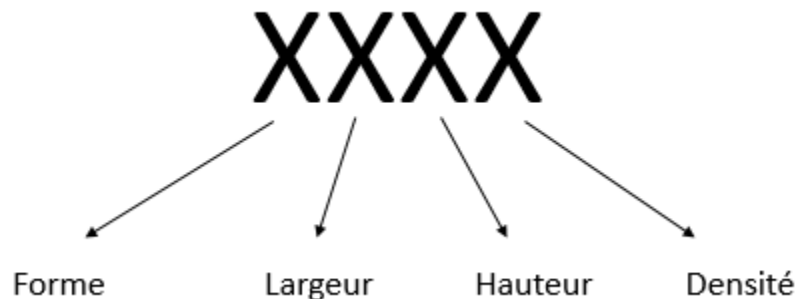


Figure 4.1: Code donné aux substrats pour nomination

La première caractéristique désigne la forme du substrat. Elle est représentée par une lettre : C pour la forme carré et R pour la forme ronde.

Le deuxième caractère désigne la largeur du substrat et les chiffres 4 et 8 sont utilisés, pour représenter respectivement 4 et 8 cm de large.

Troisièmement, la hauteur des plots sera représentée par le chiffre 2 pour 2cm ou 4 pour 4cm de hauteur.

Enfin, la densité sera représentée par la lettre B pour la densité basse (11 plots), M pour la densité moyenne (30 plots) ou E pour la densité élevée (60 plots). La caractérisation de la densité n'est basée que sur le nombre de plots et non sur la surface recouverte. En effet, une densité basse de plots carrés large de 8 cm recouvre plus de surface au total qu'une densité moyenne de plots ronds de 4cm de diamètre. Pour éviter toute incompréhension, seul le nombre de plots est caractérisé.

Le tableau suivant reprend les différentes caractéristiques des substrats, ils sont présentés dans l'ordre d'expérimentation. La présentation des résultats se fera suivant une logique géométrique plutôt que chronologique.

Tableau 4.1: Description des caractéristiques des substrats

|           | <i>Forme</i> | <i>Largueur</i> | <i>Hauteur</i> | <i>Densité</i> | <i>Nom</i> |
|-----------|--------------|-----------------|----------------|----------------|------------|
| <i>S0</i> | -            | -               | -              | -              | 0000       |
| <i>S1</i> | Ronde        | 4 cm            | 2 cm           | Moyenne        | R42M       |
| <i>S2</i> | Ronde        | 4 cm            | 4 cm           | Moyenne        | R44M       |
| <i>S3</i> | Carrée       | 8 cm            | 4 cm           | Basse          | C84B       |
| <i>S4</i> | Carrée       | 8 cm            | 2 cm           | Basse          | C82B       |
| <i>S5</i> | Ronde        | 4 cm            | 2 cm           | Elevée         | R42E       |
| <i>S6</i> | Carrée       | 4 cm            | 2 cm           | Moyenne        | C42M       |

Pour avoir un repère visuel, une vignette sera présente sur chaque graphe pour savoir de quel substrat il s'agit. Cette vignette comportera une disposition des plots dans le bassin ainsi qu'un rectangle noirci complètement pour représenter la hauteur de 4cm ou noirci sur la moitié pour représenter une hauteur de 2cm.

#### 4.1.3 Choix des substrats

Afin de mener à bien l'étude de l'optimisation du substrat sans multiplier le nombre de substrats testés, il est nécessaire de miser directement sur le bon ordre de grandeur pour les facteurs d'intérêts que sont la densité, la forme, la taille et la hauteur.

Pour déterminer les différentes densités des substrats, les écrits de Katopodis<sup>5</sup> ont servi de base de référence. Il est conseillé d'espacer deux substrats d'au minimum la longueur du poisson (Stevenson and Baker 2009). Il a également été trouvé que les substrats devaient avoir le même ordre de grandeur que la longueur des poissons (Monk and Hotchkiss 2012). Dans le cas présent, les loches font approximativement 6 cm alors que les substrats sont de 4 ou 8 cm de côté ou diamètre ce qui paraît idéal.

La détermination des hauteurs, quant à elle se base sur diverses expériences menées sur l'influence d'un substrat dans le passé (Katopodis et al, 2014). Ces expérimentations sur des passes à taille réelle utilisaient des plots carrés de 15cm de hauteur soit 3cm à l'échelle du modèle. Afin d'analyser l'influence de ce paramètre, les hauteurs ont été fixées à 2 et 4cm.

Ceci a mené à la conception des deux premiers substrats présentés sur les vignettes suivantes :

<sup>5</sup> Christos Katopodis, Ecological Engineering

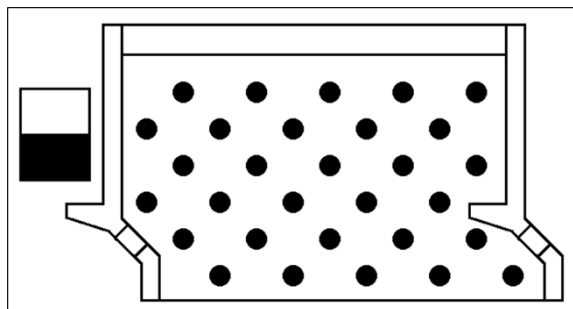


Figure 4.2: R42M

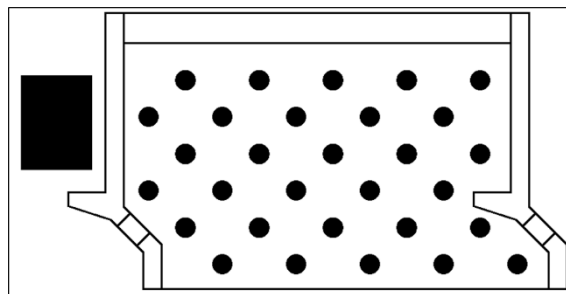


Figure 4.3: R44M

L'espacement entre deux cylindres est de 12cm soit approximativement deux fois la longueur des loches (espacement supérieur à la longueur du poisson conseillé par Stevenson and Baker 2009) ce qui sera qualifié de densité moyenne.

Il faut garder à l'esprit que l'objectif est de trouver un substrat efficace pour les loches mais aussi les autres espèces benthiques. Il est par conséquent possible que des poissons benthiques plus grands que les loches empruntent la passe. Une certaine marge par rapport à la distance entre deux éléments de macro-rugosité est prise en fixant un espacement de 12cm.

Entre les deux substrats, il n'y a que la hauteur qui varie. Les expérimentations sur ces deux types de substrats constitueront une première information quant à son influence.

Après avoir travaillé avec des substrats de même forme, il est intéressant de travailler avec des substrats de sections plus importantes (Figure 4.4 & Figure 4.5). En effet, de plus gros éléments de macro-rugosité provoquent une hétérogénéité plus grande du champ de vitesse ce qui est préféré par les poissons (Santos et al. 2013). Il faut néanmoins faire attention à ne pas placer d'éléments trop importants car les poissons ont tendance à rester dans les zones protégées et donc à ne pas remonter la passe (Kynard et al. 2009).

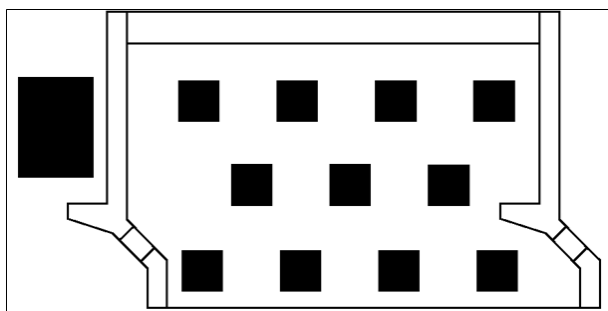


Figure 4.4: C84B

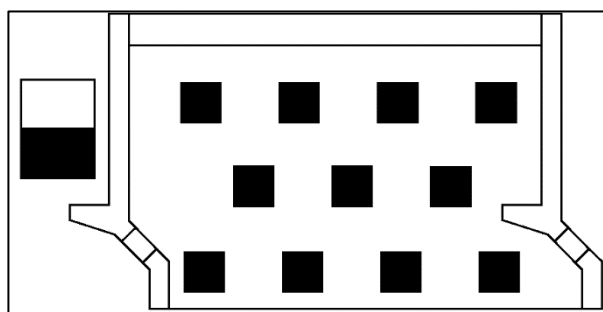


Figure 4.5: C82B

Avec cette disposition, une nouvelle comparaison pourra être faite entre les plots de 2 et 4cm de hauteur. Les résultats pour cette densité (densité basse) pourront également être comparés à la densité précédente (densité moyenne). Après ces quatre substrats, la hauteur optimale pourra assurément être déterminée. Si aucune différence marquante n'est obtenue entre les hauteurs, ce sera la plus faible hauteur de substrat qui sera considérée optimale. La largeur des plots pourra également être évaluée.

Après l'établissement de la hauteur, la dernière disposition sera testée (densité élevée : Figure 4.6). Cette densité ne sera expérimentée que pour la hauteur optimale. A la fin de ce substrat, les trois densités auront été testées pour la meilleure hauteur, il sera dès lors possible de définir la densité optimale.

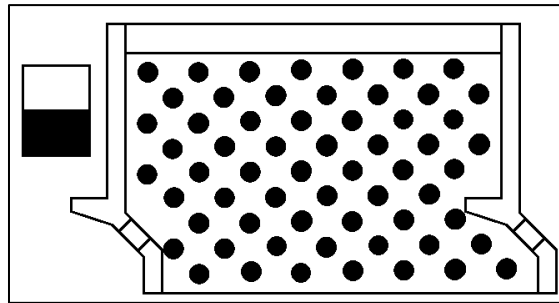


Figure 4.6: R42E

Enfin, pour le dernier substrat, la hauteur et la densité optimales seront utilisées. Il n'y a que la forme des éléments de macro-rugosité qui sera modifiée.

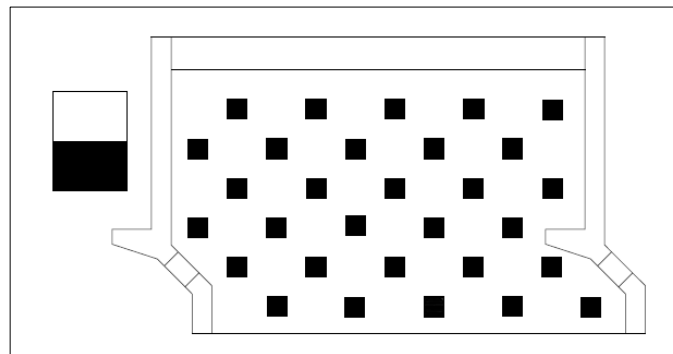


Figure 4.7: C42M

La forme la plus favorable sera alors trouvée. Les quatre facteurs d'intérêts (hauteur, densité, taille et forme) seront optimisés et les tests pourront être étendus sur la passe entière.

#### 4.1.4 Méthodes de caractérisation du substrat

Pour pouvoir évaluer le comportement d'une espèce en fonction du substrat, cinq aspects vont être analysés. Tous n'ont pas la même importance mais l'analyse de chacun d'entre eux est nécessaire pour pouvoir caractériser un substrat.

La comparaison se trouve dans le chapitre 5 – *Optimisation*. Voici les cinq aspects déterminés lors des expérimentations :

- Déplacement amont

C'est le facteur d'analyse le plus important. Le but de la passe à poissons est de relier le bassin amont au bassin aval en contournant l'obstacle, les poissons doivent aussi bien pouvoir remonter le courant que le descendre. Cependant, l'action de descendre une rivière appelée aussi dévalaison est bien plus facile d'un point de vue énergétique que l'action de remonter cette rivière, appelée montaison. En effet, il est aisé de se laisser emporter par le courant tandis que le fait de le remonter demande un effort et donc une volonté forte. Ainsi, le déplacement amont est considéré comme un déplacement voulu et un taux élevé de déplacement amont prouve l'efficacité de la passe.

- Déplacement nul ou stabilité

Le fait de se maintenir dans le bassin initial implique que le poisson a les capacités physiques pour se stabiliser. Cela veut dire que dans le bassin, il existe des zones de repos où le poisson peut se reposer et récupérer des efforts qu'il vient de fournir. Cet aspect est moins important que le taux de déplacements amont mais permet de voir quel substrat favorise la récupération des poissons. Un fort taux de stabilité peut être bénéfique car le substrat protège bien le poisson et l'empêche d'être emporté par le courant. Mais d'un autre côté s'il le protège trop bien du courant, les individus ne cherchent pas de nouveaux territoires car celui dans lequel ils vivent leur convient parfaitement.

- Déplacement aval

Le dernier déplacement est le déplacement aval. Ce taux donne une information importante sur l'efficacité des substrats. Quand les poissons ne se sentent pas dans un environnement propice, le premier réflexe sera de se laisser emporter jusqu'à une zone où la vitesse du courant sera plus faible. Aussi, quand un poisson doit nager à une vitesse plus élevée que sa vitesse de confort, un épuisement peut mener à un déplacement aval. Enfin, pour explorer de nouveaux territoires, il est très facile de se laisser emporter plutôt que de remonter le courant même si le poisson est capable physiquement de le faire. Le déplacement aval est donc un comportement volontaire ou non et il est extrêmement difficile de savoir quels déplacements sont voulus et lesquels ne le sont pas. Un fort taux de déplacement aval est plutôt néfaste pour l'efficacité du substrat car il informe le fait que les poissons ne se sentent pas bien dans le bassin initial et les empêche d'emprunter ce canal pour les montaisons.

- La vitesse des poissons

Grâce au traitement d'images, des graphes de vitesse sont représentés. Etant donné que les poissons à faible capacité natatoire préfèrent les vitesses faibles, un substrat où les vitesses sont généralement plus faibles sera privilégié. Cependant, comme pour le taux de déplacement nul,

des vitesses trop faibles peuvent créer un environnement propice à l'implantation des poissons sur le long terme. A l'inverse, des vitesses trop fortes seraient préjudiciables pour la récupération des poissons.

- Les zones de répartition

Encore une fois grâce au traitement d'images, les graphes de densité de répartition sont obtenus. Cela permet de savoir où les poissons ont tendance à se placer et quels endroits leur convient bien. Au plus la répartition est homogène, au plus les substrats protègent ces poissons et créent donc des zones de repos plus étendues. Le fait d'avoir de nombreuses zones de repos est un point positif car cela montre que les poissons se sentent bien dans les bassins et n'ont pas besoin de former des grands groupes très denses pour se maintenir dans le bassin. Cela favorise également l'exploration des bassins et crée un environnement favorable plus conséquent.

## 4.2 Protocole d'essai

---

Avant de commencer les manipulations, vérifier que l'environnement de travail est dans de bonnes conditions. Veiller à ce que le matériel soit présent et propre pour éviter de salir la passe et donc d'ajouter des éléments parasites qui vont diminuer la qualité du test.

Les protocoles de lancement et d'arrêt décrits ci-dessous sont valables pour la phase d'optimisation avec introduction des poissons dans le bassin P2. Lors de la deuxième phase d'expérimentation, les bassins d'introduction et le placement des filtres varient. Ces changements sont mentionnés lors du descriptif d'expérience et le protocole doit donc être adapté en conséquence.

### 4.2.1 Matériel de manipulation

- Seau
- Epuisette
- Filet ou filtre d'échancrure (2)
- Plaque en plexiglass (2)
- Ventouses (2)
- Escabeau sécurisé
- Toise de mesure
- Essuie

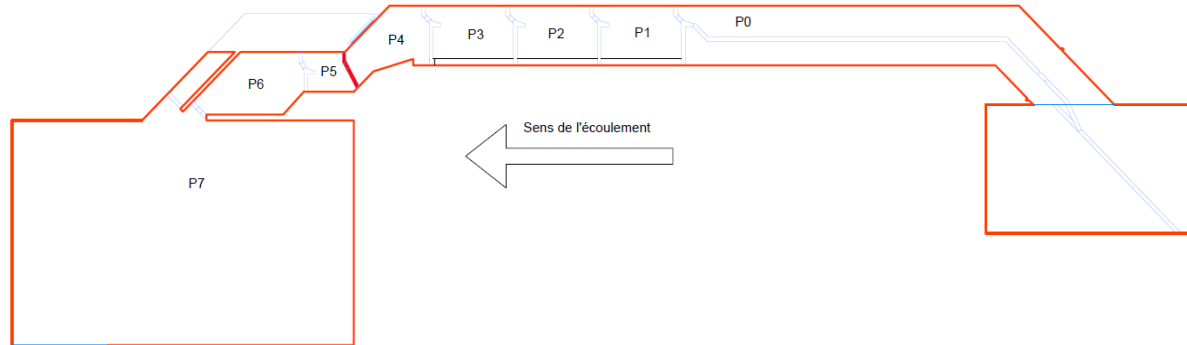


Figure 4.8: Plan de la passe

#### 4.2.2 Protocole de lancement d'expérimentation en phase d'optimisation

1. **Placer le filtre à l'aval du bassin P2.** Cela empêche les poissons d'aller dans le bassin P3 lors des prochaines manipulations. Le fait de travailler sur le bassin P2 peut causer un stress chez les poissons et ils essayeront de fuir ce danger en changeant de bassin, ce filtre permet de garder les poissons dans le bassin initial afin d'éviter de biaiser les taux de répartition.
2. **Placer les poissons dans le bassin P2.** Mettre les poissons dans un seau rempli d'eau et puis verser délicatement le seau dans le bassin P2. Il est conseillé de placer les poissons dans les zones à faibles vitesses d'écoulement pour accélérer leur stabilisation dans la passe et éviter des efforts trop violents juste après leur introduction dans le modèle.
3. **Placer la plaque de plexiglass sur le bassin P2.** A l'aide de ventouse, venir placer et fixer la plaque de plexiglass sur la surface de l'eau afin de rendre la surface de l'eau complètement lisse. Pour cette étape, un escabeau sécurisé est utilisé afin d'éviter tout risque de chute.
4. **Placer la plaque de plexiglass sur le bassin P1.** Répéter la phase précédente pour le bassin P1.
5. **Laisser les poissons se stabiliser dans la passe.** Après avoir effectué les phases précédentes, une période d'adaptation d'une dizaine de minutes est nécessaire pour que les poissons puissent trouver les zones de repos et puissent se stabiliser dans le bassin P2. Cette phase est primordiale pour éviter qu'un stress excessif ne vienne corrompre les résultats initiaux de l'expérimentation et donc les taux de répartition.
6. **Placer le filtre à l'aval du bassin P3.** Cette étape peut se faire à un autre moment pour autant qu'elle ait lieu avant le retrait du filtre séparant les bassins P2 et P3. Le placement de ce filtre restreint la possibilité de déplacement des poissons aux bassins P0, P1, P2 et P3 une fois l'expérience lancée.

7. **Lancer l'enregistrement caméra, des niveaux et des débits.** Lorsque l'expérience a démarré, la première chose à faire est d'enregistrer les images. Pour ne pas perdre de temps et donc d'informations, il est plus aisé de préparer le programme MetaCam ainsi que de sélectionner le fichier d'enregistrement préalablement pour n'avoir qu'à appuyer sur le bouton « Record ». L'enregistrement des niveaux et débits se fait quant à lui sur le logiciel Hydrocap et sert principalement à vérifier les conditions hydrauliques durant l'expérimentation. Son lancement se réalise après celui des caméras.
8. **Retirer le filtre présent en P2 et commencer la procédure expérimentale.** Une fois que les poissons sont stabilisés et que peu de mouvements sont observés dans le bassin, il faut encore faire une observation : vérifier qu'aucun poisson ne se trouve proche de l'échancrure aval. En effet, si c'est le cas, il y a de forte probabilité que le retrait du filtre le fasse dévaler. Une fois qu'aucun poisson n'est présent dans cette zone, le filtre peut être retiré et l'expérimentation peut commencer. C'est juste après cette étape que l'expérience démarre réellement et que le chronomètre est déclenché.

#### 4.2.3 Protocole d'arrêt d'expérimentation en phase d'optimisation

Le protocole d'arrêt est bien moins exigeant que le protocole de départ car un excès de stress est bien moins dommageable que lors du lancement.

1. **Retirer la plaque de plexiglass du bassin P1.** A l'aide des ventouses, retirer la plaque de plexiglass du bassin P1.
2. **Placer un filtre à l'échancrure entre le bassin P1 et P2.** Cela est fait pour éviter que les poissons présents en P1 ne se déplacent dans le bassin aval.
3. **Retirer la plaque de plexiglass du bassin P2.** Répéter la phase 1 pour la plaque située en bassin P2.
4. **Placer un filtre à l'échancrure entre le bassin P2 et P3.** Répéter la phase 2 pour l'échancrure entre le bassin P2 et P3.
5. **Repêcher les poissons avec une épuisette.** Il faut procéder avec délicatesse et patience pour éviter de blesser les poissons en les écrasant.
6. **Mesurer les poissons grâce à la toise graduée.** Placer les poissons sur la toise et enregistrer leur taille. Veiller à garder le seau d'eau à proximité pour les y placer une fois la mesure prise.
7. **Récolter les mesures.** Ces mesures sont directement notées sur un fichier Excel ainsi que sur les rapports d'expériences au même titre que les comptages lorsque ceux-ci ont été réalisés. Il est important de centraliser ces informations rapidement après l'expérience pour ne pas risquer de les égarer.

Après avoir réalisé une expérimentation, les poissons utilisés sont placés dans le bassin annexe pour éviter que des mêmes individus ne soient présent dans deux lots différents.

---

### 4.3 Limitations expérimentales

---

Pour pouvoir analyser le comportement des poissons dans la passe de Rivière, un modèle a été construit dans le Laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques du SPW situé à Châtelet. Le fait de reconstruire la passe dans un laboratoire joue sur les conditions de vie, l'environnement, le comportement des poissons. L'espèce de poisson est aussi importante et le choix de la loche présente des aspects positifs et négatifs. Pour pouvoir simuler les conditions réelles de la passe, un certain nombre de facteurs sont à adapter. Toutes les conditions ne sont pas adaptables et cela peut entraîner des biais. Cette section présente les différents aspects qui limitent la duplication parfaite de la passe à poissons.

#### **Non-respect des similitudes**

Le modèle utilisé pour réaliser les expérimentations présente des différences notables avec la passe à poissons présente à Rivière. En effet, le modèle utilisé dans le cadre de ce travail a été réduit à l'échelle 1 :5 pour en faciliter l'aspect pratique de l'étude et la mise en œuvre. A taille réelle, la passe est longue d'approximativement 60 mètres et ne pouvait par conséquent pas être construite et stockée pendant plusieurs années dans le Hall André Sterling de Châtelet. Le coût est également réduit grâce à ce choix. Par ailleurs, le modèle a été mis sur pied en 2013 et n'était pas prévu à la base pour l'expérimentation sur le vivant mais uniquement pour l'étude de l'écoulement. Certaines adaptations ont dû être appliquées au modèle lors de sa mise en œuvre et donc le modèle n'est pas une copie conforme de la passe de Rivière.

Cette mise à l'échelle va créer des limitations pour le modèle, en effet, il est compliqué de reproduire un environnement complet à l'échelle. Des principes de similitudes sont appliqués mais il n'est pas possible de maîtriser toutes les dimensions. Par exemple, le fait d'appliquer une réduction d'un cinquième sur la taille de la passe implique d'adapter la taille des poissons mais quel est le facteur déterminant ? La longueur du poisson, le poids, sa capacité musculaire ? Il est impossible d'avoir une similitude parfaite avec le vivant, certaines hypothèses doivent être prises en compte. Plus de détails concernant ces hypothèses sont présents dans le *chapitre 2 – section 2.3 : principes de similitude*.

#### **Stress des poissons**

Un élément fort important à minimiser est le stress des poissons lors des expérimentations. Quand les poissons utilisent une passe à poissons, ils le font de manière volontaire. Le stress est donc très limité car le processus est complètement naturel. Dans le cas du modèle réduit, les poissons sont observés en les plaçant directement dans un bassin. La différence est notable car un effet de stress peut avoir lieu. Le fait de se retrouver dans un environnement peu propice sans le vouloir peut effrayer les individus testés. Pour transporter les poissons de leur bac de stockage vers la passe, une pêche à l'épuisette est réalisée. Cela engendre un stress sur le poisson qui se débat mais dont

la portée n'est pas bien connue. Le protocole expliquant le lancement d'une expérimentation prend cet aspect en compte.

Un autre élément pouvant influencer le stress du poisson est l'environnement dans lequel il évolue. Pour pouvoir analyser le comportement des poissons, les parois sont adaptées. Le fait d'avoir des parois transparentes, avec une vue sur l'extérieur peut jouer sur le comportement des poissons. Le mouvement qu'il y a à côté du modèle peut effrayer les poissons. En observant le comportement des poissons, il ne semble pas que ça soit le cas parce que les zones de présence sont fort proches des parois transparentes.

### **Motivation des poissons**

Tous les poissons ne se comportent pas de la même façon et n'occupent pas leur territoire de la même façon. Les salmonidés adultes remontent le courant pour aller pondre leurs œufs en amont de la rivière. Le besoin de montaison est clairement présent pour cette espèce et c'est dans leur nature de vouloir remonter le courant. Dans le cas de ce travail, une espèce de fond est utilisée pour pouvoir analyser leur comportement avec différents substrats. Pour l'optimisation des substrats, des loches, ont été utilisées. Comme décrit dans la présentation de l'espèce dans la section *3-Matériel*, les loches ne vivent que sur une distance de 1km de long dans la rivière. Elles n'ont donc pas de besoin de montaison et elles n'effectuent qu'un déplacement pour satisfaire leur curiosité et pour l'exploration. Dans le modèle utilisé, il n'y a donc pas de motivation spécifique à ce que la loche remonte le courant. Les remontées sont donc fortement impactées par le caractère explorateur de l'individu.

De plus, placer des individus dans un modèle aux parois transparentes, après les avoir pêchés à l'épuisette, leur fait perdre beaucoup de repères. Une espèce migratrice n'aura pas forcément le réflexe de vouloir remonter la passe si elle est désorientée.

### **Comportement grégaire des poissons**

Certains poissons (dont les loches) sont des animaux qui vivent la plupart du temps en groupe et aiment sentir le contact de leurs congénères. Le fait de se retrouver seul dans un bassin peut s'accompagner d'une perte de confiance et les déplacements amont ne seraient pas favorisés par ce comportement grégaire.

### **Période de l'année avec température de l'eau**

Un autre élément primordial est la période de l'année à laquelle les analyses sont effectuées. Les poissons ont tendance à se déplacer dans leur environnement quand les conditions sont favorables. La température de l'eau, le besoin de nourriture ou de caches pour pondre sont des éléments importants à prendre en compte. Pour la réalisation du travail présent, les dates d'expérimentations sont limitées aux mois de février-mars-avril. Cette période peut ne pas convenir aux individus testés même si c'est durant le printemps que les plus grands déplacements prennent place.

## Alimentation

L'alimentation des poissons peut présenter une limitation lors des expérimentations. Dans leur milieu naturel, les espèces utilisées se nourrissent principalement de vers et de larves. Lorsqu'elles sont en captivité, la nourriture doit leur être fournie en quantité suffisante. Les poissons sont des êtres vivants très résistants au niveau nourriture (X. Rollin, comm. perso). Ils disposent de couches de graisse qui leur permet d'avoir une réserve d'énergie. Ainsi, un individu peut survivre pendant plusieurs semaines sans manger et la nourriture n'est généralement pas considérée comme un facteur limitant. Cependant, le fait de les placer dans un environnement qui leur demande une dépense d'énergie considérable exige de les nourrir correctement. L'effet du manque de nourriture prolongé peut avoir différentes conséquences:

- Le poisson puise dans ses réserves pour explorer la passe et trouver de la nourriture.
- Le poisson s'économise au maximum et ne cherche pas à se déplacer.

La nutrition des poissons est détaillée en annexe pour toute la période d'optimisation de substrat.

## Écoulement plaques plexiglass

Des plaques de plexiglass sont placées à la surface de l'eau pour améliorer l'accès optique lors des observations vidéo. Le fait de placer des plaques de plexiglass influence l'écoulement dans la passe. L'écoulement étant turbulent dans les bassins, des différences de niveau d'eau se créent. Comme montré sur la Figure 4.9, le niveau d'eau n'est pas horizontal et dès lors, il faut appuyer sur l'eau de manière à ce que toute la surface soit aplanie. Cet aplanissement, diminue la hauteur d'eau présente dans la passe et donc, pour un débit constant, la vitesse d'eau est accélérée principalement dans l'échancrure.

$$Q = v \times A$$

Avec  $Q$  représentant le débit,  $v$  la vitesse et  $A$  la section par laquelle le fluide s'écoule.

Cet incrément de vitesse est très léger, car le niveau d'eau ne bouge que de quelques millimètres mais cette différence est à noter.



Figure 4.9: Différence de hauteur d'eau dans le bassin



Figure 4.10: Pose de la plaque de plexiglass

### Imperfections du modèle

Le modèle en lui-même présente quelques déviations par rapport à la réalité de la passe de Rivière. Ces quelques imperfections changent les conditions dans lesquelles les poissons vont vraiment se trouver en réalité.

Tout d'abord, le bassin P5 est plus court sur le modèle réduit. étant donné que ce bassin était déjà le plus court des 6 bassins, cela crée une turbulence très forte. De plus, la hauteur du seuil entre le bassin P5 et P4 est plus élevée qu'ailleurs (12cm contre 2cm pour les autres seuils). Cela constitue un obstacle de taille pour les poissons de fond que sont les loches.

Enfin, une marche est présente sur les bassins P1, P2 et P3 et elle change l'écoulement de l'eau dans cette partie du bassin. Cette marche n'est pas présente dans le prototype de la passe réelle.

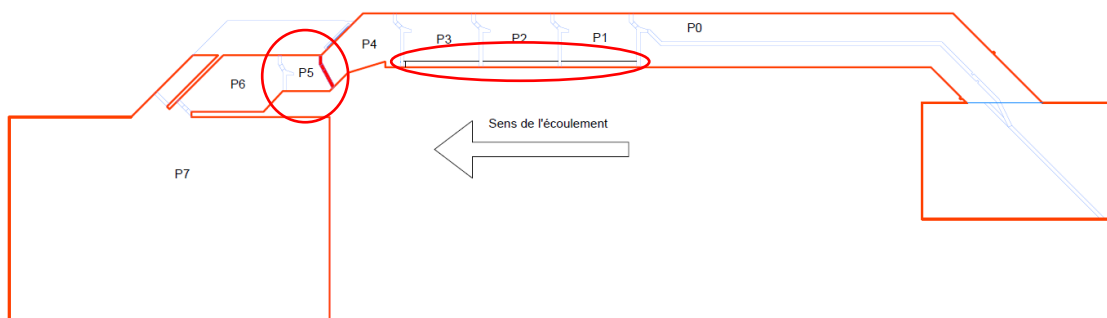


Figure 4.11: Présentation des imperfections de la passe



# Chapitre 5

---

## Optimisation

---

Dans cette section, les résultats de l'optimisation des substrats seront présentés. Chaque substrat sera présenté en deux phases. D'une part le comportement interbassin qui décrit les mouvements entre les différents bassins. Et d'autre part, le comportement intrabassin, qui explicite le comportement des loches dans le bassin en lui-même. Comparer les taux de déplacement amont, aval et de stabilité ne réunit pas toutes les informations nécessaires à l'optimisation la plus fidèle du substrat. Analyser le comportement dans un bassin permet d'observer plusieurs éléments :

- La répartition des loches dans un bassin et donc les zones de repos.
- Leur comportement général dans un bassin : savoir si les loches ont tendance à fort se déplacer dans le bassin et l'explorer ou bien plutôt à s'immobiliser dans une zone confortable.
- Comparer les zones de présence des loches avec les vitesses de l'eau pour mieux comprendre leur ressenti de l'environnement.

Les tests réalisés lors de l'optimisation du substrat se déroulent uniquement sur les 4 premiers bassins : P0 à P3 (Figure 5.1). Les bassins P1, P2 et P3 sont des bassins standards, cela permet d'avoir un environnement similaire pour tous les poissons. Les temps d'expérimentations sont séparés en deux groupes : des temps courts qui durent environ 4 heures et des temps longs qui durent une vingtaine d'heures. L'avantage de travailler avec deux types de durée est la comparaison qui peut être faite entre des tests diurnes et nocturnes. Le bassin initial est le bassin P2, ce qui permet un déplacement amont vers P0 ou P1, un déplacement aval vers P3 ou bien une stabilisation des individus dans P2. L'échancrure du seuil S4 est fermée pour éviter un déplacement aval trop important et maintenir les poissons dans les 3 bassins standards.

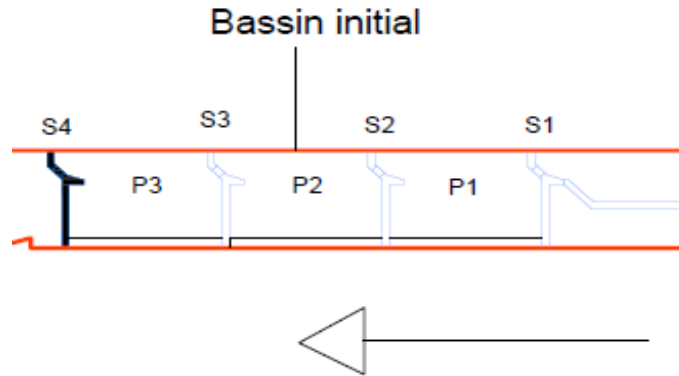


Figure 5.1: Présentation du bassin initial et placement du filtre

### Définitions spécifiques

Afin de faciliter la compréhension des résultats, il est nécessaire de prendre connaissance des définitions suivantes :

**Franchissement amont de seuil** : Passage d'un poisson provenant d'un bassin vers le bassin juste à l'amont de celui-ci.

**Franchissement aval de seuil** : Passage d'un poisson provenant d'un bassin vers le bassin juste à l'aval de celui-ci.

**Déplacement amont** : Ce terme est utilisé lorsqu'un poisson finit l'expérience un ou plusieurs bassins à l'amont de son bassin d'introduction.

**Déplacement nul (ou stabilité)** : Ce terme est utilisé lorsqu'un poisson finit l'expérience dans son bassin d'introduction.

**Déplacement aval** : Ce terme est utilisé lorsqu'un poisson finit l'expérience un ou plusieurs bassins à l'aval de son bassin d'introduction.

**Taux de déplacement/répartition amont** : Ce taux est un peu particulier, puisqu'intuitivement, il devrait être le rapport entre le nombre de déplacements à l'amont sur le nombre de poissons expérimentés. Ce n'est pas tout à fait le cas. Au cours de l'analyse des données, c'est le nombre maximum de poissons en amont du bassin d'introduction qui a été pris en compte. Le taux de déplacement amont est donc pris au « meilleur moment ».

$$\text{Taux de déplacement amont} = \frac{\# \text{Maximum de poissons à l'amont} * 100}{\# \text{Poissons expérimentés}} [\%]$$

**Taux de déplacement/répartition aval** :

$$\text{Taux de déplacement aval} = \frac{\# \text{Poissons à l'aval en fin de test} * 100}{\# \text{Poissons expérimentés}} [\%]$$

Taux de déplacement/répartition nul (ou stabilité) :

$$Taux\ de\ déplacement\ nul = 100 - Taux\ depl.\ amont - Taux\ depl.\ aval\ [\%]$$

Etant donné le caractère progressif des déplacements, le moment où les taux sont enregistrés coïncide très souvent avec la fin du test. Le fait de compter le taux de déplacement amont au meilleur moment permet de s'assurer que tous les poissons ayant réussi à franchir l'échancrure soient comptabilisés.

### Adimensionnalisation des graphes

Lors de l'obtention des graphes de densité de répartition et de vitesse, une adimensionnalisation a été effectuée. En effet, pour permettre une comparaison équitable des graphes, l'échelle de couleur doit être adaptée au nombre de détections. Ainsi, les différentes couleurs constituant l'échelle correspondront aux mêmes nombres de détections pour chaque type de substrat.

L'adimensionnalisation est présentée ci-dessous :

- 1) **Etablissement d'une échelle arbitraire** ( $Y_{max} = 2,5$  pour un nombre de détections de 500.000). Le  $Y_{min}$  vaut toujours -1 et correspond à  $10^{-1} = 1$  détection. Dès qu'il y a une détection sur un pixel, celle-ci est donc représentée.
- 2) **Détermination du  $Y_{max}$** . L'échelle va d'une couleur bleu foncé pour un nombre de détections très faible jusqu'à une couleur jaune pour un nombre de détection  $N$  valant  $10^{Y_{max}}$ . On applique alors une règle de trois sur le nombre de détections maximales par pixel. Faisons l'exemple pour la détermination du  $Y_{max}$  du substrat 0000.

$$N_{réf} = 10^{2,5} = 316,22$$

$$N_{0000} = N_{réf} * \frac{Nbr_{détéc0000}}{Nbr_{détécRef}} = 316,22 * \frac{218.251}{500.000} = 138,03$$

$$Y_{max0000} = \log_{10} 138,03 = 2,14$$

| Substrat  | Nombre détections | Ymin | Ymax |
|-----------|-------------------|------|------|
| Référence | 500.000           | -1   | 2,5  |
| 0000      | 218.251           | -1   | 2,14 |
| R42M      | 940.424           | -1   | 2,77 |
| C42M      | 691.302           | -1   | 2,64 |
| R44M      | 695.055           | -1   | 2,64 |
| R42E      | 445.095           | -1   | 2,45 |
| C84B      | 759.730           | -1   | 2,68 |
| C82B      | 247.015           | -1   | 2,19 |



## 5.1 Substrat 0000

### 5.1.1 Comportement interbassins

Pour commencer, il est important d'avoir une base de comparaison pour pouvoir critiquer les substrats. La passe à nu, sans aucun substrat, va incarner cette base. Le code pour l'absence de substrat est 0000.

#### 5.1.1.1 Descriptions des expériences et résultats

Tableau 5.1: Descriptions des lots et déplacements effectués

| N° lot | Durée | Nombre indiv. | Bassin initial | Période     | Date début | Enregistrement | Dépl. amont | Stable | Dépl. aval |
|--------|-------|---------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|--------|------------|
| 1      | 24h   | 29            | P1             | Jour & nuit | 15/02      | -              | 0           | 0      | 29         |
| 2      | 16h   | 30            | P2             | Jour & nuit | 15/03      | Vidéo          | 0           | 0      | 30         |
| 3      | 3h    | 26            | P2             | Jour        | 16/03      | Vidéo & visuel | 1           | 7      | 18         |
| 4      | 2h30  | 25            | P1             | Jour        | 16/03      | Vidéo & visuel | 2           | 7      | 16         |
| 5      | 4h    | 26            | P2             | Jour        | 03/04      | Vidéo & visuel | 1           | 22     | 3          |
| 6      | 16h30 | 25            | P2             | Jour & nuit | 03/04      | Vidéo          | 1           | 5      | 19         |
| Total  | 66h   | 161           |                |             |            |                | 5           | 41     | 115        |
| %      |       | 100%          |                |             |            |                | 3,1%        | 24,5%  | 71,4%      |

Les expériences sur la passe en l'absence d'éléments de macro-rugosité ont été effectuées durant trois périodes différentes. Le premier lot consistait en une expérience préliminaire d'une journée, les lots 2, 3 et 4 y ont été ajoutés entre les substrats R44M et C84B mi-mars et enfin, deux nouvelles expériences supplémentaires sans substrat ont été réalisées début avril. Bien que l'objectif soit l'optimisation du substrat, l'étude du comportement des loches sans substrat est probablement la plus importante puisqu'elle est la base de comparaison de toute l'étude de l'impact des substrats. C'est une des raisons pour laquelle il a été décidé de réaliser ces expériences à divers moments durant la période expérimentale.

Le premier lot s'est produit lorsque les caméras n'étaient pas encore fonctionnelles, ce qui n'a pas permis l'acquisition d'images.

Il ressort de ces six expériences sans substrat sur un total de 161 individus un taux de déplacement amont de 3,1%, ce qui est relativement faible. On remarque également que le taux de stabilité est d'approximativement 25% contre plus de 70% de déplacement aval.



Ces chiffres témoignent de la difficulté qu'ont les espèces benthiques et plus particulièrement les loches à remonter la passe et à se stabiliser dans le dispositif.

Néanmoins, cinq loches sont parvenues à remonter une échancrure, cela prouve qu'il est tout à fait possible pour ce type de poissons de remonter le courant. Dès que les poissons sont placés dans le bassin, on remarque vite qu'ils ne sont pas dans un environnement favorable. La loche étant un poisson de fond, elle affectionne les courants à faible vitesse, elle n'est pas avantagée par les recirculations du courant dans la passe.

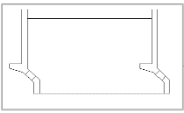
#### 5.1.1.2 Influence de la durée

Tableau 5.2: Comparaison des taux de répartition pour les temps longs et courts

|                        | Temps courts | Temps longs |
|------------------------|--------------|-------------|
| Déplacement amont [%]  | 5,2          | 1,2         |
| Pas de déplacement [%] | 46,8         | 5,9         |
| Déplacement aval [%]   | 48           | 92,9        |

La différence de déplacement interbassins se ressent fort entre les expériences longues et courtes. En effet, seulement 1,2% de déplacement amont est observé pour les longues expériences contre 4% pour les expériences courtes. De la même manière, plus de 90% des loches se retrouvent à l'aval après un temps long alors que près de 50% se stabilisent pour des temps courts. Plus la durée de l'expérience augmente plus la tendance générale est de se déplacer et/ou se faire emporter vers l'aval.

Lors de longs tests, il est remarqué que la quasi-totalité des loches descendent d'un bassin. Celles-ci bougent beaucoup durant les expériences et battent souvent de la queue pour ne pas être emportées par le courant. Ce n'est pas un mouvement continu mais régulièrement, les loches doivent faire un effort pour rester à leur place. On peut supposer qu'une certaine fatigue s'installe et a tendance à empêcher la stabilisation des loches sur le long terme.



### 5.1.2 Comportement intrabassin

Pour la passe sans substrat (0000), les zones de présence et la distribution des vitesses dans le bassin P2 sont représentées ci-dessous (Figure 5.2 & Figure 5.3).

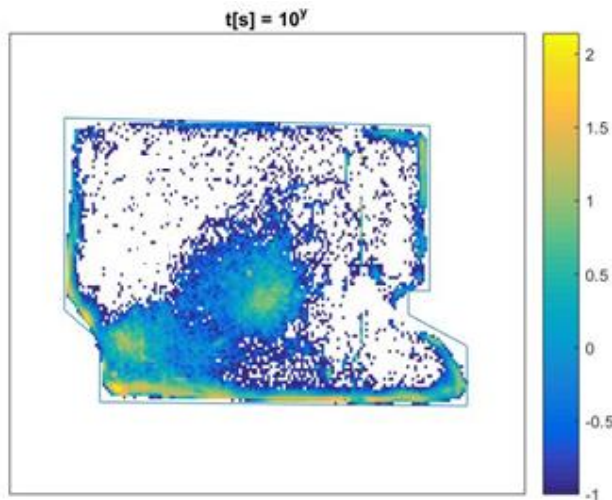


Figure 5.2: Densité de répartition en 0000

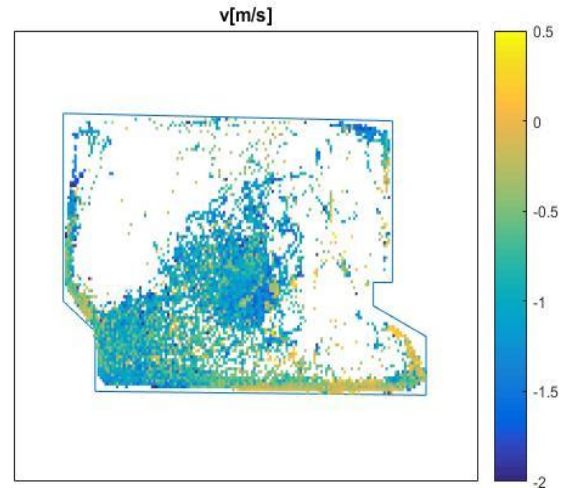


Figure 5.3: Répartition des vitesses en 0000

Les loches ont deux endroits de prédilection : le centre du bassin et le coin inférieur gauche. On retrouve également des zones de présences sur les côtés du bassin mais au vu de la couleur plus bleutée de ces zones, la présence des loches y est moins importante. Ces zones sont caractérisées par une vitesse du courant faible.

L'absence de substrat ne permet pas à la loche de se protéger du courant ou bien de s'abriter derrière des plots, elles ont donc tendance à glisser sur le fond de la passe qui ne présente pas un grand coefficient de frottement. De manière générale, les loches essaient de rester sur place et n'explorent que très peu la passe entière. Comme le montre le graphe, il reste de nombreuses zones blanches où aucune loche n'a été détectée. La loche étant une espèce grégaire, elle aime le contact avec les autres poissons et un regroupement est souvent observé. Les loches s'entassent ainsi pour former un groupe. Il est assez rare de voir un individu seul pendant une période prolongée.

La vitesse des différents individus a été représentée sur ce même plan de la passe afin de voir comment les loches se comportaient aux différents endroits. Dans les deux zones présentées précédemment, les vitesses sont assez faibles car les poissons restent immobiles. Dans la zone inférieure droite, le courant est plus important et la vitesse des poissons est donc plus élevée.

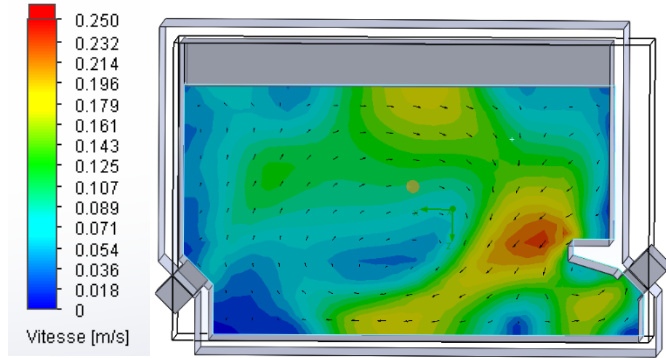
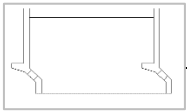


Figure 5.4: Champs de vitesse obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks à 1cm du fond pour 0000

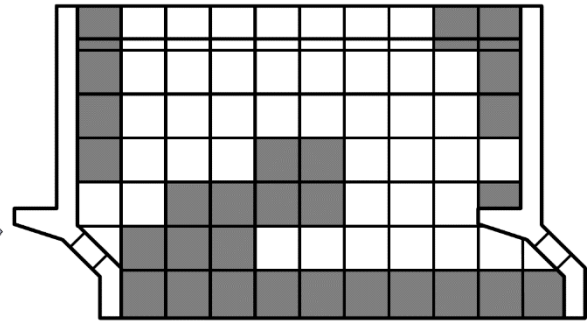
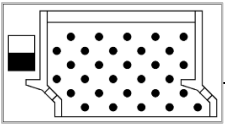


Figure 5.5: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en 0000

Ci-dessus, sont présentés les champs de vitesse obtenus par la modélisation numérique de l'écoulement. Les zones à faibles vitesses sont privilégiées par les poissons comme peut en témoigner la répartition simplifiée.



## 5.2 Substrat R42M

### 5.2.1 Comportement interbassins

Le premier substrat expérimenté est conçu sur base de plots ronds d'une hauteur de 2cm et de 4cm de diamètre. 30 plots sont disposés de manière homogène par bassin soit approximativement 60 plots/m<sup>2</sup> ce qui constitue une densité moyenne.

Les plots ont été collés sur des plaques en PVC, elles-mêmes vissées dans le fond de la passe pour éviter qu'elles ne flottent lors de l'arrivée d'eau. En raison de la pente et de la géométrie des bassins, il n'est pas évident d'emboîter les plaques PVC au millimètre près dans les différents bassins. Les plaques étant d'une épaisseur de 4mm, certains petits poissons parviennent à se faufiler à certains endroits entre ces plaques et les parois ou échancrures.

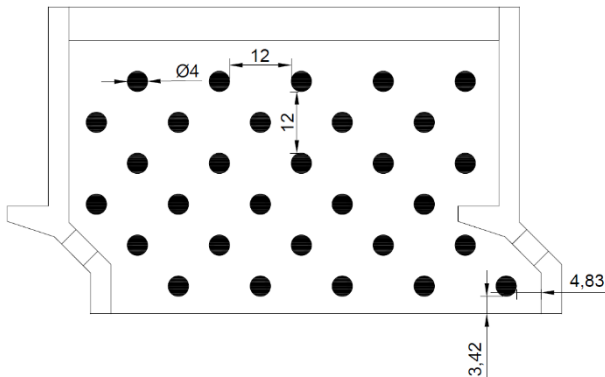


Figure 5.6: Répartition des plots pour le substrat R42M

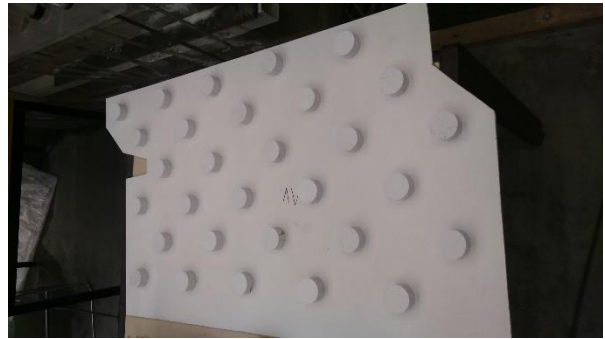
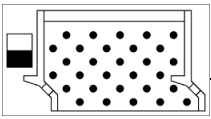


Figure 5.7: Plaque de fond d'un bassin où les substrats sont collés



5.2.1.1 Descriptions des expériences et résultats

Tableau 5.3: Descriptions des lots et déplacements effectués

| N° lot       | Durée      | Nombre indiv. | Bassin initial | Période     | Date début | Enregistrement | Dépl. amont  | Stable       | Dépl. aval   |
|--------------|------------|---------------|----------------|-------------|------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| 1            | 22h        | 19            | P1             | Jour & nuit | 22/02      | -              | 2            | 8            | 9            |
| 2            | 3h30       | 18            | P1             | Jour        | 07/03      | Vidéo & visuel | 5            | 6            | 7            |
| 3            | 18h30      | 26            | P2             | Jour & nuit | 07/03      | Vidéo          | 4            | 5            | 17           |
| 4            | 17h        | 30            | P2             | Jour & nuit | 08/03      | Vidéo          | 3            | 5            | 22           |
| 5            | 2h30       | 22            | P2             | Jour        | 09/03      | Vidéo & visuel | 6            | 12           | 4            |
| 6            | 4h         | 25            | P2             | Jour        | 04/04      | Vidéo & visuel | 1            | 18           | 6            |
| 7            | 16h30      | 25            | P2             | Jour & nuit | 04/04      | Vidéo          | 0            | 9            | 16           |
| 8            | 4h         | 26            | P2             | Jour        | 05/04      | Vidéo & visuel | 3            | 17           | 6            |
| <b>Total</b> | <b>88h</b> | <b>191</b>    |                |             |            |                | <b>24</b>    | <b>80</b>    | <b>87</b>    |
| <b>%</b>     |            | <b>100%</b>   |                |             |            |                | <b>12,6%</b> | <b>41,9%</b> | <b>45,5%</b> |

Les deux premiers essais ont eu lieu avant la standardisation, c'est la raison pour laquelle le bassin initial était le P1. L'expérimentation de ce substrat s'est déroulée en trois étapes. La première était un essai sans enregistrement en février. Par la suite, quatre expérimentations supplémentaires ont vu le jour avant de refaire une campagne de trois essais (6, 7 et 8) en début avril afin de vérifier la validité des résultats particulièrement bons de ce substrat.

Un graphique comparant les taux de répartition pour le substrat 0000 et R42M est présenté ci-dessous :

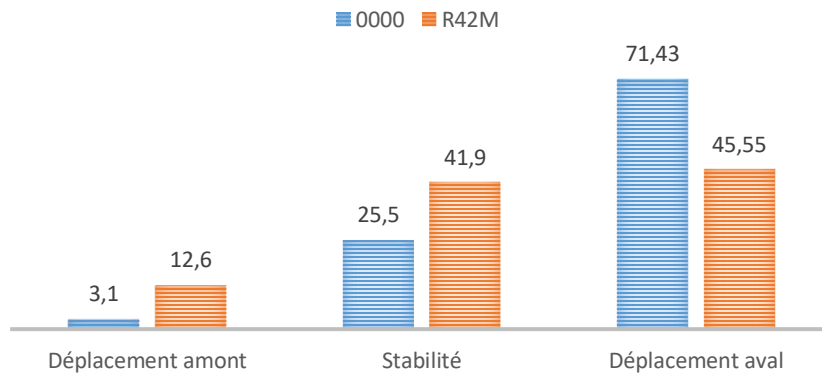
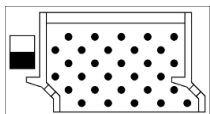


Figure 5.8: Taux de répartition 0000 et R42M (%)



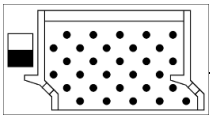
Sur l'ensemble des expériences de ce premier substrat, 12,6% des loches testées sont parvenues à remonter le courant alors que 41,9% se sont stabilisées et 45,5% se sont déplacées vers l'aval. Beaucoup plus de déplacements aval que de déplacements amont sont observés mais les résultats sont néanmoins bien meilleurs qu'en l'absence de substrats de fond. Les poissons se stabilisent assez bien dans la passe et plus de 10% d'entre eux se déplacent vers l'amont.

### 5.2.1.2 Influence de la durée

Tableau 5.4: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts

|                        | Temps courts | Temps longues |
|------------------------|--------------|---------------|
| Déplacement amont [%]  | 16,5         | 8,6           |
| Pas de déplacement [%] | 58,2         | 31,4          |
| Déplacement aval [%]   | 25,3         | 60            |

Pour les temps courts, un taux important de déplacement amont est observé. Les déplacements aval sont limités à un quart de la population. Pour les temps longs, ce taux de déplacement aval s'accroît nettement au détriment des deux autres déplacements. La présence du substrat R42M semble favoriser les déplacements amont et la stabilisation des poissons dans la passe. Les résultats sont bien meilleurs pour des expériences de courtes durées ce qui peut laisser penser à une accumulation de fatigue sur le long terme.



### 5.2.2 Comportement intrabassin

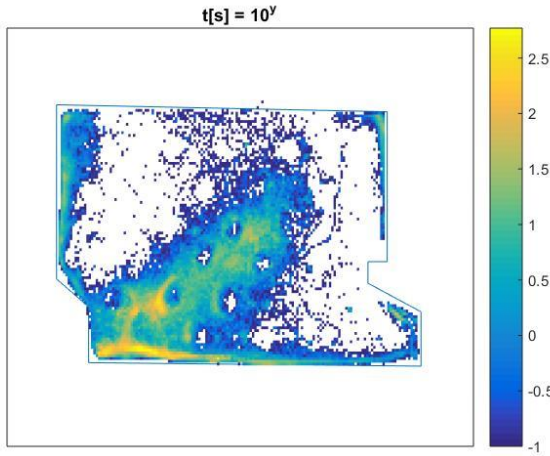


Figure 5.9: Densité de répartition en R42M

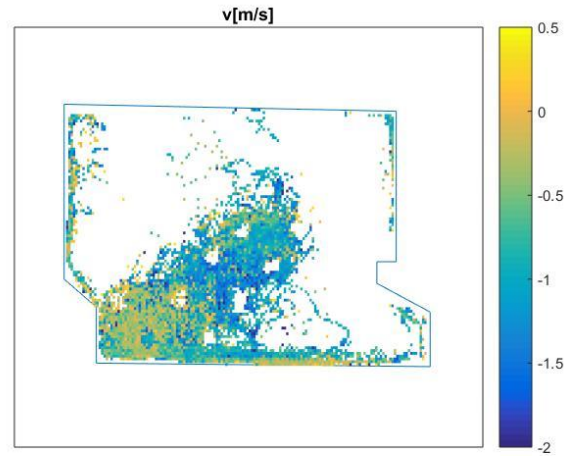


Figure 5.10: Répartition des vitesses en R42M

Une analyse du comportement intrabassin a permis de dresser les graphiques de densité de présence et de distribution des vitesses. La première observation qui saute aux yeux est la répartition générale des loches. Une présence dans les zones le long des parois verticales est constatée mais celle-ci ne représente pas une proportion importante de la répartition. On note une très forte présence dans le coin inférieur gauche et le long de la paroi verticale mais les loches s'aventurent également plus au centre de la passe. Cette zone couvre près de 75% de la diagonale liant deux coins opposés.

On remarque une répartition plus homogène des vitesses dans la zone de repos. Cela implique que les loches se déplacent plus allégrement dans cette zone et sont donc dans un environnement plus propice.

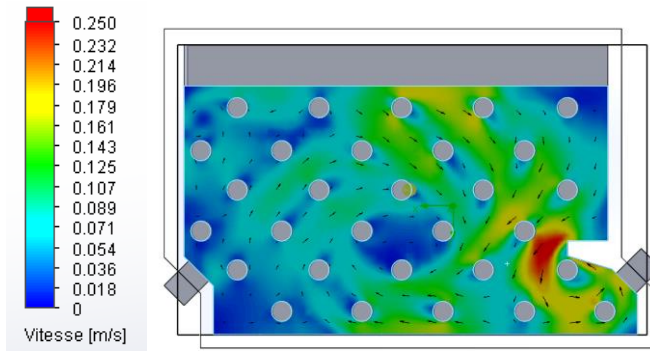


Figure 5.11: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour R42M

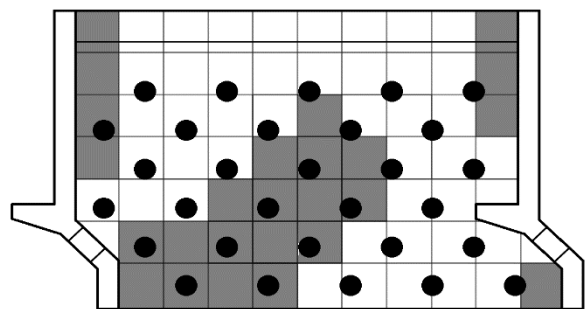
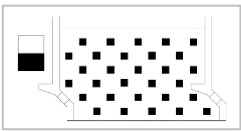


Figure 5.12: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en R42M

Lorsque l'on compare les zones de vitesse à 1cm du fond de la passe avec les zones de repos choisies par les loches, une corrélation est assez claire. Sur les extrémités du bassin, les zones à faibles vitesses sont favorisées par les poissons et concernant les zones principales, elles se situent bien dans les zones à faibles vitesses représentées sur le modèle numérique.



### 5.3 Substrat C42M

#### 5.3.1 Comportement interbassins

Le second type de substrat analysé est assez similaire au premier mais au lieu d’avoir des plots de forme ronde, ils seront carrés. Le fait de changer la forme du substrat provoque un écoulement local différent. Quand l’eau heurte un substrat rond, l’écoulement est dévié de façon à épouser la forme du plot. A l’inverse, avec un substrat carré, le courant peut frapper celui-ci de côté ou bien par la pointe et les lignes de courant sont différentes. Néanmoins, des interprétations proches de celles du premier substrat sont attendues. Ce substrat a été expérimenté en dernier lieu mais est présenté à la suite du R42M étant donné leurs similitudes géométriques.

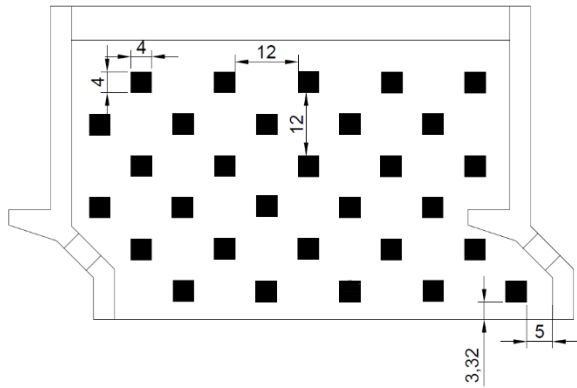


Figure 5.13: Répartition des plots pour le substrat C42M

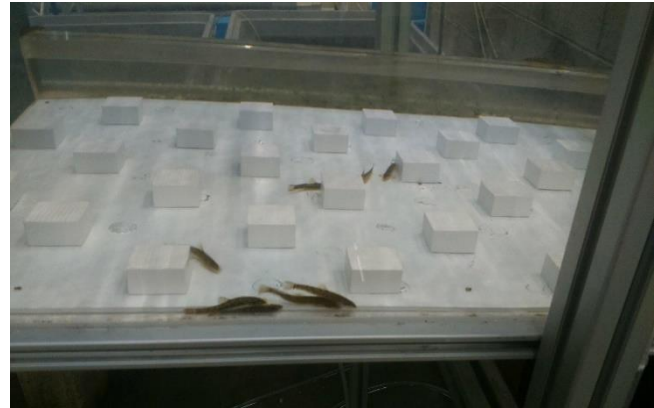
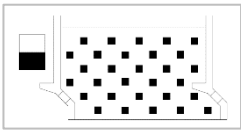


Figure 5.14: Substrat C42M dans la passe

##### 5.3.1.1 Descriptions des expériences et résultats

Tableau 5.5: Description des lots et déplacements effectués

| N° lot | Durée | Nombre indiv. | Bassin initial | Période     | Date début | Enregistrement | Dépl. amont | Stable | Dépl. aval |
|--------|-------|---------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|--------|------------|
| 1      | 17h   | 25            | P2             | Jour & nuit | 28/03      | Vidéo          | 0           | 13     | 12         |
| 2      | 4h    | 25            | P2             | Jour        | 29/03      | Vidéo & visuel | 4           | 12     | 9          |
| 3      | 17h30 | 25            | P2             | Jour & nuit | 29/03      | Vidéo          | 2           | 10     | 13         |
| 4      | 4h    | 25            | P2             | Jour        | 30/03      | Vidéo & visuel | 2           | 9      | 14         |
| Total  | 42h30 | 100           |                |             |            |                | 8           | 44     | 48         |
| %      |       | 100%          |                |             |            |                | 8%          | 44%    | 48%        |



Ce substrat a été expérimenté pour quatre lots différents, deux durant des périodes courtes et deux pour de longues périodes. Les expériences se sont étalées sur trois jours.

Comme on peut le voir sur le tableau, 8% de la population testée sur ce substrat parviennent à remonter au moins une échancrure dont 2% sont parvenus à remonter deux échancrures et arriver de cette manière à l’amont de la passe. Ces chiffres sont plus de deux fois supérieurs au cas du substrat 0000 mais inférieurs aux 12,6% de déplacements vers l’amont du substrat R42M.

Une comparaison des taux de répartition entre les trois premiers substrats (0000, R42M et C42M) sous forme d’histogrammes est proposée ci-dessous.

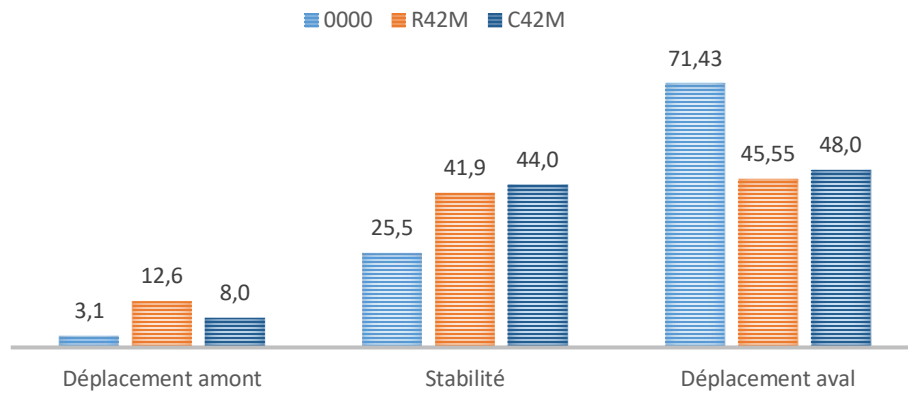


Figure 5.15: Taux de répartition 0000, R42M et C42M (%)

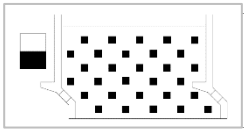
On observe une tendance globale des loches à se retrouver plus à l’amont dans le cas des substrats R42M et C42M par rapport au cas sans substrat. Les déplacements aval et les non-déplacements sont très similaires pour R42M et C42M. Seuls les déplacements vers l’amont sont légèrement plus faibles pour le substrat présent (C42M).

### 5.3.1.2 Influence de la durée

Tableau 5.6: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts

|                        | Temps courts | Temps longs |
|------------------------|--------------|-------------|
| Déplacement amont [%]  | 12           | 4           |
| Pas de déplacement [%] | 42           | 46          |
| Déplacement aval [%]   | 46           | 50          |

Pour le déplacement amont, les chiffres diffèrent fortement. Il y a en effet trois fois plus de déplacements amont lors des tests courts. Il se peut que certaines remontées ne soient pas enregistrées pour de longues expériences en raison de l’incapacité de filmer de nuit. Les deux autres paramètres (pas de déplacement et déplacement aval) sont quant à eux fort proches l’un de l’autre.



### 5.3.2 Comportement intrabassin

Les zones de présence et les distributions de vitesse ont été représentées sur les deux graphiques suivants.

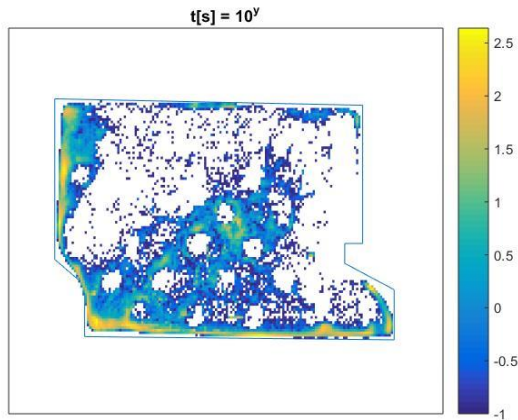


Figure 5.16 : Densité de répartition en C42M

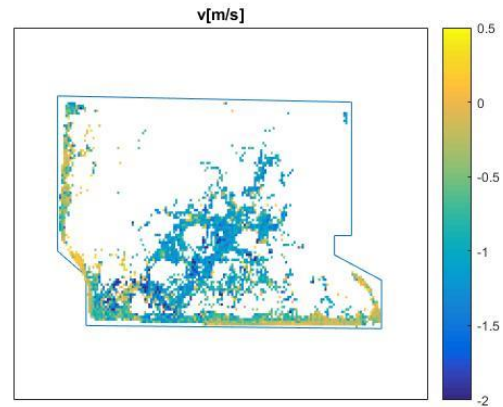


Figure 5.17: Répartition des vitesses en C42M

Les zones le long des parois sont fortement utilisées par les loches. Sur la paroi de gauche et celle du dessous, une forte densité est relevée. Comme pour le substrat R42M, la zone partant du coin inférieur gauche jusqu'au coin diagonalement opposé est continue. Une séparation en deux zones distinctes est difficilement envisageable, ce qui vérifie les données obtenues pour le substrat précédent. La superficie totale des zones de repos occupées démontre que les poissons utilisent efficacement les substrats. Des vitesses élevées sont observées principalement le long des parois. Au contour des substrats, ces vitesses sont modérées.

Ce test permet de confirmer les données obtenues sur le substrat R42M. Etant donné la forte similitude entre les deux types de plots, des répartitions équivalentes étaient attendues. De manière globale, les vitesses au sein de la passe sont moyennement élevées.

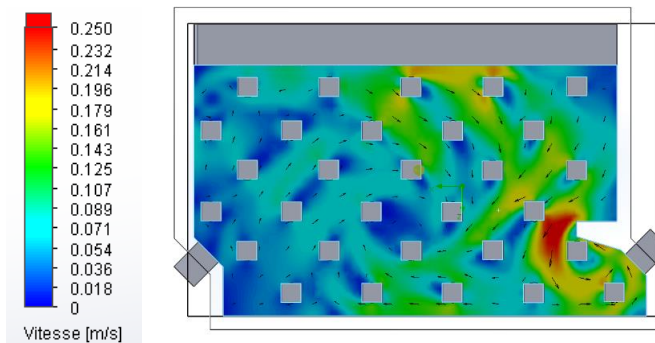


Figure 5.18: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour C42M

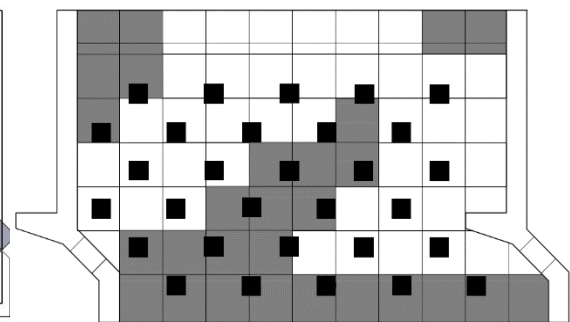
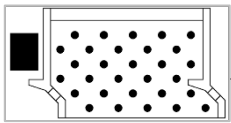


Figure 5.19 : Représentation simplifiée des zones de présence des loches en R42M

On remarque une différence dans l'écoulement local au droit des plots. La trainée située derrière les plots carrés est plus importante que dans le cas des plots de forme ronde. Cela crée une multitude de petites zones de repos où les loches peuvent s'y abriter.



## 5.4 Substrat R44M

### 5.4.1 Comportement interbassins

Dans l'optique d'optimiser la hauteur du substrat, une deuxième série de tests a été effectuée. Les substrats ont, cette fois, une hauteur de 4cm. Excepté cette variation de hauteur, les plots utilisés ont les mêmes caractéristiques que pour le substrat R42M. Les plots ont donc les propriétés suivantes : plots en PVC blancs, 4cm de diamètre, 4cm de hauteur, densité moyenne, soit 30 plots par bassin ou approximativement 60 plots/m<sup>2</sup>.

Avec cette disposition, une comparaison pourra être faite entre les plots de 2 et 4cm de hauteur. Il est important de ne faire varier qu'une seule caractéristique à la fois. Cette comparaison des taux de répartition pour le substrat de 4cm de haut avec le substrat de 2cm de haut apportera des informations importantes pour l'optimisation du substrat et plus particulièrement au niveau de sa hauteur.

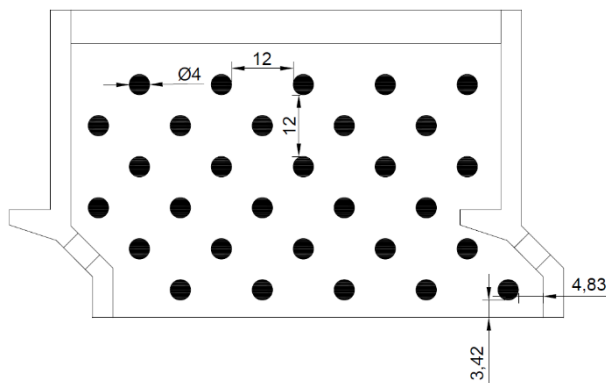


Figure 5.20: Répartition des plots pour le substrat R44M

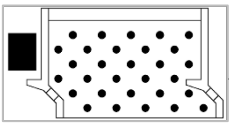


Figure 5.21: Substrat R44M dans la passe

#### 5.4.1.1 Descriptions des expériences et résultats

Tableau 5.7 : Description des lots et déplacements effectués

| N° lot       | Durée      | Nombre indiv. | Bassin initial | Période     | Date début | Enregistrement | Dépl. amont | Stable     | Dépl. aval   |
|--------------|------------|---------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|--------------|
| 1            | 23h        | 19            | P2             | Jour & nuit | 12/03      | Vidéo          | 0           | 0          | 19           |
| 2            | 18h        | 30            | P2             | Jour & nuit | 13/03      | Vidéo          | 1           | 1          | 28           |
| 3            | 3h         | 20            | P2             | Jour        | 14/03      | Vidéo & visuel | 0           | 12         | 8            |
| 4            | 17h        | 25            | P2             | Jour & nuit | 14/03      | Vidéo          | 1           | 6          | 18           |
| 5            | 4h         | 19            | P2             | Jour        | 15/03      | Vidéo & visuel | 2           | 7          | 10           |
| <b>Total</b> | <b>65h</b> | <b>113</b>    |                |             |            |                | <b>4</b>    | <b>26</b>  | <b>83</b>    |
| %            |            | 100%          |                |             |            |                | <b>3,6%</b> | <b>23%</b> | <b>73,4%</b> |



Les cinq expériences ont toutes eu lieu dans la même semaine. Trois d’entre elles étaient de longues durées, les deux autres de courtes durées. Au total, 113 individus ont été testés sur les 160 disponibles à Châtelet. Par conséquent, les loches n’ont été testées qu’une seule fois de la semaine et aucun phénomène de fatigue n’est possible.

Avec 3.6% de déplacement amont, le taux de remontée est le plus faible des différents substrats testés jusqu’à présent. Un autre élément interpellant est le fait qu’il y ait un taux de déplacement aval très important. Des chiffres aussi hauts sont principalement dûs aux deux premières expériences qui n’ont occasionné qu’un seul maintien et un seul déplacement amont, le reste des individus s’étant déplacés vers l’aval. Si on compare le substrat présent (R44M) à son homologue d’une hauteur deux fois moindre (R42M) et au cas sans substrat (0000) en termes de taux de répartition en fin d’expérimentation, on obtient :

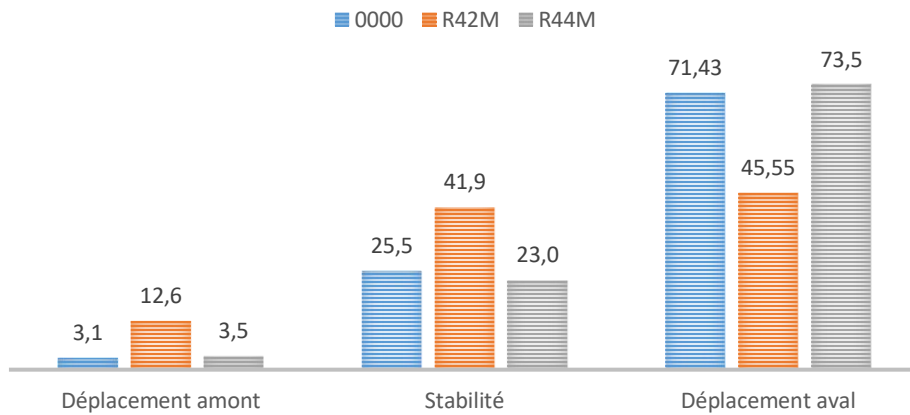


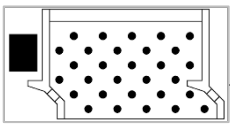
Figure 5.22: Taux de répartition 0000, R42M et R44M (%)

Le taux de déplacement vers l’aval du substrat présent est largement supérieur à celui obtenu sur R42M. De la même manière, les déplacements vers l’amont et le pourcentage de stabilité sont bien moins élevés pour R44M. En effet, les résultats obtenus sont beaucoup plus proches du cas sans substrat. Par conséquent, le substrat optimisé sera constitué de plots d’une hauteur de 2cm.

5.4.1.2 Influence de la durée

Tableau 5.8: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts

|                        | Temps courts | Temps longs |
|------------------------|--------------|-------------|
| Déplacement amont [%]  | 5,1          | 2,7         |
| Pas de déplacement [%] | 48,7         | 9,5         |
| Déplacement aval [%]   | 46,2         | 87,8        |



La différence entre les expériences courtes et longues est très marquée. En effet, un pourcentage plus important de déplacement est observé pour les expériences longues mais moins de loches se retrouvent à l'amont. Plus la durée de l'expérience augmente plus les loches ont tendance à se diriger/se faire emporter vers l'aval. Cette différence est en partie due aux mauvais résultats des deux premières expériences, toutes deux réalisées pour des temps longs.

#### 5.4.2 Comportement intrabassin

La variation d'hauteur va modifier les vitesses dans le fond et pourrait potentiellement impacter les zones de repos et les vitesses des poissons. Les deux graphiques présentés ci-dessous permettront d'évaluer l'impact de ce changement sur les comportements à l'intérieur du bassin P2.

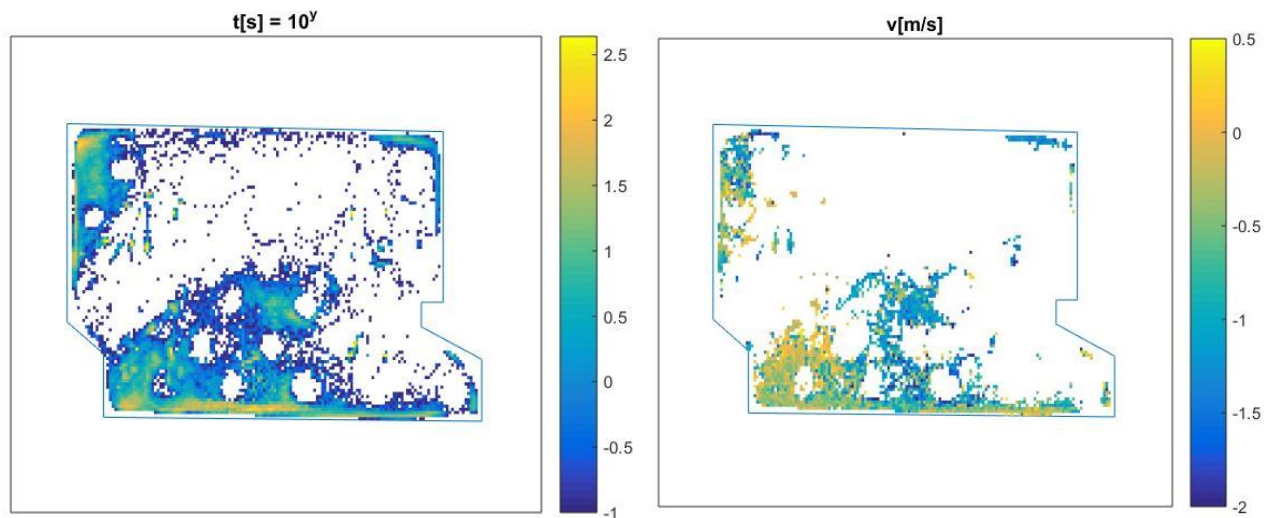


Figure 5.23: Densité de répartition en R44M

Figure 5.24: Répartition des vitesses en R44M

Les zones semblent assez fragmentées avec une répartition plus séparée que précédemment.

La zone supérieure gauche a pris beaucoup d'ampleur pour ce substrat, elle est désormais affectionnée par les spécimens et s'étend même entre les substrats. Les autres zones périphériques ne semblent pas suivre ce même phénomène et continuent à accueillir des loches uniquement près des parois verticales.

La zone inférieure gauche et la zone centrale sont toujours peuplées mais sont moins grandes que précédemment. Le graphe montre clairement que la plupart des loches se placent entre la paroi verticale du bassin et les premiers substrats. Ces zones sont toujours occupées par un grand nombre d'individus car les substrats les protègent efficacement des courants de recirculation. Peu de loches sont enclines à délaisser cette zone très favorable pour une zone légèrement moins favorable. Comme énoncé plus haut, le mode de vie grégaire des loches peut potentiellement les encourager à rester groupées.

Concernant la vitesse, il est facilement observable que les vitesses les plus élevées se trouvent dans la zone de courant et les plus faibles près des parois.

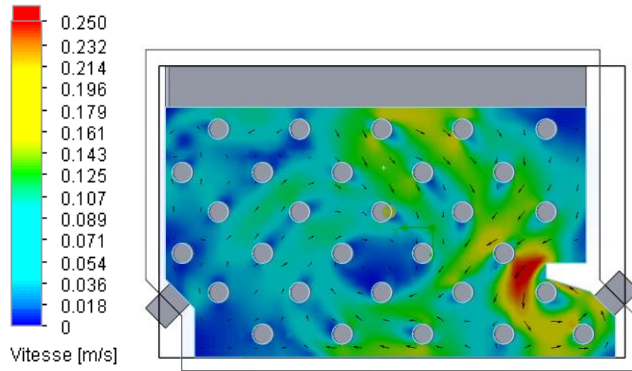
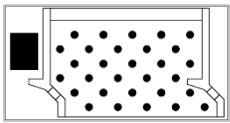


Figure 5.25: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour R44M

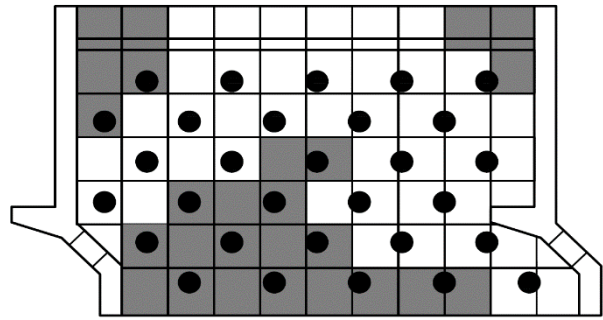
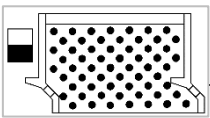


Figure 5.26: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en R44M

De manière générale, les zones de repos sont des zones à faibles vitesses. Sur le modèle numérique, chaque substrat crée derrière lui une trainée où la vitesse est faible et où une loche pourrait se sentir sécurisée. Ces zones ne sont pas énormément utilisées et une manière de l'expliquer est le fait que ces zones sont restreintes et ne permettent pas à plusieurs loches de s'y abriter.



## 5.5 Substrat R42E

### 5.5.1 Comportement interbassins

Le cinquième type de substrat à être présenté est composé d'éléments de macro-rugosité ronds de 4cm de diamètre, 2cm de hauteur et de densité élevée. Il y a donc 60 plots par palier soit approximativement 120plots/m<sup>2</sup>. Il s'agit des mêmes plots (R42) mais présents en quantité deux fois plus nombreuse dans chaque bassin.

Ce type de substrat va permettre d'analyser l'impact d'une haute densité de plots pour une faible hauteur. La densité risque d'affaiblir l'attractivité entre les différents bassins de la passe. Les poissons sont naturellement attirés par le courant alors que les substrats servent de protection face à ce courant. Il y a donc un juste milieu à trouver entre la protection du courant offerte par un substrat et sa capacité à maintenir une attractivité suffisante de l'échancrure amont (voir Annexe A: Lexique).

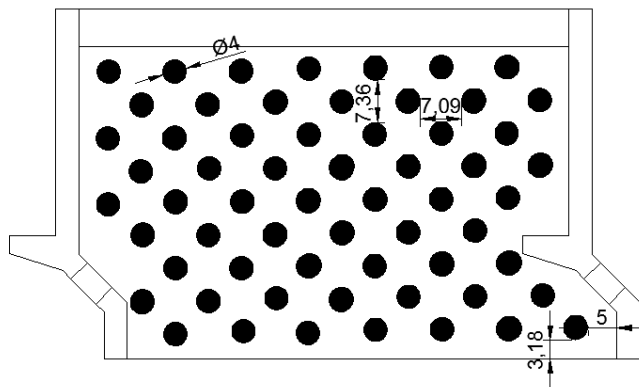


Figure 5.28: Répartition des plots pour le substrat R42E

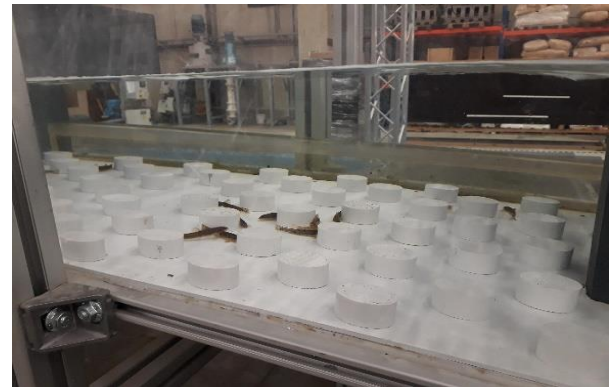
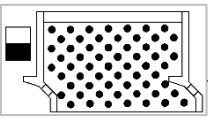


Figure 5.27: Substrat R42E dans la passe

#### 5.5.1.1 Descriptions des expériences et résultats

Tableau 5.9: Description des lots et déplacements effectués

| N° lot | Durée | Nombre indiv. | Bassin initial | Période     | Date début | Enregistrement | Dépl. amont | Stable     | Dépl. aval |
|--------|-------|---------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|------------|
| 1      | 16h30 | 25            | P2             | Jour & nuit | 26/03      | Vidéo          | 2           | 7          | 16         |
| 2      | 4h    | 25            | P2             | Jour        | 27/03      | Vidéo & visuel | 1           | 13         | 11         |
| 3      | 17h30 | 25            | P2             | Jour & nuit | 27/03      | Vidéo          | 0           | 13         | 12         |
| 4      | 4h    | 25            | P2             | Jour        | 28/03      | Vidéo & visuel | 0           | 12         | 13         |
| Total  | 42h   | 100           |                |             |            |                | <b>3</b>    | <b>45</b>  | <b>52</b>  |
| %      |       | 100%          |                |             |            |                | <b>3%</b>   | <b>45%</b> | <b>52%</b> |



Une centaine d'individus sur les 150 disponibles ont été testés sur ce substrat. Quatre expériences ont été effectuées, deux longues et deux courtes. Les tests se sont enchaînés durant trois jours.

Un fort taux de déplacement vers l'aval est observé. Malgré cela, une bonne partie des individus se maintiennent dans le bassin de départ (45%), ce qui indique une certaine aisance à se maintenir dans la passe. Le fait qu'une bonne partie des individus parviennent à se stabiliser dans la passe mais ne remontent pas laisse penser que l'attractivité de l'échancrure amont est assez faible et donc que les poissons sont trop protégés du courant.

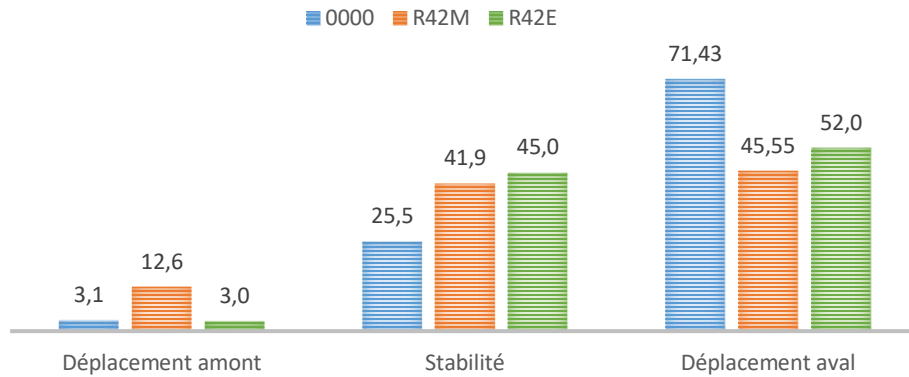


Figure 5.29: Taux de répartition en 0000, R42M et R42E [%]

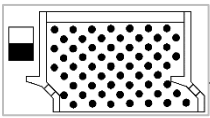
Une comparaison entre les deux substrats de référence jusqu'à maintenant, R42M et 0000, permet de mettre en évidence des similitudes entre les substrats R42M et R42E quant au taux de stabilité et de déplacement aval dans la passe alors que le taux de déplacement amont s'apparente plus au cas sans substrat. Une première interprétation informe sur une capacité à se maintenir dans le bassin d'introduction mais un désir assez faible d'explorer l'amont de la passe.

### 5.5.1.2 Influence de la durée

Tableau 5.10: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts

|                        | Temps courts | Temps longs |
|------------------------|--------------|-------------|
| Déplacement amont [%]  | 2            | 4           |
| Pas de déplacement [%] | 50           | 40          |
| Déplacement aval [%]   | 48           | 56          |

Les expériences longues sont sujettes à légèrement plus de déplacements à l'amont comme à l'aval. Les loches ne semblent pas avoir de problème à se maintenir longuement dans la passe bien que les déplacements vers l'aval augmentent sensiblement avec le temps. On note qu'en augmentant la densité du substrat, les conditions de nage sont à priori moins contraignantes. La durée de l'expérimentation n'a pas un impact aussi important que pour la passe sans substrat.



Les résultats pour une densité haute étant moins probants que ceux pour une densité moyenne pour des substrats ronds d'une hauteur de deux centimètres, c'est la densité moyenne qui sera retenue pour les plots R42.

### 5.5.2 Comportement intrabassin

Une densité haute favorise les zones de repos et les multiplie. Les deux graphiques utilisés comme support de l'analyse intrabassin pour le substrat étudié sont présentés ci-dessous :

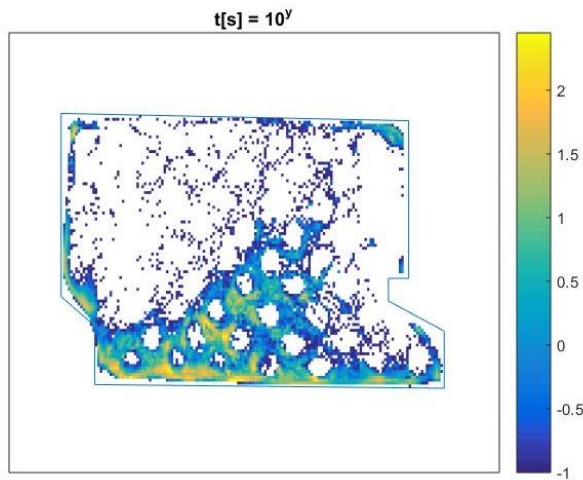


Figure 5.30 : Densité de répartition en R42E

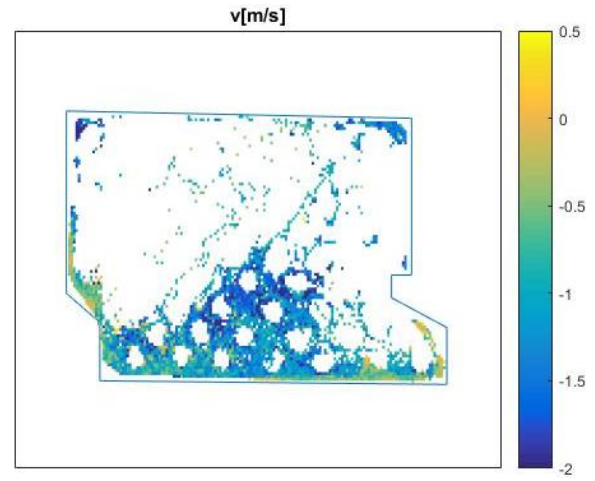


Figure 5.31: Répartition des vitesses en R42E

Il est clair, en regardant l'image ci-dessus (Figure 5.30), que la densité élevée des plots favorise les zones à faibles vitesses et donc homogénéise fortement la répartition des loches. Les zones jaunes, à longue durée de présence, sont disséminées partout dans ces zones. Cela prouve que les zones de repos sont bien plus dispersées pour ce type de substrat. Une distinction est souvent réalisée entre la zone centrale et la zone inférieure gauche mais dans ce cas-ci, il est impossible d'y voir une discontinuité. On note que les vitesses des poissons dans cette large zone de repos sont assez faibles. L'absence de mouvement implique une implantation prolongée dans cette zone et une exploration délaissée.

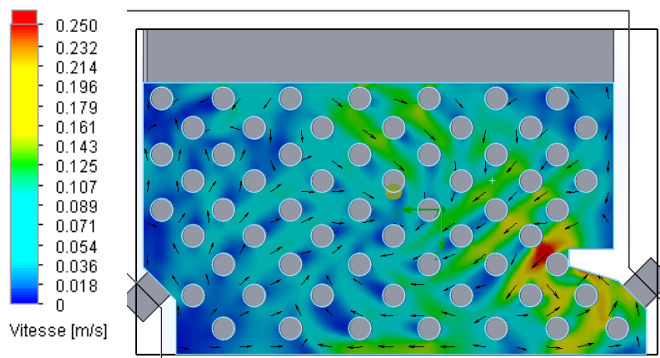


Figure 5.32: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour R42E

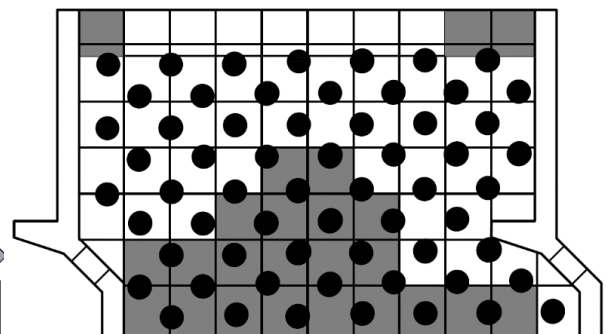
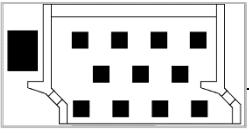


Figure 5.33: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en R42E



## 5.6 Substrat C84B

### 5.6.1 Comportement interbassins

L'analyse sur des plots de 4cm de côté/diamètre ayant déjà été réalisée, on s'intéresse maintenant à des plots beaucoup plus grands de 8cm de côté et 4cm de hauteur présents en beaucoup moins grand nombre (11 par bassin).

Cette disposition va créer des zones protégées plus grandes que précédemment avec de plus gros obstacles pour le courant. Lors de l'analyse du substrat R44M, il a été postulé que les substrats de 2cm de hauteur avaient une efficacité supérieure à ceux de 4cm. Pour confirmer cette affirmation, d'autres expérimentations ont été réalisées avec des plots plus larges utilisant une hauteur de 4cm. Il semble y avoir un problème lié à l'attractivité de l'échancrure amont du bassin lorsque les obstacles sont plus conséquents. Au moyen des expérimentations sur ce nouveau substrat, deux objectifs sont visés :

1. Infirmer ou confirmer que les hauteurs de 4cm sont moins efficaces que celles de 2cm.
2. Comparer l'efficacité d'une disposition des plots en gros blocs avec une répartition plus homogène dans la passe.

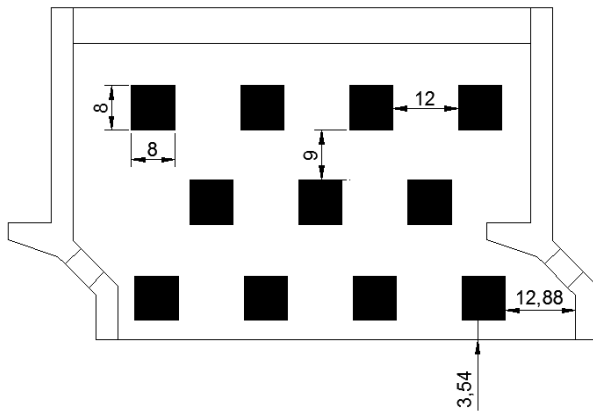
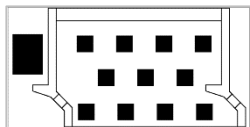


Figure 5.35: Répartition des plots pour le substrat C84B



Figure 5.34: Substrat C84B dans la passe



5.6.1.1 Descriptions des expériences et résultats

Tableau 5.11: Descriptions des lots et déplacements effectués

| N° lot       | Durée        | Nombre indiv. | Bassin initial | Période     | Date début | Enregistrement | Dépl. amont | Stable       | Dépl. aval   |
|--------------|--------------|---------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|--------------|--------------|
| 1            | 3h30         | 25            | P2             | Jour        | 20/03      | Vidéo          | 0           | 12           | 13           |
| 2            | 17h15        | 20            | P2             | Jour & nuit | 20/03      | Vidéo & visuel | 0           | 14           | 6            |
| 3            | 4h           | 26            | P2             | Jour        | 21/03      | Vidéo          | 1           | 18           | 7            |
| 4            | 20h          | 25            | P2             | Jour & nuit | 21/03      | Vidéo & visuel | 2           | 12           | 11           |
| <b>Total</b> | <b>44h45</b> | <b>96</b>     |                |             |            |                | <b>3</b>    | <b>56</b>    | <b>37</b>    |
| %            |              | 100%          |                |             |            |                | <b>3,1%</b> | <b>58,3%</b> | <b>38,5%</b> |

Une population totale de 96 loches a été utilisée pour ce type de substrat. Elle a été fractionnée en 4 lots distincts. Deux expérimentations ont eu lieu uniquement le jour, il s’agit de tests courts (4h). Deux autres se sont déroulées sur deux jours, le jour et la nuit pour une durée approximative de 20h.

Il est clair que la majorité des loches tendent à rester dans le bassin où elles ont été placées. Du point de vue des remontées, les chiffres ne sont pas très impressionnants. Il sera intéressant de comparer ces chiffres à ceux du substrat C82B correspondant à la même disposition mais pour des plots d’une hauteur deux fois moindre.

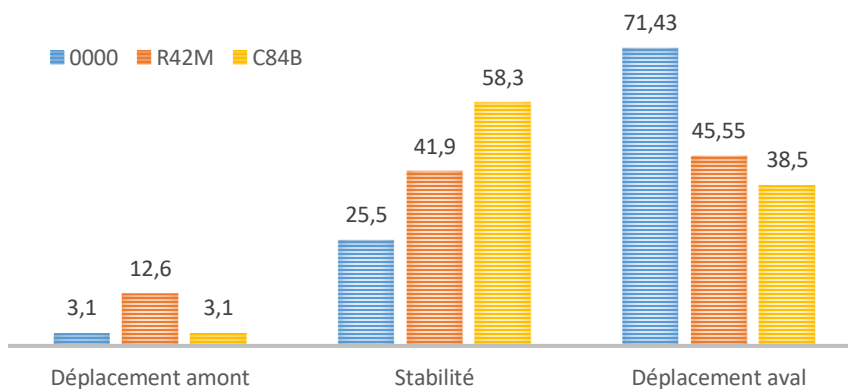
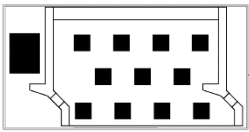


Figure 5.36 : Taux de déplacement en 0000, R42M et C84B

Les déplacements interbassins obtenus avec le substrat actuel comparés aux deux substrats références 0000 et R42M montrent une tendance à se stabiliser dans le bassin. En effet, le taux de



stabilité est largement supérieur alors que les déplacements vers l'aval sont les plus faibles observés jusqu'à maintenant. Un grand nombre de loches reste donc dans le bassin P2 sans songer à se mouvoir vers le bassin amont. L'échancrure amont ne semble donc pas attirer les poissons outre mesure et cela est potentiellement dû à une surprotection des substrats.

5.6.1.2 Influence de la durée

Tableau 5.12: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts

|                        | Temps courts | Temps longs |
|------------------------|--------------|-------------|
| Déplacement amont [%]  | 2            | 4,4         |
| Pas de déplacement [%] | 58,8         | 57,8        |
| Déplacement aval [%]   | 39,2         | 37,8        |

La durée n'a dans ce cas-ci presque aucune influence sur la quantité et le type de déplacements des individus expérimentés. Cela révèle une protection importante des zones de repos, les individus n'ont pas de mal à se maintenir dans la passe.

5.6.2 Comportement intrabassin

Le substrat présent est plus large et plus haut ce qui change donc la physionomie des zones de repos. La répartition des loches sur le substrat C84B ainsi que la distribution des vitesses est présenté ci-dessous :

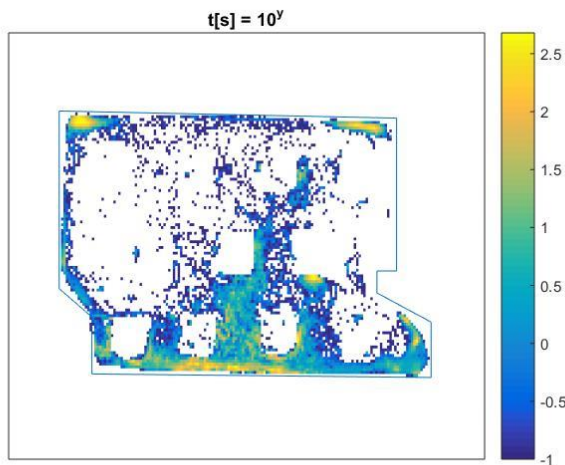


Figure 5.37 Densité de répartition en R42E

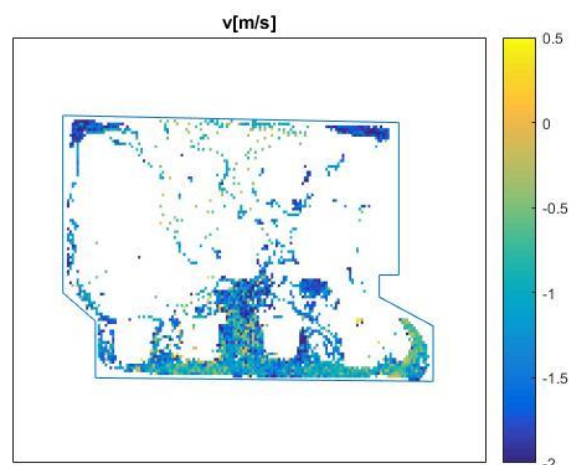
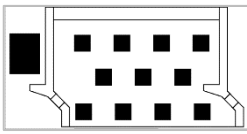


Figure 5.38: Répartition des vitesses en C84B

Tout d'abord, les substrats étant forts larges, les zones protégées sont aussi, proportionnellement grandes. La zone de repos privilégiée par les loches est celle le long de la paroi inférieure sur le graphique. Cette zone se prolonge vers le centre du bassin. Comme montré sur le graphe de densité totale (Figure 5.37), cette zone de repos est étirée sur tout le long de la paroi vers la droite du bassin avec quelques incursions entre les substrats.



Les loches se placent également sur la marche (Figure 5.39). Cette zone ne profite pas de la présence de substrat. De ce fait, les loches sont surélevées dans cette partie-là du bassin et les zones où le courant est faible ne sont pas concernées par ce qui se passe plus en profondeur.

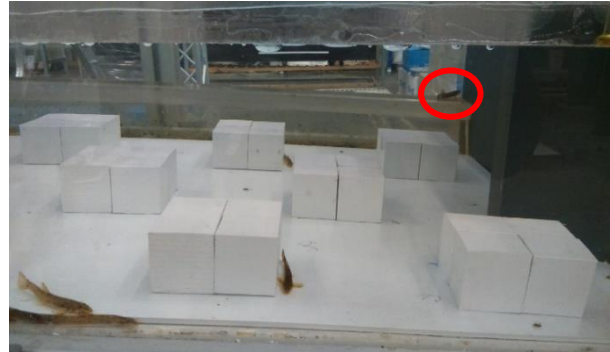


Figure 5.39: Présence de loches au dessus de la marche

Une différence frappante se marque sur le graphe des distributions de vitesse. Si on compare celui-ci (Figure 5.38) avec les précédents graphes des vitesses, on observe une couleur davantage bleutée ce qui témoigne du faible mouvement présent dans la passe. Les poissons semblent paisiblement installés, l'aménagement leur semble confortable.

Globalement, la répartition des loches est assez homogène sur la partie inférieure de graphe. De nombreuses loches se placent entre les substrats et la paroi verticale comme peut en témoigner la zone en jaune mais les loches affectionnent également les espaces entre les substrats eux-mêmes. Cela favorise la multiplication et l'agrandissement de zones de repos propices à la récupération des poissons.

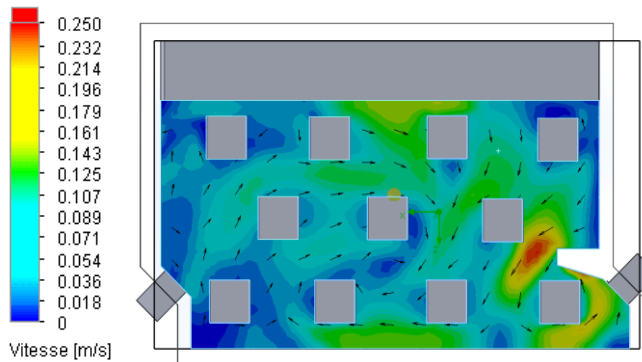


Figure 5.40: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour C84B

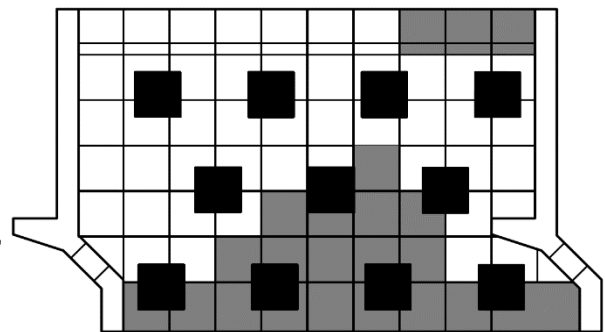
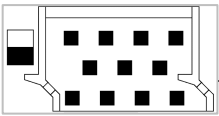


Figure 5.41: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en C84B

Ci-dessus, une comparaison entre les zones de repos observées et les vitesses de courant calculées par analyse numérique. Les zones à faible vitesse et les zones de repos correspondent assez bien. Cependant, pour la zone située dans la partie inférieure du graphe, des vitesses de fluide avoisinent 0.125 m/s et cette vitesse devrait gêner les loches alors qu'en réalité ce n'est pas le cas.



## 5.7 Substrat C82B

### 5.7.1 Comportement interbassins

Le dernier type de substrat à être présenté est un substrat carré de 8cm de côté, 2cm de hauteur et de densité faible. Ce substrat possède les mêmes caractéristiques que le précédent mais avec une hauteur deux fois moins importante.

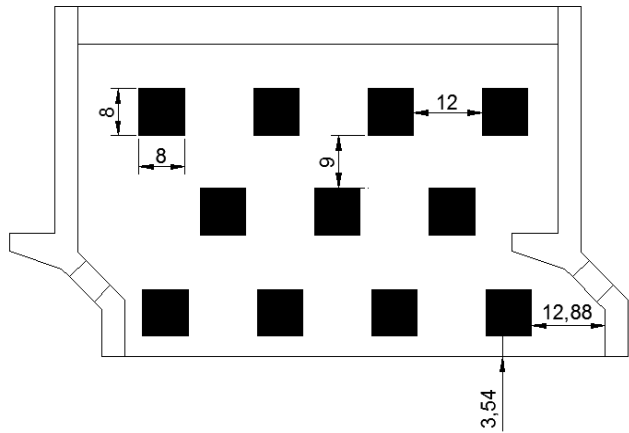


Figure 5.43: Répartition des plots pour le substrat C84B



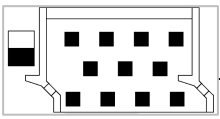
Figure 5.42: Substrat C82B dans la passe

#### 5.7.1.1 Descriptions des expériences et résultats

Quatre expérimentations ont eu lieu pour ce substrat (3 courtes pour une longue). Il n'a pas été possible de réaliser un deuxième test de type long.

Tableau 5.13: Descriptions des lots et déplacements effectués

| N° lot | Durée | Nombre indiv. | Bassin initial | Période     | Date début | Enregistrement | Dépl. amont | Stable | Dépl. aval |
|--------|-------|---------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|--------|------------|
| 1      | 3h    | 25            | P2             | Jour        | 22/03      | Vidéo & visuel | 0           | 13     | 12         |
| 2      | 15h30 | 25            | P2             | Jour & nuit | 22/03      | Vidéo          | 3           | 9      | 13         |
| 3      | 4h    | 26            | P2             | Jour        | 23/03      | Vidéo & visuel | 1           | 14     | 11         |
| 4      | 4h    | 25            | P2             | Jour        | 26/03      | Vidéo & visuel | 0           | 14     | 11         |
| Total  | 26h30 | 101           |                |             |            |                | 4           | 50     | 47         |
| %      |       | 100%          |                |             |            |                | 4%          | 49,5%  | 46,5%      |



Globalement, les trois expériences courtes suivent le même déroulement. Un fort déplacement initial, et après une heure, une stabilisation est observée. Malgré les efforts pour stabiliser au maximum le lot lors du lancement du test, un pourcentage significatif se déplace en P3 dès le début. Il faut noter les déplacements amont du palier P3 au palier P2. Ces chiffres ne sont pas repris dans les taux de répartition mais cela signifie que le poisson se trouve dans d'assez bonnes conditions pour continuer l'exploration même après être passé en P3.

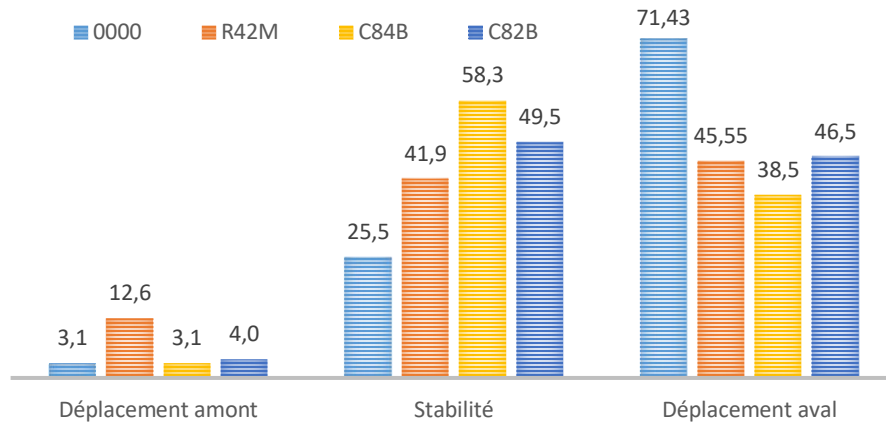


Figure 5.44: Taux de déplacement en 0000, R42M, C84B et C82B

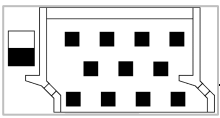
Les expériences sont plus courtes que pour le substrat C84B et malgré cela, plus de déplacements sont observés ce qui témoigne du fait que les poissons se sentent moins à leur aise dans les différents bassins. On retrouve légèrement plus d'individus en amont que pour le substrat précédent. Néanmoins, les résultats sont trop proches que pour pouvoir affirmer que les plots d'une hauteur de 2cm sont plus efficaces que ceux de 4cm.

Toujours est-il que les déplacements interbassins sont moins dirigés vers l'amont que pour les substrats R42M et C42M.

5.7.1.2 Influence de la durée

Tableau 5.14: Comparaison des taux de répartition pour temps longs et courts

|                        | Expérimentation courtes | Expérimentations longues |
|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Déplacement amont [%]  | 1,3                     | 12                       |
| Pas de déplacement [%] | 53,9                    | 36                       |
| Déplacement aval [%]   | 44,8                    | 52                       |



On remarque que les chiffres diffèrent d'un type d'expérience à l'autre. Le fait de n'avoir eu qu'une seule expérience longue a son importance car il n'y a que 25 loches testées contre 75 pour les expériences longues ce qui risqué, si on se fie trop étroitement aux chiffres, de mener à des conclusions hâtives.

Plus de déplacements interbassins sont observés pour les expérimentations longues. Un élément marquant pour les substrats de section supérieure (C82B et C84B) est le fait qu'un plus grand nombre de déplacements vers l'amont soit observé pour les expériences longues. Etant donné qu'il n'y a eu qu'une seule expérience longue, les chiffres présentés sont à critiquer.

### 5.7.2 Comportement intrabassin

La hauteur du substrat actuel est deux fois moindre que pour le substrat précédent. Cette différence de hauteur peut avoir un effet sur l'efficacité à protéger les loches. Ci-dessous, le total des détections enregistrées pour les expérimentations longues et courtes.

Les graphiques de zones de présence et distributions de vitesse du bassin P2 pour le substrat C82B sont proposés ci-dessous (Figure 5.45 & Figure 5.46) et constituent le principal support de l'analyse intrabassin.

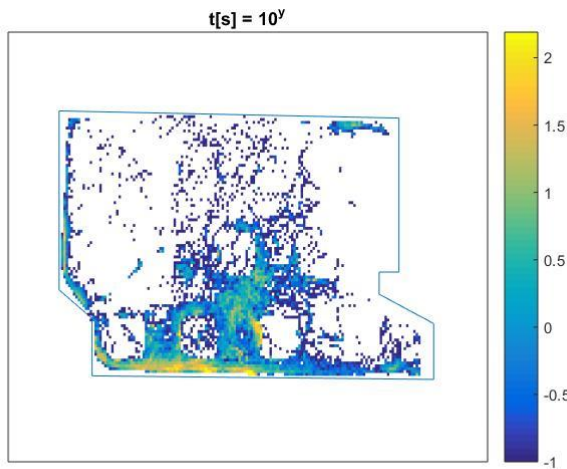


Figure 5.45: Densité de répartition en R42E

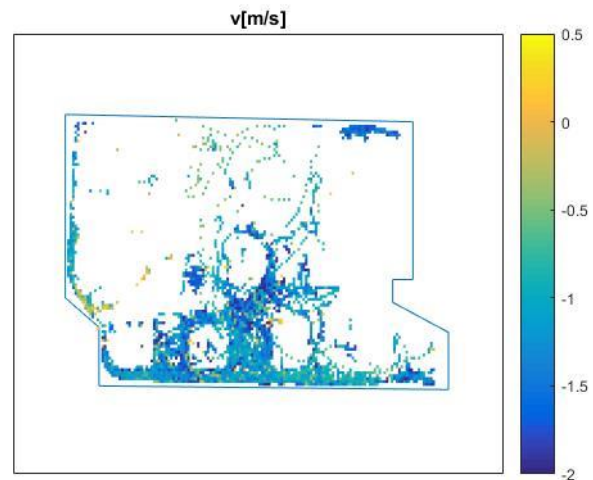
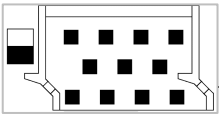


Figure 5.46: Répartition des vitesses en C84B

Une forte présence est observée dans la zone habituelle, à savoir entre les plots et la paroi verticale de la partie inférieure du bassin. Cette zone se propage entre les substrats jusqu'au milieu de la passe mais n'est pas aussi large que précédemment. Seuls les 3 substrats dans le bas à gauche de l'image ainsi que le substrat du milieu de la ligne centrale sont utilisés par les loches.

On retrouve moins d'individus contre les parois verticales et cela laisse penser que les substrats protègent efficacement les individus des fortes vitesses. Les vitesses sont légèrement plus élevées que pour C84B mais bien plus faibles que pour 0000 et R42M.



Le comportement général des loches est assez calme, elles restent dans les zones de repos et n'explorent pas beaucoup le bassin. Il y a néanmoins plus de mouvement que lors du substrat précédent, à savoir les plots avec les mêmes caractéristiques mais d'une hauteur de 4cm.

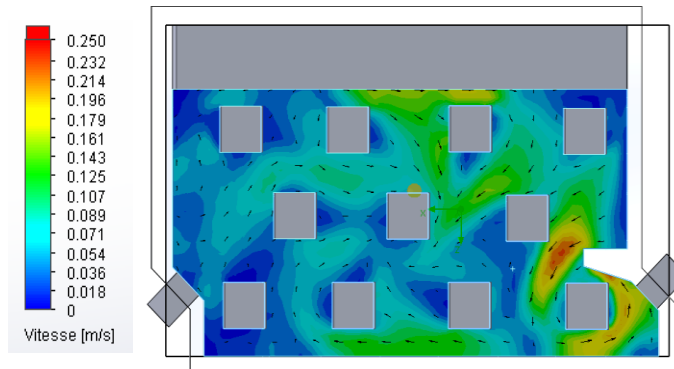


Figure 5.47: Champs de vitesse à 1cm du fond obtenus par modélisation numérique de l'écoulement sur SolidWorks pour C82B

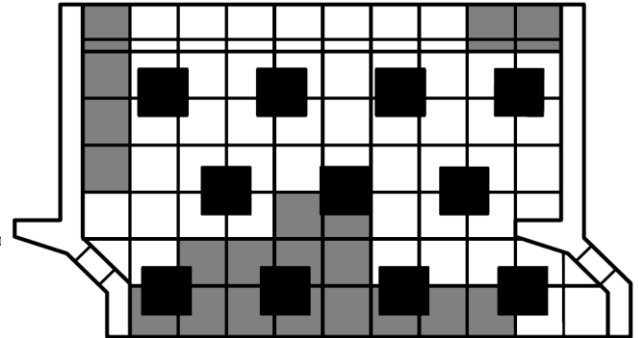


Figure 5.48: Représentation simplifiée des zones de présence des loches en C84B

Des observations similaires au substrat précédent sont faites, à savoir que la zone de repos entre les substrats et la paroi verticale inférieure semble être balayée par des vitesses de fluide non négligeable. Mais elle est quand même fortement appréciée par les individus. En résumé, les zones de repos sont comparables au type de substrat précédent mais elles sont plus petites et moins bien définies. La hauteur plus faible des plots diminue la taille des différentes zones de repos.

---

## 5.8 Comparatif des résultats et discussion

---

### 5.8.1 Taux de déplacement

Grâce à la quantité de données obtenues, des statistiques peuvent être dressées afin de comparer le comportement des loches dans les différents substrats. Les analyses statistiques se décomposent en deux parties :

- 1) La première partie s'appelle la statistique exploratoire est la plus utilisée et consiste à synthétiser, résumer et structurer les informations contenues dans les données sous forme de tableaux, graphiques, ... Elle permet également d'émettre des hypothèses quant à l'interprétation plus générale des données.
- 2) La seconde partie s'intitule la statistique inférentielle et tend à étendre les comportements constatés sur l'échantillon à une population entière ainsi qu'à confirmer ou infirmer de manière statistiques les hypothèses émises par la statistique exploratoire à l'aide de tests d'hypothèses. Le manque de donnée est un réel obstacle à l'élaboration de ces tests.

#### **Statistique exploratoire**

Tout d'abord, une analyse statistique exploratoire quant aux déplacements interbassins aura lieu, à savoir la proportion d'individus qui se déplacent ou pas dans la passe et vers quelles directions.

Pour cela, 3 déplacements distincts vont être pris en compte.

- Déplacement amont, lorsque la loche passe l'échancrure amont du bassin initial.
- Stabilité ou pas de déplacement, quand elle reste dans le bassin initial.
- Déplacement aval, lorsqu'elle se déplace vers le bassin aval au bassin initial.

Toutes les proportions de répartition vont être prises au moment où il y a le plus de loches présentes dans les bassins amont. Si aucun déplacement amont n'est remarqué, les proportions de répartition seront prises à la clôture de l'expérimentation.

Ci-dessous (*Tableau 5.15*) sont présentés les taux de répartition des loches pour les différents substrats.

Tableau 5.15: Taux de répartition pour chaque substrat

|      | Déplacement<br>amont | Stabilité | Déplacement<br>aval |
|------|----------------------|-----------|---------------------|
| 0000 | 3,1                  | 25,5      | 71,4                |
| R42M | 12,6                 | 41,9      | 45,5                |
| C42M | 8,0                  | 44,0      | 48,0                |
| R44M | 3,5                  | 23,0      | 73,5                |
| R42E | 3,0                  | 45,0      | 52,0                |
| C84B | 3,1                  | 58,3      | 38,5                |
| C82B | 4,0                  | 49,5      | 46,5                |

Graphiquement, ces chiffres sont représentés ci-dessous :

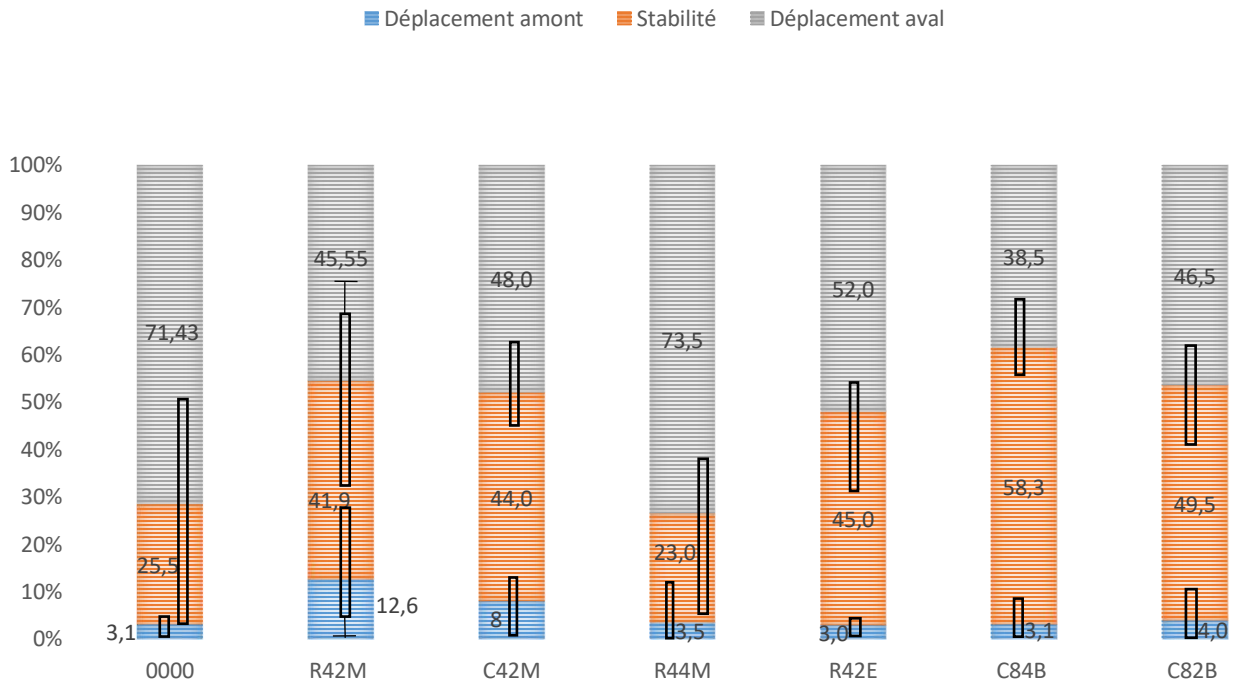


Figure 5.49: Résumé des taux de déplacements et variabilité de chaque substrat

Le graphique est un histogramme empilé. Pour chaque substrat, le taux de déplacement amont, de stabilité et de déplacement aval sont sommés pour atteindre les 100%. Deux boxplots sont

représentés par substrat, le premier est relié à la variabilité du taux de déplacement amont et le second à la variabilité de la somme du déplacement amont et du non-déplacement.

Plusieurs observations et interprétations peuvent être faites :

- Le taux de déplacement amont est très faible en comparaison avec les autres types de déplacement. Il est assez évident que la loche n'a pas tendance à remonter le courant naturellement et la présence de substrat dans la passe ne change pas cette affirmation. Au-delà des capacités à franchir une échancrure, une incertitude est présente également sur la motivation des poissons à remonter la passe. Les loches ont été testées à plusieurs reprises, une forme de lassitude est possible. De plus, les bassins sont standardisés et les poissons ne peuvent donc pas espérer trouver un habitat différent si ce n'est dans le bassin amont. Le fait de faire varier le type de substrat permet de changer l'environnement dans lequel évoluent les poissons. Il peut faciliter un déplacement amont ou la stabilisation dans la passe mais les résultats restent fortement dépendants de la « motivation » des êtres vivants expérimentés.
- Le taux de déplacement aval est généralement du même ordre de grandeur que le non-déplacement des individus pour les substrats R42M, C42M, R42E et C82B. Le pourcentage de ces deux types de déplacement se situe souvent entre 40 et 50%. Les carrés de 8cm donnent néanmoins un taux de stabilité supérieur et un taux de déplacement inférieur à la moyenne.
- Pour le substrat 0000, le taux de déplacement aval est très élevé. Plus de 70% des loches ne parviennent pas à se maintenir dans le bassin initial et se retrouvent dans le bassin aval. A l'exception du substrat R44M, la présence de plots dans le fond de la passe diminue de façon drastique le taux de déplacement aval. Cela est attribué au fait que les poissons se maintiennent plus facilement dans la passe et sont moins sujets à être emportés par le courant.
- Pour le substrat R44M, les données obtenues sont assez troublantes et dénotent avec les autres substrats. En effet, ce substrat est le seul qui permet un déplacement aval et une stabilité du même ordre de grandeur que le cas sans substrat. Bien que le déplacement amont se retrouve quelque peu amélioré (+0.4%), cette augmentation est assez négligeable. Comme expliqué plus haut, les deux premiers lots ont amené des résultats improbables avec 96% de déplacements aval. Cela fausse de manière importante les résultats. En retirant ces deux lots exceptionnels (outliers), les taux de déplacement sont les suivants :
  - Déplacement amont : 4.7%
  - Pas de déplacement : 39.1%
  - Déplacement aval : 56.2%

Ces proportions sont assez comparables avec les autres types de substrat. Le fait de travailler avec du matériel vivant amène son lot de particularités et de diversités. Il est en effet difficile d'attribuer une raison concrète aux résultats jugés erronés des deux premiers lots.

- Le substrat R42M semble être le substrat qui répond le mieux aux critères de sélection. Le substrat n'est pas trop bon pour les loches car le taux de stabilité n'est pas trop élevé et donc les loches n'ont pas tendance à s'installer passivement dans la passe. Il n'est pas trop mauvais non plus et limite donc les déplacements aval. Des résultats assez similaires sont obtenus pour C42M qui est le substrat le plus proche géométriquement de R42M. Ces substrats semblent assurer un bon compromis entre une stabilité accrue de la passe sans pour autant diminuer l'attractivité de l'échancrure amont (Voir Annexe A : Lexique)
- Le substrat C84B présente les meilleurs statistiques pour ce qui est de la stabilité des individus. En effet, près de 60% des poissons sont capables de rester durablement dans le bassin initial. Cependant, la proportion de déplacement en amont du bassin initial est très faible (3,1%). Les loches ne cherchent pas à explorer le bassin supérieur. Celles-ci semblent trouver du confort puisque les substrats sont utilisés et très peu de déplacements intra et interbassins sont observés. Le but n'est évidemment pas que les espèces se sentent trop bien dans la passe.

Malgré les déplacements globaux interbassins des substrats qui semblent mettre certaines tendances en évidence, un nombre relativement peu important d'expériences ont été menées sur chaque substrat et la variabilité des déplacements y était relativement importante comme peuvent en témoigner les boxplots sur la Figure 5.49. Une analyse statistique inférentielle permettrait de confirmer certaines hypothèses.

### Statistique inférentielle

Dans le but de déterminer sur base d'une analyse statistique significative si un substrat se démarque des autres de par ses déplacements vers l'amont, un test d'hypothèse va être réalisé. On analysera plus particulièrement si le taux de déplacement amont du substrat R42M est significativement supérieur à la moyenne du taux de remontée des sept substrats testés.

Pour cela, l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) sera que le taux de déplacement amont obtenu pour le substrat R42M est le même que la moyenne sur les sept substrats. L'hypothèse  $H_1$  sera que cette proportion ( $p$ ) soit supérieure à la moyenne globale.

$$H_0 : p_{R42M} = p_{global}$$

$$H_1 : p_{R42M} > p_{global}$$

On considère pour vérifier les conditions du test que l'hypothèse nulle est vraie. Les conditions pour pouvoir réaliser ce test sont les suivantes :

Il faut que le nombre d'échantillons ne soit pas trop petit ( $n \geq 30$ ) et que  $p_{global}$  ne soit pas trop petite de manière à ce que  $np_{global} \geq 15$  et  $n(1 - p_{global}) \geq 15$ . Or, le nombre de substrats testés s'élève à 7 et la proportion globale du taux de remontée  $p_{global} = 0,0533$ . Aucune de ces conditions n'est donc respectée et le test d'hypothèse ne peut pas être réalisé.

Une quantité suffisante de données aurait également pu permettre de confirmer ou infirmer si les déplacements aval du substrat 0000 ne sont pas significativement supérieurs à ceux des autres substrats. Une vérification que la stabilité du substrat C84B n'est pas statistiquement supérieure aux autres aurait aussi pu donner des informations intéressantes.

## 5.8.2 Comparaisons des tests sur temps longs et courts

### Statistique exploratoire

Afin d'analyser l'effet du temps d'expérimentation sur les poissons, une analyse plus approfondie a été réalisée sur la différence de résultats entre les temps longs et les temps courts de tests. Les deux tableaux reprenant les différentes statistiques sont affichés ci-dessous et une discussion se trouve plus bas avec les graphes pour pouvoir comparer visuellement ces chiffres.

#### 5.8.2.1 Taux de déplacement aval

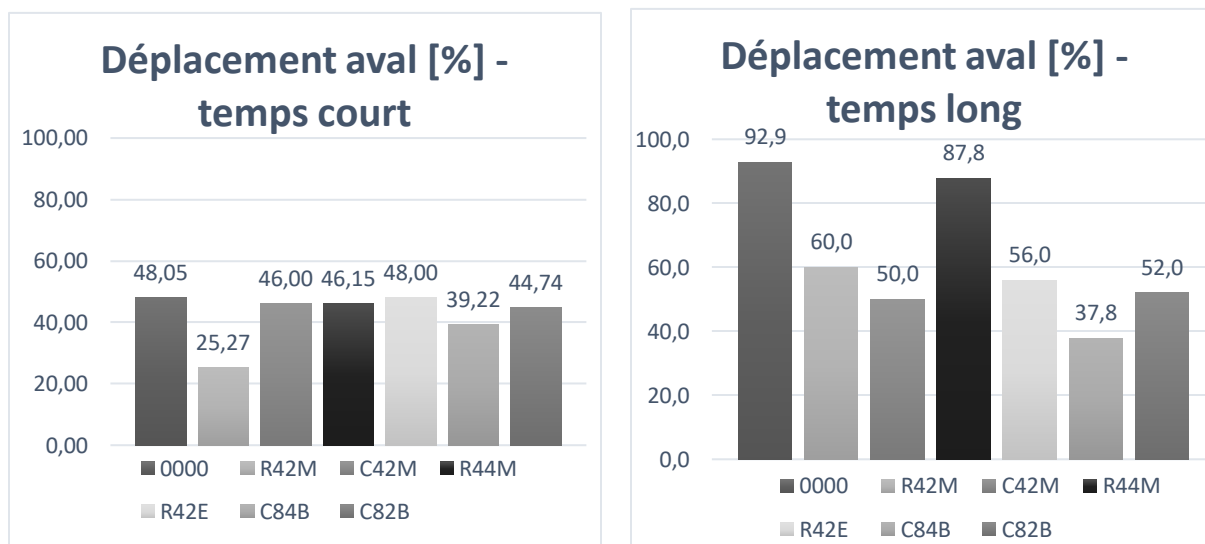


Figure 5.50: Comparaison des déplacements aval sur temps long et court

La tendance générale qui se dégage de cette comparaison est le fait que le temps favorise un déplacement aval dans la passe. Quand les loches sont présentes durant un laps de temps prolongé dans la passe, elles ont tendance à se déplacer ou à être emportées dans le bassin aval. Si l'intérêt de vouloir remonter dans le bassin initial est faible ou bien si c'est physiquement impossible, cette proportion gonfle naturellement. On remarque cependant que pour les substrats où la stabilité est assurée de manière excessive, cette différence de déplacement aval est moins marquée. Comme on peut le voir pour C42M, R42E, C84B et C82B, les statistiques sont certes plus importantes pour un temps long mais moins marquées que pour les autres substrats.

Pour les substrats protégeant moins les loches, un déplacement plus important se fait vers l'aval pour les temps longs. C'est le cas en l'absence de substrat (0000) et pour les substrats R42M et R44M.

### 5.8.2.2 Taux de déplacement nul

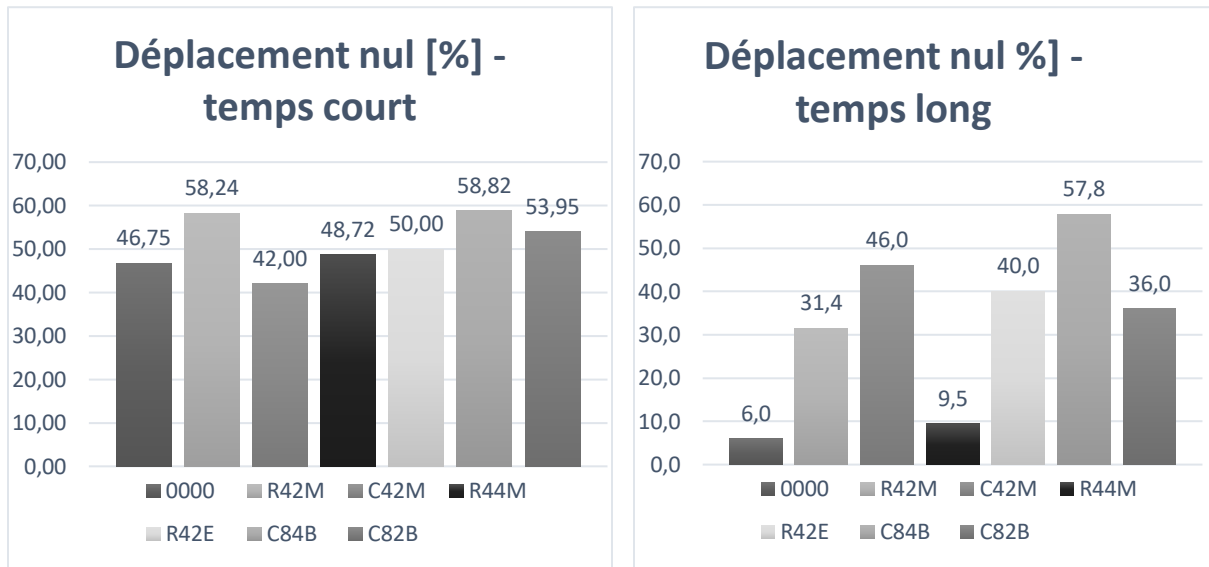


Figure 5.51: Comparaison des déplacements nuls sur temps long et court

Une tendance comparable s'opère sur la stabilité dans le bassin initial. Les loches ont tendance à quitter cette zone sur de longs laps de temps. Encore une fois, les substrats C42M, R42E, C84B et C82B sont moins affectés par ce phénomène ce qui indique que les caractéristiques des plots sont propices au maintien des individus. Ces résultats sont directement corrélés avec les déplacements vers l'aval et l'obtention des mêmes observations est tout à fait logique.

Etonnamment, le substrat R42M implique un taux de comportement vers l'aval bien supérieur pour des temps longs. Un point d'attention doit être porté au substrat C84B, ce substrat est particulièrement large et haut et les loches ne se dirigent pas davantage vers l'aval avec le temps, elles s'installent plus facilement dans le bassin que pour les autres substrats.

## 5.8.2.3 Taux de déplacement amont

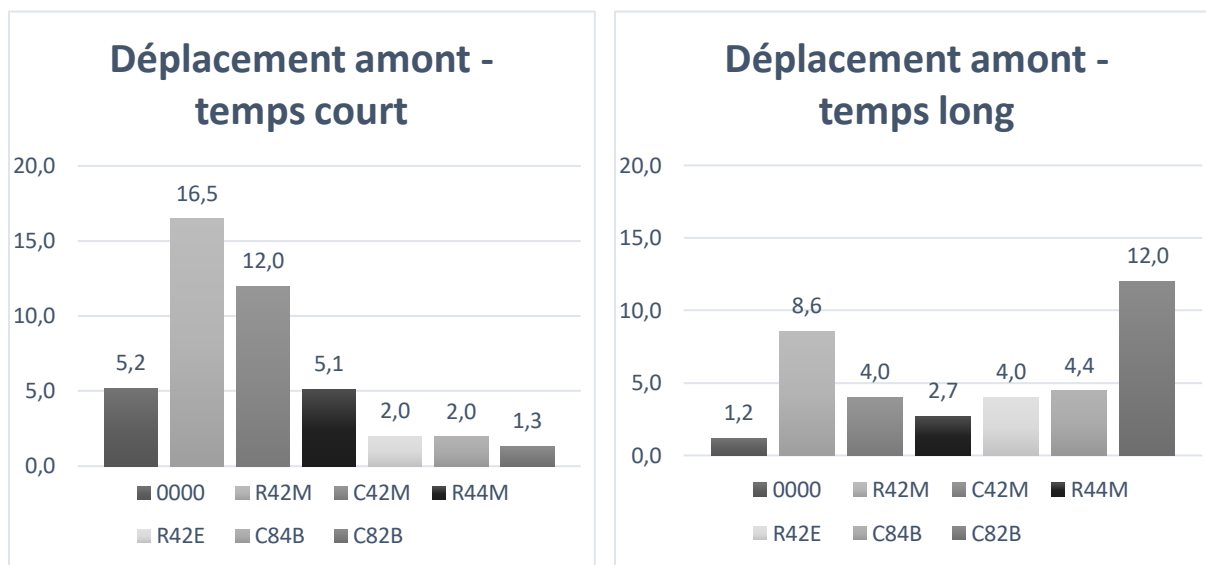


Figure 5.52: Comparaison des déplacements amont sur temps long et court

Sur ce dernier type de déplacement, une corrélation précise est moins nette. Tout d'abord, étant donné le faible pourcentage de déplacements amont en comparaison avec les deux autres types de déplacement, il est normal d'avoir plus de fluctuation. Une loche supplémentaire présente en amont fait varier ces chiffres d'approximativement 2%, avec des faibles taux comme présentés ci-dessus, il n'est pas possible de faire ressortir une tendance générale.

Trois chiffres ressortent du lot, d'abord le 12% des temps longs pour le substrat C82B, ce chiffre dénote fortement avec la proportion pour les temps courts car un seul test a été réalisé sur temps long. Durant ce test, 3 loches sont remontées contrairement à une seule pour les 3 tests courts. Cela donne donc des résultats assez divergents mais au total, seules 2 loches sont à décompter entre les deux phases. Cette différence doit donc être relativisée.

Ensuite, le substrat R42M et C42M, qui sont assez comparables, voient leur taux de déplacement amont chuter lors du passage aux temps longs. Une explication envisageable se trouve dans le caractère grégaire des loches qui supportent peu la solitude. Une autre explication est l'exposition des loches à un trop fort courant les empêchant de se maintenir durant une période prolongée dans le bassin.

### 5.8.3 Taux et temps de remontée

#### Statistique exploratoire

##### 5.8.3.1 Taux de franchissement amont

Comme expliqué plus haut, un comptage est réalisé durant les tests courts et un relevé était effectué à l'aide des images des caméras pour les temps longs. Cela permet de peaufiner les statistiques obtenues ou du moins d'éviter de perdre de précieuses données. Deux informations peuvent donc être prises en compte dans la discussion liée à l'optimisation du substrat : les temps de remontée et les déplacements 'cachés' c'est-à-dire les allers-retours entre les bassins.

En utilisant un nouveau système de comptage, il est possible d'établir un nombre de franchissements amont moyen par poisson qui peut s'avérer par ailleurs être supérieur à l'unité. Cela s'appellera taux de franchissement amont. Tout passage d'une échancrure de l'aval vers l'amont est donc comptabilisé. On s'exprimera par conséquent en taux de franchissement amont et plus en taux de répartition. Ces définitions sont présentes dans *l'Annexe A: Lexique*.

$$\text{Taux de franchissement amont} = \frac{\text{Nombre de déplacement amont totaux}}{\text{Nombre de poissons expérimentés}} \left[ \frac{\text{Remontée}}{\text{poisson}} \right]$$

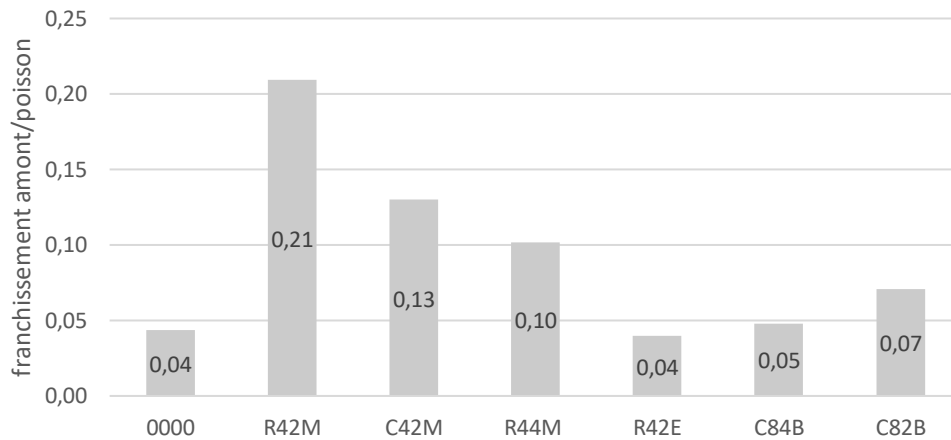


Figure 5.53: Taux de franchissement amont par poisson pour chaque substrat

Ce graphique informe sur la tendance des poissons à se comporter vers l'amont. Ces taux de franchissements amont permettent de mettre en évidence un nombre moyen de franchissements d'échancrure par poisson nettement supérieur pour le substrat R42M (0,21 franchissement amont/poisson). Le substrat C42M ainsi que le R44M sont également au-dessus de la moyenne avec des taux de 0,13 et 0,10.

Ces taux de remontée ne sont pas énormes mais une différence assez nette est mise en évidence entre les substrats R42M et C42M et les autres. Ces chiffres témoignent d'un manque d'attractivité de l'échancrure amont pour les substrats R42E, C84B et C82B étant donné la capacité des loches à se maintenir pour des temps longs et le faible nombre de franchissements amont entrepris lorsque

ces trois substrats sont positionnés. Ces trois substrats correspondent à chaque fois à une surface importante couverte par les substrats et donc un affaiblissement des zones d'exposition au courant.

Le substrat 0000 comporte un taux de franchissement amont proche des derniers substrats cités. Cela lui est apparenté à une incapacité de franchissement amont plutôt qu'à une attractivité réduite du bassin amont.

Il aurait été intéressant d'utiliser la statistique inférentielle pour confirmer ou infirmer que le taux de franchissement amont est significativement supérieur à la moyenne des taux de franchissement amont des autres substrats mais le manque de données empêche sa réalisation.

### 5.8.3.2 Temps de remontée

Lors des comptages, une analyse concernant les temps de franchissement amont a été réalisée. Il est en effet intéressant de savoir quand les déplacements ont lieu. Beaucoup de mouvements en début de test suivis d'une zone de sédentarisation peuvent être dus au stress initial.

Dans ce cas-ci, seuls les comptages des expériences dites courtes sont pris en compte car les données des franchissements amont et aval (voir *Annexe A: Lexique*) sur temps longs sont trop partielles. Lors de l'élaboration de ces graphes, tous les passages dans une échancrure de l'aval vers l'amont sont comptés comme un franchissement amont. Et vice-versa pour le franchissement aval.

Lorsqu'on compare le pourcentage de déplacements en fonction du temps, les graphiques suivants sont obtenus :

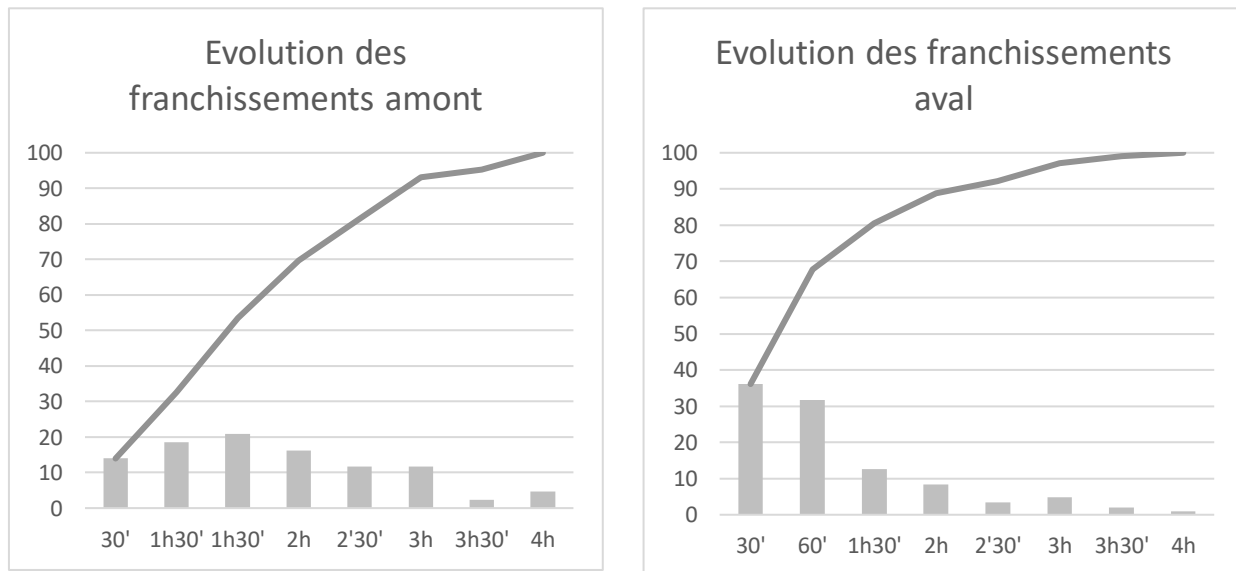


Figure 5.54: Evolution des franchissements amont et aval adimensionnalisés. L'histogramme correspond au nombre de poissons ayant effectués un franchissement en 30 minutes

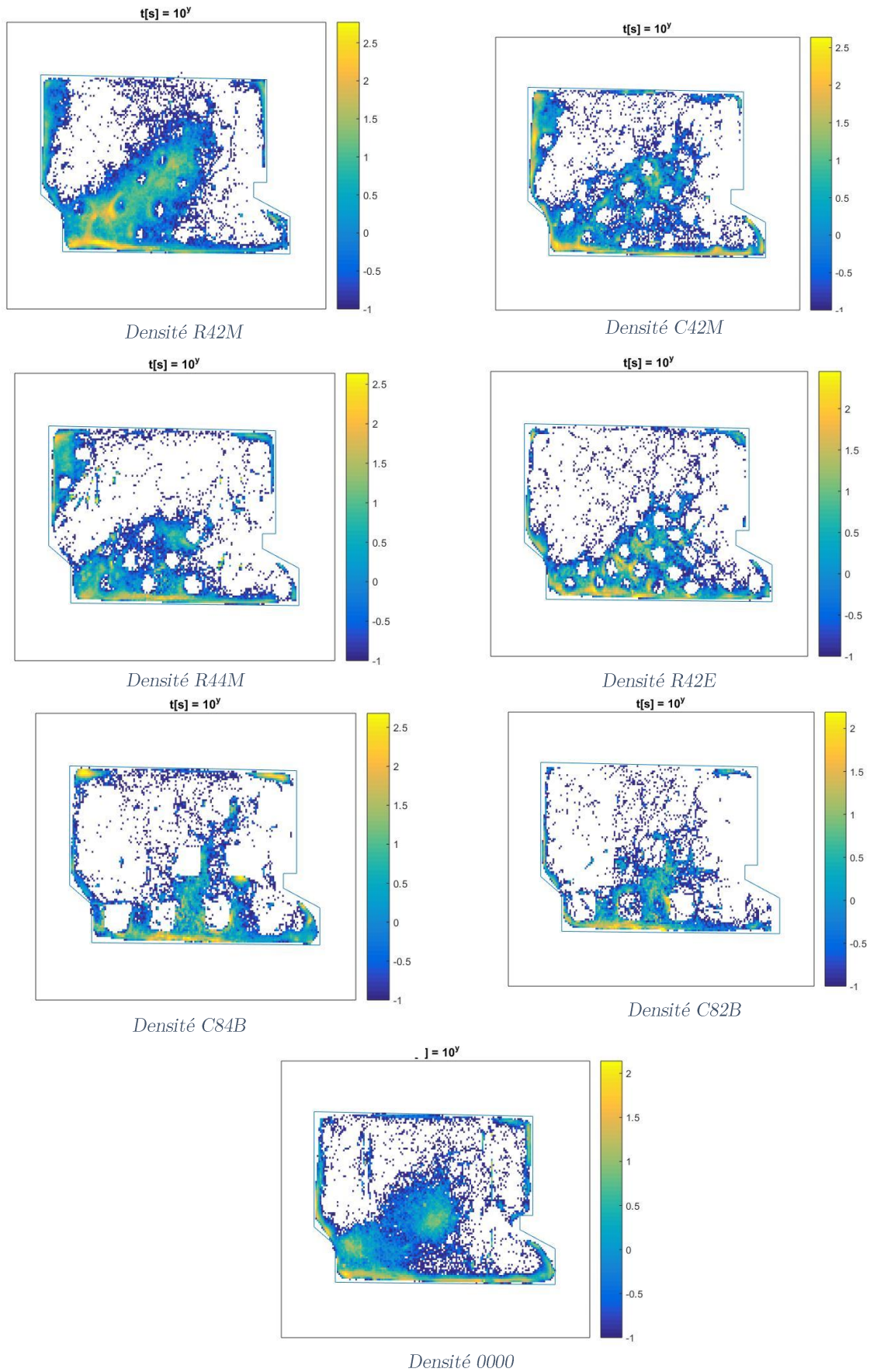
**Franchissement amont :**

Jusque 2h après le lancement du test, la courbe est assez linéaire et après 2h30, près de 80% des franchissements amont sont effectués. Ensuite, les déplacements s'amenuisent et seuls demeurent quelques mouvements entre bassins. Comme montré dans le tableau, après 3h30 de test, très peu de mouvements sont observés dans les bassins. Les mouvements ont pour la plupart lieu en début de tests et tendent à une réduction progressive.

**Franchissement aval :**

En ce qui est du déplacement aval, il semble encore plus rapide. Après 1h30 de test, 80% des franchissements aval ont eu lieu. Une fois que chaque individu a trouvé la zone de repos qui lui convenait le mieux, une stabilisation importante a lieu.

## 5.8.4 Analyse intrabassin



Les densités de présence ont été adimensionnalisées comme expliqué dans la section traitant de l'obtention des graphes et mises en vis-à-vis sur la page précédente afin de faciliter leur comparaison. Le seul bassin pris en compte est pour chacun des substrats le P2 correspondant donc aux images obtenues via la seconde caméra. Certains graphes possèdent plus de détections que d'autres et une somme  $\sum_{i=1}^j Nbr_{poissoni}$  supérieure aux autres substrats.

Avec,  $j$  [/], le nombre d'images totales disponibles pour un substrat donné.

$Nbr_{poissoni}$  [/], le nombre de poissons détectés sur l'image  $i$ .

On observe d'une manière générale que les loches affectionnent la paroi inférieure ainsi que le centre du bassin P2. Les individus sont également fort présents dans les coins et le long de la paroi amont. Les formes des substrats sont facilement reconnaissables sur les différents graphes, seuls les carrés de 4cm de côté (C42M) ont une forme plus arrondie sur les graphes qu'en réalité. Cette différence s'explique par la prise en compte du centroid du poisson comme point de repère pour les détections. Si celui-ci se courbe, des détections peuvent apparaître à l'endroit du substrat sans que le poisson ne soit positionné sur les éléments de macro-rugosité. Le fait que ces substrats soient apparents sur les graphes indique bien que les loches restent dans le fond de la passe.

Afin de schématiser en un seul graphique les zones de présence de l'ensemble des loches expérimentées durant cette phase d'optimisation, un quadrillage (8x8cm) a été dessiné sur le bassin P2. Chaque carré de ce quadrillage a été rempli par des nuances de gris (Figure 5.55). La couleur blanche est utilisée lorsque la zone définie par le carré de 8x8cm n'a été occupée par les loches pour aucun des substrats. Un gris clair est utilisé lorsque la zone a connu de nombreuses détections pour un à trois substrats et ainsi de suite. Plus le carré est foncé, plus la zone est sollicitée pour un grand nombre de configurations de la surface de fond.

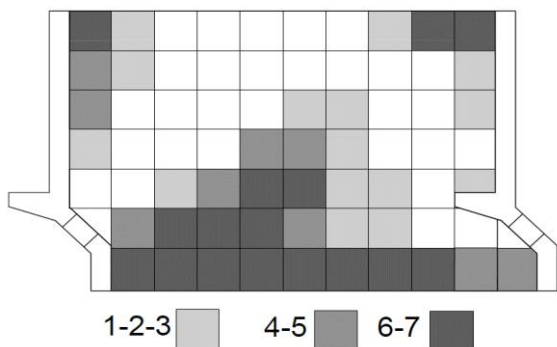


Figure 5.55: Zones de répos simplifiées combinées

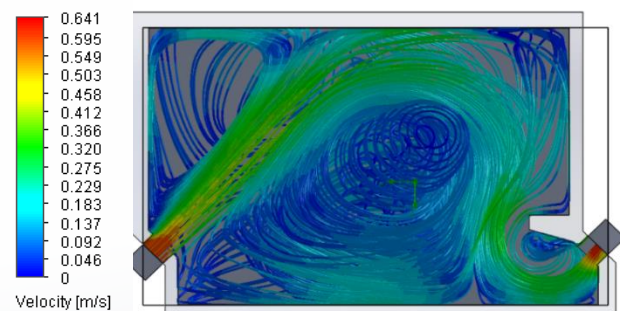


Figure 5.56: Simulation numérique de l'écoulement avec le flux principale correspondant aux zones de non-repos

Une simple comparaison entre le schéma simplifié et l'analyse de l'écoulement numérique faites en SolidWorks suffit pour mettre en évidence que les zones non occupées par les loches sont celles correspondants au courant principal dans le bassin. Les individus sont présents dans les zones de recirculation et à courant faible.

### 5.8.5 Influence de la taille des loches

Le lot n'est pas très dispersé. Il sera donc plus difficile d'extraire une influence de la taille sur les déplacements interbassins dans la passe. Au vu du grand nombre de données, il était néanmoins intéressant d'analyser les mesures moyennes retrouvées dans chaque palier toutes expériences confondues (uniquement celles où l'introduction se faisait en P2).

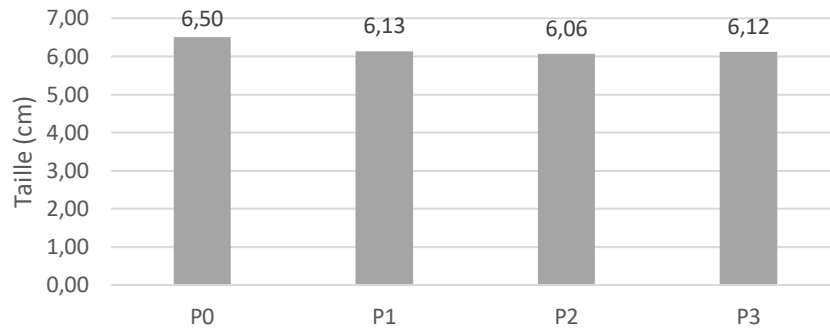


Figure 5.57: Taille moyenne des loches en fonction du bassin d'arrivée

La dispersion des tailles à travers les bassins en fin d'expérience est extrêmement homogène pour les bassins P1 (une montée de bassin), P2 (pas de déplacement) et P3 (une descente de bassin). Seule la moyenne de taille en P0 est légèrement plus haute.

La plus grande différence de taille entre deux bassins est enregistrée entre P0 et P2 et vaut 0,44cm. Etant donné que la prise de mesure est faite au demi-centimètre près, cette différence ne peut pas être significative. Sur base des résultats exposés, il n'est pas possible d'affirmer une corrélation entre les déplacements vers l'amont et la taille des loches. Cela ne veut pas dire que cette corrélation n'existe pas. La faible dispersion du lot et les mesures "grossières" défavorisent la mise en évidence de cette éventuelle corrélation. Toutefois, au vu du lot expérimenté, l'influence de la taille ne peut pas justifier une éventuelle discordance des résultats.

Si on effectue une régression linéaire et quadratique sur la taille des loches retrouvées dans les quatre bassins P0, P1, P2 et P3 en fin d'expérience, on obtient les équations et les coefficients de détermination suivants :

- 1) **Régression linéaire** : L'équation s'écrit  $Y = -0,121x + 6,506$  pour un coefficient de détermination de  $R^2 = 0,61$ .
- 2) **Régression quadratique** : L'équation s'écrit  $Y = 0,107x^2 - 0,655x + 7,04$  pour un coefficient de détermination de  $R^2 = 0,989$ .

Le coefficient de détermination informe sur la concordance entre la tendance réelle et l'équation. Plus celui-ci est élevé plus le modèle décrit par l'équation concorde avec les observations réelles.

La répartition des tailles selon les bassins suit davantage une loi quadratique que linéaire. Cette information indique que pour qu'un poisson se retrouve plus en amont, il faut qu'il soit en moyenne beaucoup plus grand (loi quadratique).

## 5.9 Conclusion

En résumé, un tableau comparatif des substrats a été élaboré avec une quantification des critères d'optimisation. Trois critères ont été pris en compte lors de ce comparatif :

- 1) **Le taux de déplacement amont** : Il s'agit du taux de déplacement amont des loches au meilleur moment. Il prend en compte le taux de loches ayant réalisé un déplacement d'une ou deux échancrures amont à P2. Ce critère est intéressant car il témoigne du juste milieu entre l'attractivité de l'échancrure amont et la capacité à se maintenir pour une longue durée. En effet, plus un substrat est imposant moins l'attractivité de l'échancrure amont sera importante mais plus la capacité des loches à se maintenir dans un bassin pour une longue durée sera importante. Bien entendu, plus ce taux sera élevé mieux ce sera.
- 2) **La capacité à se maintenir pour une longue durée** : Ce critère évalue si l'efficacité des substrats est suffisante pour que les loches se maintiennent sans trop de difficulté dans un bassin. Pour évaluer ce critère, on se basera sur le taux de franchissement aval pour des temps longs. Moins ce pourcentage est grand, plus la capacité de se maintenir est importante.
- 3) **L'attractivité de l'échancrure amont** : Ce critère juge de l'attirance des loches vers l'échancrure amont. Celles-ci sont naturellement attirées par le courant, si elles en sont trop protégées, elles auront moins tendance à se déplacer vers l'amont. Les valeurs des taux de franchissement amont (voir annexe A : Lexique) seront utilisées pour évaluer chaque substrat quant à ce paramètre. Tous les déplacements vers l'amont seront donc comptabilisés (aller-retour et déplacement de P3 vers P2 compris). Plus le taux de remontée sera important, plus l'attractivité de l'échancrure sera bonne.

Aucun critère relatif au comportement intrabassin n'a été utilisé en raison de la subjectivité qui est liée au caractère comportemental au sein d'un bassin. En effet, l'analyse ne peut pas se baser sur des valeurs objectives et les mêmes zones de présence sont souvent utilisées par les poissons indépendamment du substrat.

A travers toute la partie optimisation, plusieurs éléments ont été analysés afin de déterminer quel était le substrat optimal. Comme présenté dans le tableau ci-dessus, 3 critères ont été choisis pour juger l'impact des substrats sur la loche. Pour chaque critère, une note de 1 a été donnée pour les moins efficaces, une note de 2 pour ceux moyennement efficaces et une note de 3 pour les plus efficaces. L'attribution des notes est détaillée ce-dessous :

Tableau 5.16: Légende du tableau comparatif des critères d'optimisation

|   | 1    | 2        | 3     |
|---|------|----------|-------|
| Taux de déplacement amont [%]                                     | <5   | 5-10     | >10   |
| Capacité à se maintenir dans la passe à long terme [%]            | >65  | 50-65    | <50   |
| Attractivité de l'échancrure amont [franchissement amont/poisson] | <0,1 | 0,1-0,15 | >0,15 |

Tableau 5.17: Tableau comparatif des critères d'optimisation

|   | 0000 | R42M | C42M | R44M | R42E | C84B | C82B |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Taux de déplacement amont [%]                                     | 1    | 3    | 2    | 1    | 1    | 1    | 1    |
| Capacité à se maintenir dans la passe à long terme [%]            | 1    | 2    | 2    | 1    | 2    | 3    | 2    |
| Attractivité de l'échancrure amont [franchissement amont/poisson] | 1    | 3    | 2    | 2    | 1    | 1    | 1    |

Tout d'abord, le substrat 0000 est inefficace au regard des trois indicateurs définis pour les espèces benthiques. Sans substrat pour se protéger du courant, les loches doivent régulièrement bouger pour se replacer dans les zones à faible vitesse. Comme les zones de repos sont souvent surpeuplées, un mouvement plus important est observé quand il y a absence de plots. A défaut de s'exposer encore plus au courant, les déplacements se font souvent vers l'aval, dans le sens du courant. Les individus ont du mal à se maintenir dans la passe à long terme et ne sont pas capables de franchir de manière régulière l'échancrure amont. De ce fait résulte un taux de déplacement amont faible. Il faut bien comprendre qu'ici ce n'est pas tellement l'attractivité de l'échancrure amont qui est faible puisque les loches sont exposées au courant. Le fait que très peu de franchissements amont/poisson soient observés montre une incapacité plutôt qu'un manque d'attractivité.

Les trois derniers substrats présentent des notes fortement similaires. Pour C82B et C84B, la largeur des substrats permet à un grand nombre de poissons de se protéger efficacement des turbulences et des vitesses de courant élevées. Pour R42E, c'est la densité qui offre de nombreuses zones de repos et dès lors une protection optimale du courant. Cette surface importante de substrat permet aux espèces de se maintenir longuement dans la passe mais surprotège les individus. Ceux-ci sont capables de rester dans un bassin mais ne remontent pas pour autant ce bassin. Ce comportement est similaire pour les trois substrats protégeant le plus les loches du courant ce qui permet de dire que cette surprotection entraîne un manque d'attractivité de l'échancrure amont (voir *Annexe A: Lexique*). De ce manque d'attractivité résulte un taux de déplacement amont très faible.

Des résultats inattendus ont été observés pour le substrat R44M. Il provoque un nombre de déplacements aval assez important alors que la hauteur des plots devrait mieux protéger les loches. Cependant, lorsque les deux premiers lots ne sont pas pris en compte, la capacité à se maintenir pour un temps long est sensiblement meilleure (72%). Les loches ont du mal à se maintenir mais le taux de franchissement amont est relativement important ce qui donne une attractivité moyenne de la passe. Il est difficile de sortir un comportement clair pour ce substrat. C'est celui pour lequel

les auteurs resteront plus prudents quant à l'interprétation. Les résultats du substrat R44M s'apparentent plus à ceux d'une exception.

Le substrat R42M est le plus efficace au regard des critères évalués. C'est celui qui permet le plus grand taux de déplacement amont, soit en théorie le meilleur équilibre entre l'attractivité et la capacité de maintien dans un bassin. Il contrôle de manière moyennement efficace les déplacements vers l'aval sans entraver l'attractivité de l'échancrure amont puisqu'il comporte le taux de franchissement amont le plus important.

Le substrat C42M présente des caractéristiques très proches de ce substrat optimal. La seule différence qui existe réside dans la forme des plots. Cela n'a pas beaucoup d'impact sur l'écoulement, ni sur les zones de présence. On note un moins bon taux de déplacements amont pour ce substrat. Ce taux est par ailleurs supérieur aux cinq autres substrats. C42M contrôle moyennement les déplacements vers l'aval et provoque un taux de franchissement amont assez important. Il est le second substrat le plus efficace selon les critères définis.

Ce sont les substrats R42M et C42M qui trouvent le meilleur équilibre entre un maintien facilité dans un bassin et l'attractivité perçue de l'échancrure amont. Les substrats R42E, C84B et C82B sont trop tournés du côté de la protection ce qui diminue le désir des poissons à remonter les échancrures et le substrat R44M n'a pas donné de résultats concluants. Pour les six substrats, les critères sont néanmoins mieux remplis que sans substrat ce qui prouve que ceux-ci ont un impact positif sur les loches et potentiellement sur les autres espèces benthiques.

Etant donné que de meilleurs résultats sont obtenus sur R42M, ce sera celui-là qui sera privilégié. De plus, un nombre plus important de tests ont été réalisés sur ce dernier, ce qui diminue le nombre d'exceptions possibles et confirme bien les bonnes dispositions de ce substrat. C'est donc R42M qui sera considéré comme étant le substrat optimisé pour la suite des expériences.



---

## Etude du substrat optimisé

---

L'objectif de l'ensemble des tests menés après la période d'optimisation visait à évaluer l'efficacité du substrat circulaire de 4cm de diamètre, de 2cm de hauteur pour une densité moyenne (R42M) et de fournir des perspectives pour l'année suivante. Dans ce but, quatre espèces ont été expérimentées dans le modèle réduit de la passe de Rivière.

- Loche et chabot : les expériences mises en œuvre sur ces deux espèces ont été réalisées avec et sans substrat afin d'évaluer le bénéfice apporté aux poissons de fond par le substrat optimisé. Ces expériences visaient également à jauger la capacité de ces poissons à remonter entièrement le modèle réduit et de ce fait d'évaluer la possibilité de voir ces espèces remonter les passes réelles.
- Hotu : cette espèce étant bonne nageuse, son intérêt dans le processus expérimental était d'observer la réaction de bons nageurs face à la présence d'éléments de fond et apprécier l'influence de ces éléments sur les espèces de ce type.
- Civelle : en cours de travail, la question d'une passe commune entre les anguilles et autres types de poissons a à plusieurs reprises été évoquée. Le test préliminaire n'a pas pour prétention d'affirmer ou d'infirmer cette hypothèse mais plutôt d'évaluer la possibilité de travailler dans le futur avec des civelles ou anguillettes et de jauger les premiers comportements de l'espèce.

Dans cette section, les différentes sortes de poissons vont être plongées dans la passe, le plus en aval possible et leur répartition dans les bassins en fin d'expérience sera observée. Le but de cette série de tests est d'analyser la franchissabilité de la passe entière pour les loches, chabots, hotus et civelles. Comme pour l'optimisation du substrat, le comportement des poissons était analysé via

- Le taux de déplacement amont
- Le taux de stabilité
- Le taux de déplacement aval

- Les zones de présence des poissons dans un bassin
- Leur distribution de vitesse au sein d'un bassin
- Le taux de franchissement amont net

Les différents taux sont définis dans le lexique (Annexe A: Lexique) et le taux de franchissement amont net est rappelé à la page suivante.

Un temps d'expérimentation plus long a été choisi pour laisser la répartition se faire. De manière générale, un temps de 24h était visé mais par soucis pratique, certaines expérimentations sont plus courtes d'une ou deux heures. Cependant, deux tests ont été réalisés sur 68h, soit un week-end entier. Ces tests permettent d'obtenir des informations quant au comportement des loches pour un temps très long. Chaque expérimentation est filmée par trois caméras enregistrant les mouvements dans les bassins P1, P2 et P3. Pour chacune des quatre espèces, le comportement des poissons dans la passe a été analysé avec le substrat jugé optimal. Une analyse similaire sans substrat a aussi eu lieu pour les loches, hotus et chabots et servira de base de comparaison.

Afin de faciliter la compréhension des résultats, il est nécessaire de se familiariser avec les concepts de « Franchissement amont net » et « Taux de franchissement amont net » qui sont décrits ici tout comme dans l'annexe lexicale.

#### **Franchissement amont net:**

Ce facteur d'intérêt ne tient compte que des poissons effectuant un déplacement amont au cours de l'expérience. Parmi ces poissons, certains peuvent effectuer un franchissement amont net s'ils se retrouvent un bassin plus haut que leur bassin d'introduction en fin d'expérience ou plusieurs franchissement amont net s'ils finissent l'expérience plusieurs bassins en amont de celui d'introduction. Il faut bien garder à l'esprit que les déplacements nul et en aval ne sont pas comptabilisés.

$$\#Franchissement\ amont\ net = \#Franchissement\ amont - \#Franchissement\ aval \ [ / ]$$

Cette formule peut être utilisée pour un poisson ou pour une population de poissons effectuant un déplacement amont. Les définitions de franchissement amont et aval sont rappelées dans le lexique (Annexe A: Lexique).

#### **Taux de franchissement amont net :**

$$Taux\ de\ franch.\ amont\ net = \frac{\#franch.\ amont\ net}{\#Poissons\ expérimentés} \left[ \frac{franch.\ amont\ net}{poisson} \right]$$

Etant donné l'incapacité d'enregistrer avec précision tous les passages au niveau des seuils qui auraient nécessité l'acquisition d'un système RFID, ce sont les franchissement amont net en fin d'expérience qui seront entre autres utilisés pour comparer les résultats entre substrats.

## 6.1 Loches

Six expérimentations longues durées ont été réalisées sur les loches. Suite à des observations durant les différents tests, une modification du protocole a été réalisée après le premier lot. Le bassin d'introduction est passé de P6 à P4, ce choix est justifié par la suite.

La description des expérimentations est réalisée ci-dessous:

Tableau 6.1: Présentation des lots de loches pour les expérimentations sur la passe entière

| <i>N° lot</i> | <i>Substrat</i> | <i>Durée</i> | <i>Nombre<br/>individus</i> | <i>Bassin<br/>initial</i> | <i>Date début</i> |
|---------------|-----------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1             | 0000            | 68h          | 75                          | P6                        | 06-avr            |
| 2             | R42M            | 22h30        | 65                          | P4                        | 09-avr            |
| 3             | R42M            | 24h          | 75                          | P4                        | 12-avr            |
| 4             | 0000            | 68h          | 70                          | P4                        | 13-avr            |
| 5             | 0000            | 21h          | 69                          | P4                        | 16-avr            |
| 6             | R42M            | 22h          | 70                          | P4                        | 18-avr            |

Les lots 1 et 4 ont eu lieu durant le week-end et ont donc une durée de 68h. Etant donné que l'automate de lumière était fonctionnel, il a été possible de filmer les différents bassins durant ces week-ends et donc des visionnages post-expérimentaux ont été réalisés.

Le protocole a été adapté après le premier lot. La passe est pourvue d'un seuil S5 d'une hauteur de 12cm et cela consiste en un obstacle difficile à franchir pour les poissons de fond. En effet, ce seuil est bien plus haut que les autres seuils qui ne sont que de 2 cm. De plus, le bassin P5 (directement en aval du seuil S5) est plus court sur le modèle qu'en réalité (Rapport final du modèle réduit - SPW - DGO2 - DO.222) et cela cause davantage de remous que dans le reste de la passe. Par conséquent, le seuil S5 est plus dur à franchir que tous les autres. Une seule loche a franchi le seuil S5 lors du lot 1 ce qui dénote des chiffres obtenus précédemment. De plus, l'échancrure reliant P5 et P6 ne comporte pas de seuil ce qui facilite le franchissement de S6. Ces deux éléments risquaient de fausser les taux de répartition, P4 est dès lors devenu le bassin d'introduction et un filtre au seuil S5 a été placé pour la suite des lots.

Cependant, lors des lots 2 et 4, le niveau d'eau et les remous ont permis à l'eau de passer au-dessus du filtre, une quantité non négligeable d'individus ont pu basculer dans les bassins P5 et P6. Une fois dans ces bassins, il leur était presque impossible de remonter le seuil. Cela va amener à une limitation de l'analyse, les répartitions des lots 2 et 4 vont être présentées mais ne feront pas l'objet d'une comparaison avec les lots 3, 5 et 6. Dans le *Tableau 6.2*, lorsqu'un filtre empêche efficacement la présence dans le bassin, un '/' est indiqué dans la case, autrement le tableau est rempli du nombre de poissons présents dans le bassin en fin d'expérience.

Tableau 6.2: Répartition des poissons dans les différents bassins

| N° lot | Substrat | P0 | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
|--------|----------|----|----|----|----|----|----|----|
| 1      | 0000     | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 5  | 69 |
| 2      | R42M     | 0  | 0  | 4  | 1  | 46 | 0  | 14 |
| 3      | R42M     | 1  | 0  | 2  | 2  | 70 | /  | /  |
| 4      | 0000     | 0  | 0  | 1  | 0  | 9  | 3  | 57 |
| 5      | 0000     | 2  | 0  | 1  | 0  | 66 | /  | /  |
| 6      | R42M     | 0  | 0  | 3  | 3  | 64 | /  | /  |

### 6.1.1 Substrat 0000

Afin d'analyser ces chiffres, le tableau ci-dessus est à diviser en fonction des substrats utilisés. D'abord, il faut isoler l'expérimentation qui a été réalisée efficacement avec le substrat 0000. La ligne est reprise ci-dessous:

Tableau 6.3: Répartition analysée des poissons pour le substrat 0000

| N° lot | Substrat | P0 | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
|--------|----------|----|----|----|----|----|----|----|
| 5      | 0000     | 2  | 0  | 1  | 1  | 66 | /  | /  |

On note que 5,72% des loches testées ont franchi le seuil S5. Pour ce long test, il est intéressant d'observer le taux de répartition dans les différents bassins en fin d'expérience.

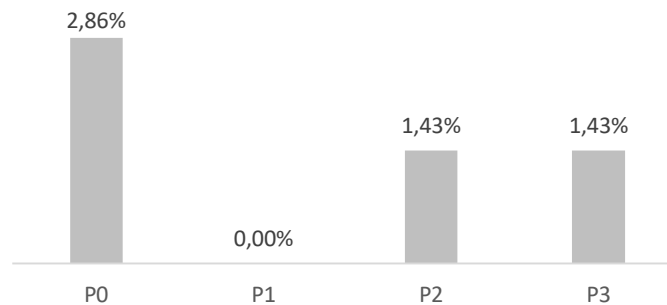


Figure 6.1: Répartition des loches ayant réalisé un déplacement amont - 0000

Les mouvements entre les différents bassins semblent limités. Un taux de déplacement amont supérieur à la moyenne de la phase d'optimisation (3,1%) est cependant observé. Cette expérience est plus fructueuse en terme de franchissement de seuil qu'à l'habitude pour ce substrat.

Afin de calculer le taux de franchissement amont net, il faut tout d'abord calculer le nombre de franchissement amont net. Celui-ci peut se calculer en multipliant le nombre de poissons dans chaque bassin par le nombre de seuils franchis pour atteindre ce bassin :

$$\#franchissement\ amont\ net = 4 \times \#P0 + 3 \times \#P1 + 2 \times \#P2 + \#P3 = 11$$

On trouve pour la passe dépourvue de substrat, un taux de franchissement net des loches de 0,157 [*franch. amont net/poisson*].

#### 6.1.1.1 Influence de la durée

Concernant les temps de remontée de la passe complète (de P4 à P0), seulement deux loches sont parvenues à réaliser ce déplacement. Il n'est pas possible de savoir en combien de temps exactement les individus y sont parvenus. En effet, les caméras ne captant pas d'images entre 19h et 7h, il n'est pas possible de connaître l'activité des loches durant la nuit. Les deux loches se trouvaient dans le bassin amont à 7h, lors de l'allumage des lampes et ne l'étaient pas la veille à 19h lors de l'extinction des lumières. La seule information est donc que la remontée totale s'est réalisée de nuit.

Afin d'obtenir une visualisation précise des déplacements amont dans le temps, le graphe suivant (Figure 6.2) cumule les franchissements amont net enregistrés en fonction du temps d'expérimentation. Durant la nuit, il est impossible de connaître le mouvement des poissons et donc une ligne en pointillé est dessinée pour représenter une évolution linéaire même s'il est peu probable que ça soit le cas.

$$\text{Temps adimensionnalisé} = \frac{\text{Temps à un moment donné}}{\text{Temps final de l'expérimentation}}$$

$$\text{Taux de franch. net adimensionnalisé} = \frac{\#franch.\ amont\ net\ à\ un\ moment\ donné}{\#franch.\ amont\ net\ en\ fin\ d'exp.}$$

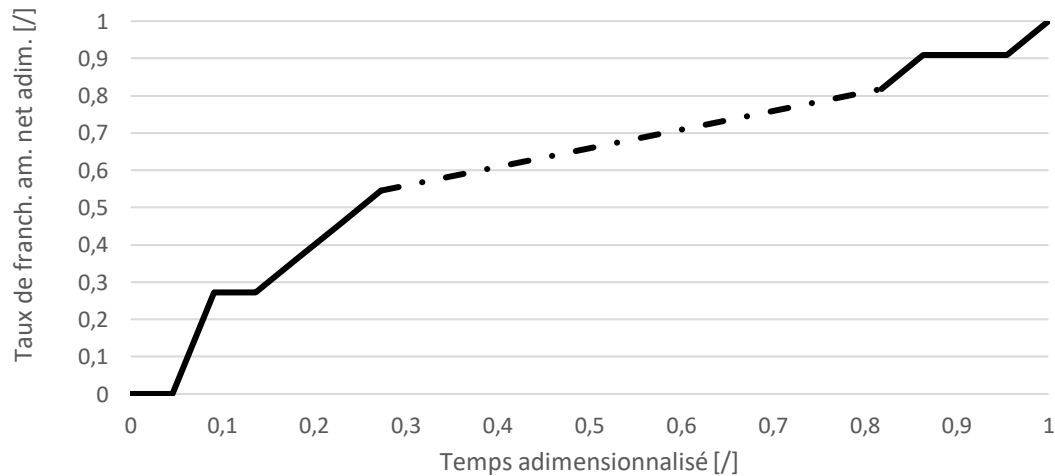


Figure 6.2 : Franch. Amont net cumulés du substrat 0000

Le premier élément qui ressort de ce graphique est l'allure générale de la courbe. Durant le premier quart d'expérience, deux loches se sont déplacées vers l'amont et ont franchi six seuils, soit une moyenne de 0,33 déplacements amont par heure et 1 franchissement de seuil par heure. Sur les quatre heures qui ont suivies la nuit, un déplacement amont et deux franchissements de

seuil net ont été observés. Le graphique indique également que certains franchissements ont eu lieu la nuit. Ainsi, les loches se déplacent tout au long de l'expérimentation et aucun moment ne semble réellement privilégié.

### 6.1.2 Substrat R42M

Pour l'analyse sur le substrat optimisé, les lignes de résultats suivantes sont conservées.

Tableau 6.4: Répartitions analysées des lots pour le substrat optimisé (R42M)

| N° lot | Substrat | P0 | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
|--------|----------|----|----|----|----|----|----|----|
| 3      | R42M     | 1  | 0  | 2  | 2  | 70 | /  | /  |
| 6      | R42M     | 0  | 0  | 3  | 3  | 64 | /  | /  |

Pour cette série de tests, 7,59% des individus ont entrepris un déplacement amont. Il s'agit d'une légère amélioration en comparaison avec les 5,72% pour le cas sans substrat. Une comparaison des taux de répartition en fin d'expérience entre les substrats 0000 et R42M est proposée ci-dessous :

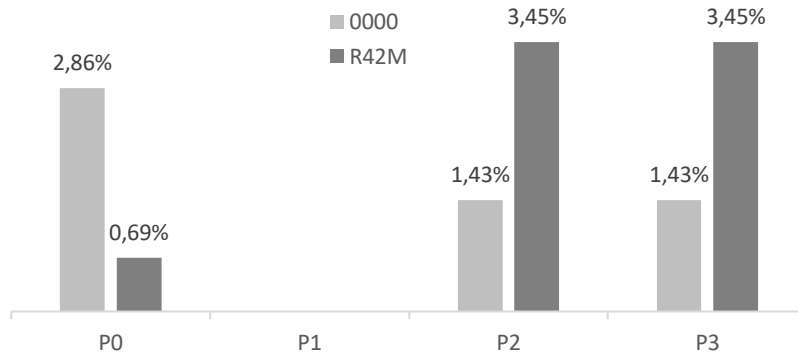


Figure 6.3 : Répartition des loches ayant réalisé un déplacement amont 0000 et R42M

En procédant de la même manière que précédemment, le taux de franchissement amont net est de 0,131 contre 0,157 franchissement amont net par poisson dans le cas sans substrat.

Le nombre de déplacement amont est supérieur pour le substrat optimisé alors que son taux de franchissement amont net est inférieur. L'expérience sans substrat a occasionné deux remontées entières ce qui est assez rare pour les loches et cela augmente considérablement les valeurs des deux facteurs d'intérêts que sont le taux de franchissement amont net et de déplacement amont.

Les résultats sont assez proches pour les deux substrats mais le peu d'expériences réalisées ne permet pas de tirer de conclusion.

### 6.1.2.1 Influence de la durée

Un graphique adimensionnalisé cumulant les franchissements amont net en fonction de l'avancement de l'expérience pour le substrat R42M est proposé ci-dessous:

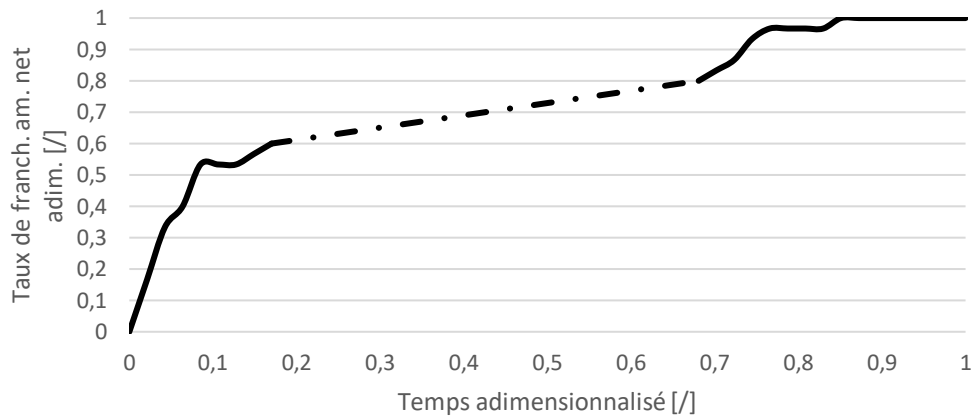


Figure 6.4: Franchissements amont nets cumulés pour le substrat optimisé (R42M)

Dès le début de l'expérimentation, beaucoup de mouvements sont observés, après moins de 20% du temps d'expérience, plus de 60% des franchissements amont net ont déjà eu lieu. Ensuite, les franchissements se font de manière moins soutenue jusqu'à la fin de l'expérience. Sur base des franchissements nets cumulés dans le temps des substrats 0000 et R42M, on ne peut pas dire que les loches se déplacent davantage durant la nuit.

## 6.2 Chabots

### 6.2.1 Analyse sur bassins standards

#### 6.2.1.1 Substrat 0000

Un test préliminaire sur les chabots sans substrat a été effectué le vendredi 2 mars afin de voir le comportement dans la passe de l'espèce. Ceux-ci avaient préalablement été triés pour séparer les chabots juvéniles (5-6cm) des plus grands. Ce sont les plus jeunes qui ont fait l'objet de l'expérimentation.

Cet essai a confirmé les observations de E.Courtois et L.Van Audenhaege l'an dernier. En effet, les chabots juvéniles se sont presque tous déplacés vers l'aval en cinq minutes (13 sur 16). L'entièreté de ceux-ci étaient emportés par le courant et se trouvaient contre les parois des différents bassins. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'il a été décidé de stopper le test après un peu moins d'une heure.



Figure 6.5: Présence de chabot dans une zone de repos

#### 6.2.1.2 Substrat R42M

Les trois expériences présentées dans cette partie ont également été réalisées sur des chabots juvéniles et s'apparentent aux expériences d'optimisation au niveau du protocole. En effet, Les individus sont insérés dans la passe en P2 et un filtre est présent au seuil S4. La zone accessible pour les poissons s'étend donc de P0 à P3. Un lot de 85 chabots est disponible à Châtelet, les plus petits d'entre eux sont sélectionnés pour prendre part aux expériences. Cette sélection a pour but d'intégrer dans la passe des chabots qui respectent au mieux les lois de similitudes.

La description détaillée des trois essais ainsi que les répartitions dans les divers bassins en fin d'expérience sont proposées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6.5: Présentation des lots et répartition des chabots en fin d'expérience sur les bassins standards

| N° lot | Substrat | Durée | Nombre<br>individus | Bassin<br>initial | Date<br>début | P1 | P2 | P3 |
|--------|----------|-------|---------------------|-------------------|---------------|----|----|----|
| 1      | R42M     | 2h    | 21                  | P2                | 05-avr        | 0  | 6  | 15 |
| 2      | R42M     | 17h   | 20                  | P2                | 05-avr        | 0  | 2  | 18 |
| 3      | R42M     | 4h    | 25                  | P2                | 06-avr        | 0  | 12 | 13 |

Deux tests courts (2h et 4h) ainsi qu'un test de longue durée (17h) avec introduction en P2 ont été réalisés sur les bassins standards.

Lors de ces trois expériences aucun chabot ne s'est retrouvé à un moment dans un bassin amont à celui dans lequel il a été introduit. Malgré la présence des substrats, les chabots semblent avoir des difficultés à se maintenir en P2. Aucun franchissement net n'est survenu lors d'un des essais.

Néanmoins, lors du premier lot, un franchissement du bassin P3 vers le bassin P2 a été observé ce qui témoigne de la capacité d'un membre du lot à franchir un seuil. Les chabots se stabilisent davantage dans le second bassin (P2) que lors du test préliminaire sans substrat.

En présence du substrat R42M, 70% des individus se situent dans le bassin aval en fin d'expérience alors que 30% parviennent à se stabiliser (Figure 6.6).

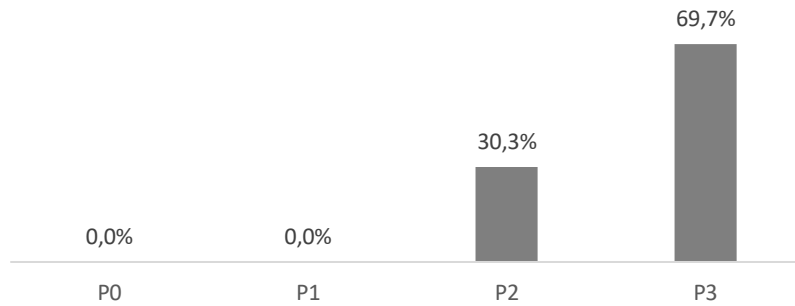


Figure 6.6 : Répartition des chabots pour les expériences en bassins standards – R42M

### 6.2.1.3 Influence de la durée

L'intérêt de cette sous-section est d'analyser plus particulièrement les déplacements vers l'aval dans le temps. Les deux lots (1 et 3) de courtes durées ont pu être décrits complètement sans perte d'information mais le lot 2 se déroule sur 17h et donc la partie nocturne ne peut être filmée et donc analysée. Les mouvements nets interbassins sur l'entièreté de la durée des expériences sont repris ici :

Tableau 6.6: Comparaison des taux de répartition des chabots pour des temps longs et courts

|                               | <i>Temps courts</i> | <i>Temps longs</i> |
|-------------------------------|---------------------|--------------------|
| <i>Pas de déplacement [%]</i> | 39                  | 10                 |
| <i>Déplacement aval [%]</i>   | 61                  | 90                 |

Les présences dans les différents bassins en fin d'expérience indiquent un taux de déplacement aval de 90% lors d'expériences longues contre 61% pour les essais plus courts.

Ces déplacements vers l'aval sont cumulés en fonction du temps sur les deux schémas suivants. Les expériences de courtes durées sont rassemblées (lot1 et 3) alors que l'expérience longue fait seule l'objet du second schéma (lot2).

Les graphiques sont adimensionnalisés de la manière suivante:

$$\text{Temps adimensionnalisé} = \frac{\text{Temps à un moment donné}}{\text{Temps final de l'experimentation}}$$

$$\text{Taux de déplacement aval adimensionnalisé} = \frac{\#Depl. aval à un moment donné}{\#Poissons expérimentés}$$

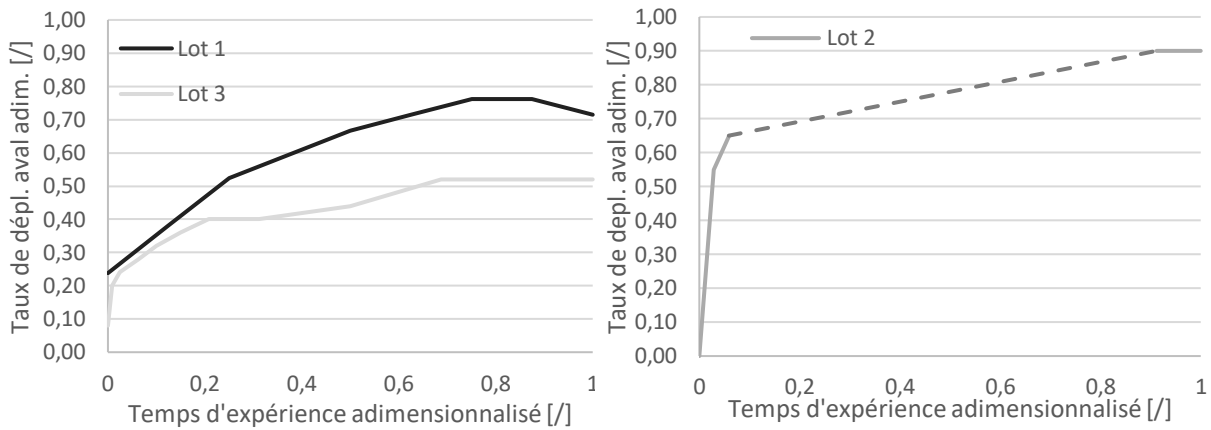


Figure 6.7: Déplacements aval cumulés pour les chabots sur les bassins standards – R42M

L'expérimentation du lot 1 est deux fois plus courte que celle du troisième lot et pourtant, un peu plus de 70% des chabots se sont retrouvés dans un bassin inférieur à celui d'introduction contre 52% pour la troisième expérience.

Pour le lot 2, plus de 60% des chabots se retrouvent en P3 avant l'arrivée de la nuit alors que lors de l'allumage des lumières le lendemain matin, 90% sont dans ce troisième bassin (P3). Deux fois plus de déplacements nets sont observés pendant le premier dixième de l'expérience que lors du restant de celle-ci.

De manière générale, la majorité des déplacements ont lieu en début d'expérience. Pour les trois expériences, plus de la moitié des déplacements vers l'aval se déroulent avant d'avoir atteint 20% de la durée expérimentale.

Deux observations principales peuvent être tirées de ces graphes:

- Le nombre de déplacement à l'aval ne fait qu'augmenter durant les diverses expériences. La tendance générale des chabots est de se déplacer vers l'aval avec le temps.
- Une majorité de chabot dévale directement après le lancement de l'expérience (une phase de stabilisation est prévue avant le lancement de l'essai) ce qui indique une certaine difficulté des individus à se maintenir dans le bassin pour un temps court.

#### 6.2.1.4 Zones de présence et comportement

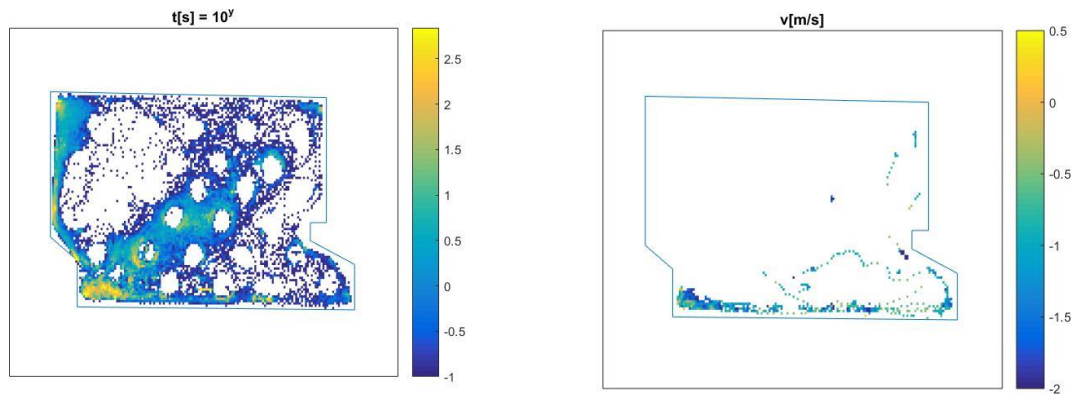


Figure 6.9: Densité de répartition en R42M - chabot      Figure 6.8: Répartition des vitesses en R42M - chabot

Les zones de présence des chabots mettent en évidence des tendances similaires à celles des loches. En effet, les chabots affectionnent les zones de recirculation du centre du bassin ainsi que le positionnement contre la paroi gauche (paroi amont) et inférieure (paroi latérale droite) sur le schéma. Le graphe est loti d'un grand nombre de détections et on remarque que les chabots ont été fort présents un peu partout dans le bassin sauf là où le courant principal passe. Par ailleurs, les substrats sont largement utilisés par les chabots, on retrouve clairement leur positionnement sur le graphe de densité.

Le graphe de vitesse est quant à lui beaucoup moins fourni. Ceci peut se justifier par le fait que les chabots sont beaucoup moins mobiles que les loches à l'intérieur des bassins et que le traitement d'images ne permet pas de détecter les vitesses trop faibles. Seules certaines sont enregistrées en bas du schéma, ces vitesses sont assez bleutées et donc faibles ce qui confirme la tendance des chabots à se mouvoir lentement dans le bassin.



Figure 6.10: Chabots profitant des substrats pour se maintenir dans le bassin

#### 6.2.2 Analyse sur la passe entière

Les chabots ont été expérimentés à deux reprises pour des durées de l'ordre de 24h. Lors de ces expériences, les chabots étaient introduits à partir de P4. Pour rappel, un seuil (S5) trop important

séparant les bassins P5 et P4 est présent dans la passe et constitue un obstacle difficile à franchir pour des poissons de fond. C'est pour cette raison que les expériences ne démarrent pas plus à l'aval. Parmi ces deux expériences, une a eu lieu avec le substrat optimisé et l'autre sans substrat.

Tableau 6.7: Présentation des lots pour les chabots sur les expérimentations en passe entière

| <i>N° lot</i> | <i>Substrat</i> | <i>Durée</i> | <i>Nombre<br/>individus</i> | <i>Bassin<br/>initial</i> | <i>Date<br/>début</i> |
|---------------|-----------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1             | 0000            | 24h          | 60                          | P4                        | 17-avr                |
| 2             | R42M            | 23h          | 60                          | P4                        | 19-avr                |

Le nombre de poissons par expérience a été augmenté par rapport à la phase d'optimisation afin d'obtenir plus d'informations par expérience. La stratégie a quelque peu été modifiée à ce niveau puisqu'au lieu de multiplier les expériences sur des petits lots, on effectue moins d'expériences sur des lots plus importants. La durée expérimentale étant supérieure, il était nécessaire de réduire le nombre de répétitions.

Les expériences étaient portées sur une soixantaine d'individus pour un lot de 85 chabots disponibles à Châtelet. Il n'était par conséquent plus possible de n'intégrer que les plus jeunes chabots dans la passe, la taille moyenne était dès lors supérieure à celle des expériences sur les bassins standards. Une durée minimale de 24h de repos était prévue entre deux expériences.

Les bassins d'arrivées des chabots pour les deux expériences sont repris ci-dessous:

Tableau 6.8: Répartition des chabots dans les différents bassins sur la passe entière

| <i>N° lot</i> | <i>Substrat</i> | <i>P0</i> | <i>P1</i> | <i>P2</i> | <i>P3</i> | <i>P4</i> | <i>P5</i> | <i>P6</i> |
|---------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1             | 0000            | 0         | 4         | 8         | 2         | 46        | /         | /         |
| 2             | R42M            | 8         | 6         | 7         | 4         | 35        | /         | /         |

Contrairement aux attentes, bon nombre de chabots réussissent à remonter un ou plusieurs bassins (39 au total). Huit d'entre eux sont même parvenus à remonter l'entièreté de la passe. Au total des deux essais, 32,5% des individus se sont déplacés vers l'amont et 6,66% se trouvaient tout en haut de la passe en fin d'expérience.

### 6.2.2.1 Substrat 0000

L'analyse ne se base que sur une seule des expériences (lot1) soit soixante chabots. Les taux de répartition sont représentés de manière schématique sur le graphique suivant:

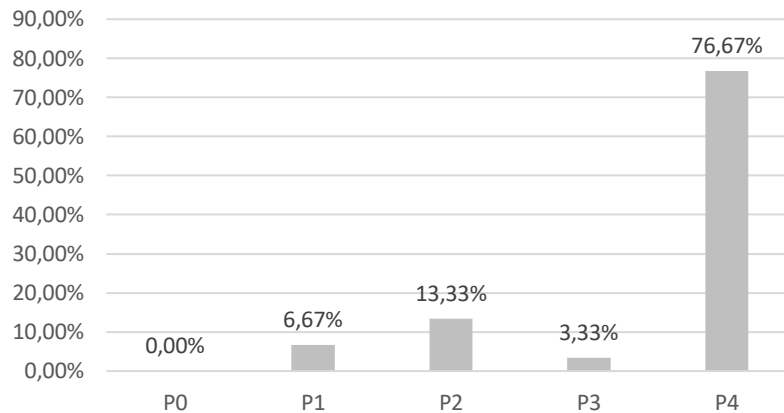


Figure 6.11 : Répartition des chabots passe entière - 0000

En absence d'un substrat de fond, aucun des soixante chabots n'était présent en haut de la passe après les 24 heures dans le modèle. Par contre, près d'un quart d'entre eux (23%) ont réalisé entre un et trois franchissements amont nets. Ce taux de déplacement amont témoigne des capacités de l'espèce à résister pendant une longue durée aux conditions hydrauliques de la passe et même à se mouvoir vers l'amont. L'expérience a occasionné un total de 14 déplacements amont aucun mais aucun de ces chabots n'a remonté entièrement la passe.

Le bassin P4 comporte deux marches provoquant de grandes zones de repos. De plus, ce bassin est moins turbulent que les trois bassins standardisés du dessus. Ces éléments portent à croire que P4 est moins contraignant à franchir que les bassins standardisés (P1, P2, P3). Il est donc intéressant de noter que seulement 3% des chabots s'arrêtent en P3 alors que 20% se retrouvent soit en P1 soit en P2 et parviennent ainsi à remonter au moins un bassin standardisé.



Figure 6.12: Chabot dans le bassin P4 - 0000

Le taux de franchissement amont net pour la passe vierge de substrat s'élève à 30/60 soit 0,5 franchissement amont net/poisson. Les résultats étant largement meilleurs que pour les tests sur les bassins standards dont les poissons étaient en moyenne de taille inférieure aux tests présentés dans cette sous-section poussera à discuter l'influence de la taille des chabots quant à leur tendance à se mouvoir à l'amont.

### 6.2.2.2 Substrat optimisé R42M

L'analyse des franchissements avec le substrat optimisé R42M ne porte que sur le lot 2 (Tableau 6.8). Pour rappel, les chabots sont introduits en P4 et peuvent uniquement se mouvoir entre P4 et P0. Un graphique comparant les taux de répartition dans les différents bassins à la fin de l'expérience pour le 0000 et R42M est proposé ci-dessous:

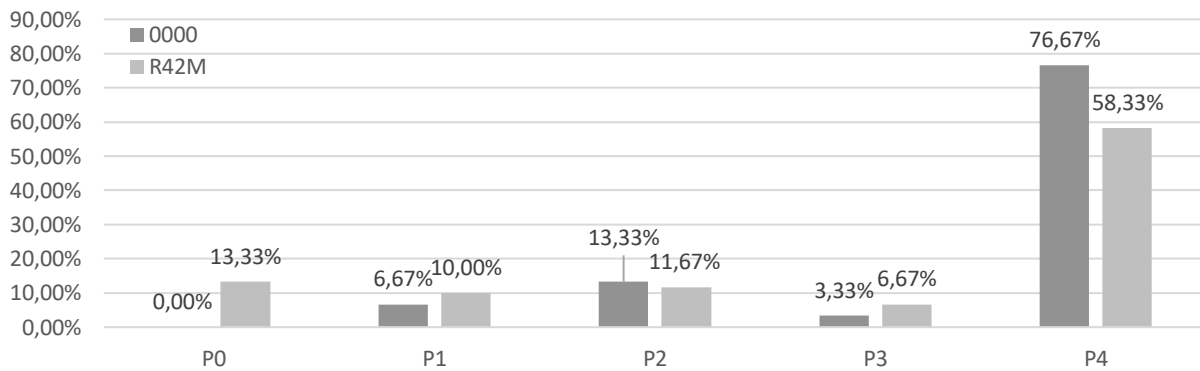


Figure 6.13 : Comparaison des taux de répartition des chabots sur la passe entière – 0000 et R42M

Pour le substrat R42M, 13% des individus se retrouvent totalement à l'amont de la passe pour 42% (23% pour 0000) ayant effectué au moins un franchissement net. Près d'un tiers des chabots réalisant un déplacement amont en cours d'expérimentation parviennent à atteindre le haut de la passe et donc à franchir trois bassins standardisés consécutifs.

Comme pour le substrat 0000, une minorité de chabots (7% sur 42%) arrêtent leur déplacement au bassin P3. La plupart d'entre eux parvenant à remonter au minimum un bassin standardisé.

Les proportions de déplacement vers l'amont jusqu'aux bassins P1, P2 et P3 pour le substrat R42M ne sont pas tellement différentes de celles pour 0000. Ce sont les remontées jusqu'à P0 qui sont largement supérieures pour R42M. En effet, elles sont inexistantes sans substrat et de 13% avec le substrat optimisé.

Le taux de franchissement net est bien entendu plus important pour le substrat optimisé (R42M) que pour 0000 puisqu'il s'élève à 1,13 franchissement net/poisson soit plus du double du cas sans substrat (0,5 franchissement net/poisson).

### 6.2.2.3 Temps de remontée

Afin d'évaluer l'influence de la durée des expériences, des comptages ont été effectués toutes les demi-heures pour les deux lots. La plupart des comptages sont réalisés sur le terrain alors qu'une plus petite partie se fait par analyse des images récoltées par les caméras en P1, P2 et P3. Le bassin P3 ne disposant pas de plaque de plexiglass, il était difficile de dénombrer tous les poissons via les images. Les résultats présentés pour les temps de remontées ne prennent en compte que les poissons dont la présence a été relevée avec certitude.

Le nombre de franchissements amont net a été adimensionnalisé afin de pouvoir comparer les expériences de manière simplifiée. Les comptages n'étant pas possible durant la nuit, celle-ci est représentée en pointillés. Le temps a été échantillonné en 21 points. Un point est calculé pour tous les 5% de temps d'expérience, lorsqu'un comptage ne correspond pas dans le temps, on procède par interpolation linéaire sur les deux points les plus proches.

Les graphiques sont adimensionnalisés de la manière suivante:

$$\text{Temps adimensionnalisé} = \frac{\text{Temps à un moment donné}}{\text{Temps final de l' experimentation}}$$

$$\text{Taux de franch.net adimensionnalisé} = \frac{\#\text{franch. amont net à un moment donné}}{\#\text{franch. amont net en fin d'exp.}}$$

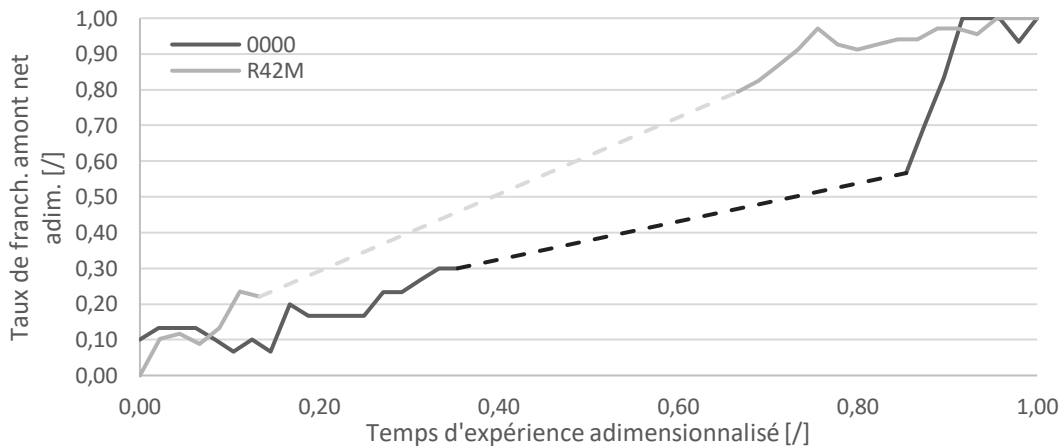


Figure 6.14 : Franchissement amont net cumulés en fonction du temps pour les chabots sur la passe entière - 0000, R42M

Le nombre de franchissements net augmente de manière générale avec le temps mais on remarque qu'au début des tests, beaucoup de mouvements sont observés. Les chabots ont tendance à aller et venir dans les bassins comme en témoigne la courbe oscillante. On voit que la nuit simulée par les pointillés est une grande proportion du temps total d'expérience et qu'une quantité importante d'information est délaissée. La nuit n'intervient pas toujours exactement au même moment dans

l'expérience. Les lampes sont toujours allumées de 7h à 19h, c'est l'heure de début d'expérimentation qui est modifiée. De manière générale, on recense bon nombre de déplacements interbassins en début d'expérience, un peu moins pendant la nuit et très peu en toute fin d'essai. Pour le substrat 0000, un nombre anormal de franchissements apparaissent juste après l'allumage des lampes.

Au vu des résultats interbassins sur les deux substrats, le chabot ne peut pas être identifié comme une espèce nocturne puisque la pente linéaire décrivant la nuit a un coefficient angulaire proche de l'unité pour les deux expériences ce qui indique qu'en moyenne, le nombre de franchissement amont net de jour et de nuit sont proches.

### 6.3 Hotu

Aménager des substrats dans le fond de la passe améliore la franchissabilité pour les espèces à faible capacité natatoire. Cependant, il faut vérifier que cela ne détériore pas la franchissabilité des espèces bonnes nageuses. En effet, il ne serait pas intéressant d'améliorer la passe pour les espèces mauvaises nageuses au détriment des espèces pouvant déjà les remonter. Dans cette section, le hotu sera présenté. Cette espèce est rhéophile et est régulièrement observée dans les passes actuelles.

#### 6.3.1 Description des expérimentations

Quatre expériences ont été menées sur les hotus, la première était une expérience préliminaire de seulement trente minutes. Parmi les trois suivantes, deux ont été réalisées sur des temps courts (2h) alors que la troisième a duré 20h. Le test préliminaire portait sur vingt hotus alors que le suivant sur cinquante-sept soit l'entièreté du lot au 11 avril. Ce nombre a ensuite été réduit à vingt-cinq pour les lots 3 et 4 du fait du comportement grégaire des hotus. En effet, l'effet de groupe est important pour cette espèce et le fait de réduire le nombre d'individus par lot permettait d'en évaluer l'impact. Les répartitions dans les bassins sont exposées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6.9: Présentation des lots pour les hotus et déplacements effectués au meilleur moment

| <i>N° lot</i> | <i>Substrat</i> | <i>Durée</i> | <i>Nombre</i> | <i>Bassin</i>  | <i>Date</i>  | <i>P0</i> | <i>P1</i> | <i>P2</i> | <i>P3</i> | <i>P4</i> |
|---------------|-----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|               |                 |              |               | <i>initial</i> | <i>début</i> |           |           |           |           |           |
| 1             | C82B            | 30min        | 20            | P2             | 26-Mar       | 4         | 1         | 10        | 5         | /         |
| 2             | R42M            | 20h          | 57            | P4             | 11-Apr       | 0         | 0         | 0         | 1         | 56        |
| 3             | 0000            | 2h           | 25            | P3             | 18-Apr       | 0         | 0         | 1         | 24        | /         |
| 4             | R42M            | 2h           | 25            | P2             | 19-Apr       | 0         | 0         | 25        | 0         | /         |

#### 6.3.1.1 *Expérience préliminaire lot 1:*

Dès le début de l'expérience, les hotus sont très actifs et n'ont aucun mal à se maintenir dans les bassins. En effet, après 20 secondes un poisson se retrouvait directement dans le bassin amont.

Il y a beaucoup de mouvements intra et interbassins. On observe pour un temps d'expérimentation très court (30 min) que quatre hotus ont franchi deux échancrures, 20% de la population se retrouve en haut de la passe, 25% sont dans un bassin plus à l'amont que le bassin d'introduction. La moitié stagne dans le bassin P2 alors que le dernier quart effectue un déplacement aval vers P3. En fin d'expérience la situation a tendance à se stabiliser.

Pour ce test préliminaire, le substrat C82B était placé dans le fond de la passe.

#### 6.3.1.2 *Expériences sur les lots 2, 3 et 4:*

Sur ces trois expériences, de nombreux paramètres ont été modifiés : le nombre d'individus, le bassin d'introduction, la durée de l'expérience et le substrat utilisé. Et pourtant, les hotus se sont comportés à chaque fois de la même manière. Ceux-ci étaient toujours regroupés et se plaçaient constamment dans la colonne d'eau. Presqu'aucun déplacement interbassin n'a été observé, seul deux déplacements amont sont survenus en tout début d'expérience, l'un sur le lot 2 et l'autre pour le lot 3. Les deux hotus ayant effectués des déplacements vers l'amont sont ensuite redescendus pour se replacer en groupe avec leurs congénères et cela jusqu'en fin de test. Par ailleurs, 100% des hotus se sont stabilisés dans le bassin P2 (alors que P3 était accessible) lors du dernier lot ce qui confirme leur aisance à se maintenir dans la passe.

Les déplacements amont observés aussi bien dans l'expérience préliminaire que dans les lots 2 et 3 semblent davantage être liés au stress et au désir de fuir des individus qu'à une motivation d'exploration de la passe. En effet, les franchissements surviennent à chaque fois en début d'expérience ou au moment du repêchage. C'est-à-dire lorsque le facteur stress est le plus important.

### 6.3.2 Influence de la présence d'un substrat

La description des expériences proposée dans la sous-section précédente n'indique pas une influence négative des substrats sur la franchissabilité des hotus. D'un point de vue intrabassin, le comportement des individus sans substrats et avec éléments de fond est illustré ci-dessous :



Figure 6.15: Hotus avec et sans substrats

On voit ici que tous les hotus sont regroupés, ils nagent en banc au-dessus des plots sans s'en servir. Les zones de présence pour le substrat 0000 et pour le substrat R42M sont forts semblables à première vue. Les individus semblent néanmoins se positionner légèrement plus haut lorsqu'il y a présence d'éléments de fond.

### 6.3.3 Zones de présence et vitesse

Les hotus nagent près du fond mais sans le toucher et s'élèvent assez facilement dans la masse d'eau. Ils ne recherchent pas forcément les zones les plus calmes comme les poissons de fond mais plutôt des zones où les vitesses d'eau sont assez faibles pour qu'une nage de croisière soit exercée.

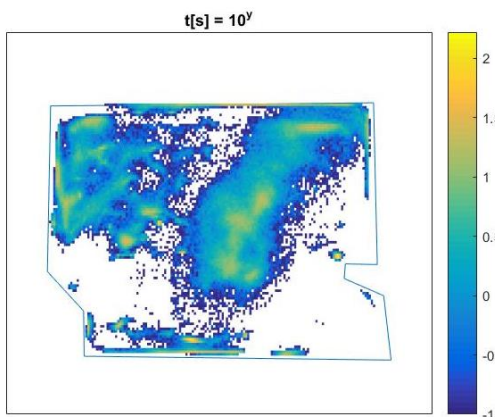


Figure 6.16 : Zones de présence Hotu - R42M

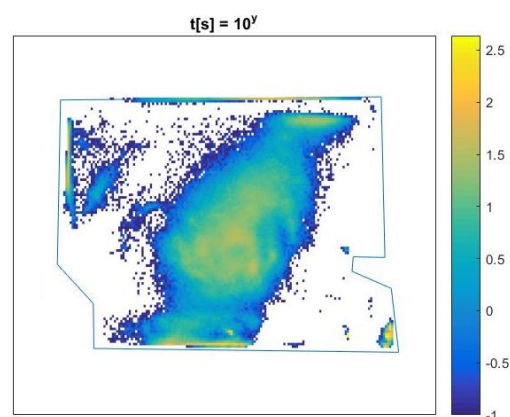


Figure 6.17: Zones de présence Hotu- 0000

Les zones de présence pour les hotus sont bien plus disparates que pour les autres espèces. Les substrats dans le graphe de densité R42M ne sont pas apparents ce qui confirme bien la tendance des hotus à nager au-dessus de ces substrats. Peu importe le substrat de fond, les hotus se positionnent de manière assez centrale dans le bassin. La zone située en face de la paroi amont est davantage utilisée pour le substrat R42M que pour le 0000.

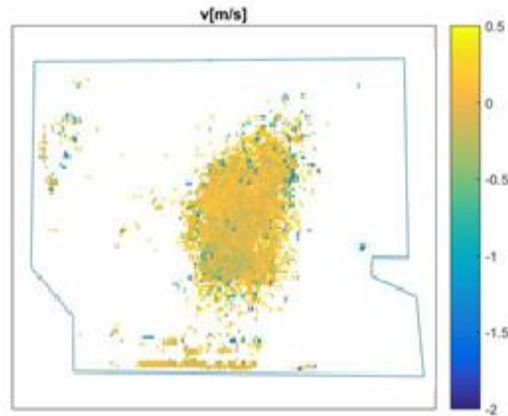


Figure 6.18: Répartition des vitesses pour le hotu

Au niveau des vitesses, celles-ci sont bien plus importantes que pour les chabots ou les loches (Figure 6.8). Les hotus nagent constamment et donc se déplacent dans le bassin durant toute la durée de l'expérimentation. Ces vitesses sont principalement présentes dans la zone de recirculation du bassin.

## 6.4 Civelle

De nombreuses civelles de 7-8cm étaient disponibles au Conservatoire du Saumon Mosan à Erezée. La présence de celles-ci permettait d'ouvrir des perspectives pour les recherches des années futures en évaluant la possibilité de travailler avec cette espèce. C'est ainsi qu'une expérience préliminaire sur une dizaine d'individus a été menée.

Tableau 6.10: Présentation des lots et déplacements effectués

| <i>N° lot</i> | <i>Substrat</i> | <i>Espèce</i> | <i>Nombre individus</i> | <i>Bassin initial</i> | <i>Date début</i> | <i>Durée</i> | <i>P2</i> | <i>P3</i> | <i>P4</i> |
|---------------|-----------------|---------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| 1             | R2M4            | Civelle       | 10                      | P3                    | 12-avr            | 2h           | 0         | 1         | 9         |

Dix civelles ont été introduites pour une durée de deux heures dans la passe. Les civelles sont tellement fines qu'elles savent se déplacer d'un bassin à l'autre malgré la présence d'un filtre.

Plusieurs filtres ont par conséquent été placés pour cette expérience, ceux-ci étaient situés à l'aval des bassins P3, P4 et P6.

Au départ le débit dans la passe était de 8l/s mais les civelles se faisaient rapidement emporter, il a donc été décidé de réduire ce débit à 5l/s.

Les civelles étaient très mobiles durant les deux heures d'expérimentations. Celles-ci ont très peu utilisé les substrats, elles nagent continuellement dès leur introduction dans la passe jusqu'au moment où elles trouvent un endroit où se "faufiler" à l'abri du courant (Figure 6.19).

Au final, une seule des dix civelles engagées dans l'expérience est parvenue à trouver un refuge pour une durée de deux heures dans le bassin P3, les neuf autres étaient positionnées aux alentours des marches du bassin P4 en fin d'expérience (Figure 6.19). Aucun franchissement n'a été observé.

Certaines civelles essaient de remonter en passant entre l'échancrure et la paroi, se cachent sous la marche en plexiglass (Figure 6.19) ou se faufilent dans d'autres recoins de la passe.

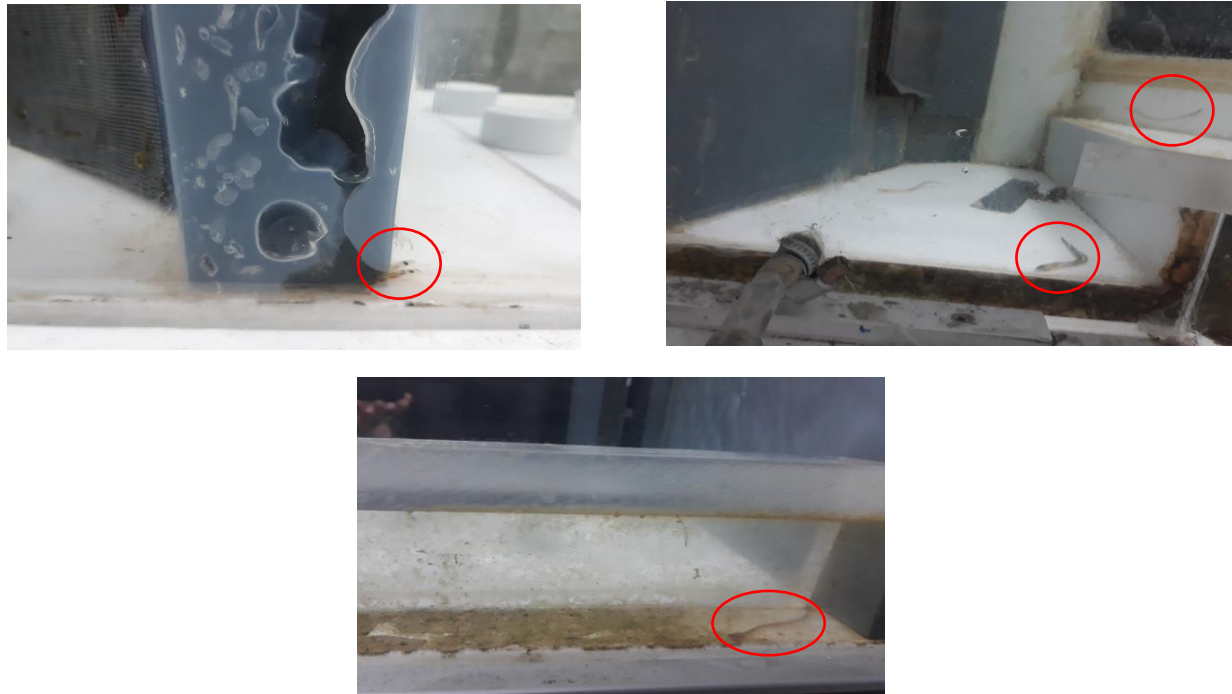


Figure 6.19: Civelles dans les bassins

Les civelles sont transparentes et ont tendance à se positionner dans tous les petits recoins de la passe ce qui rend difficile leur récupération ainsi que l'acquisition d'images. De plus, les civelles de 7-8cm ont des capacités de nage qui semblent assez faible pour le courant qui leur ait imposé.

Pour les tests futurs, il est conseillé d'utiliser des individus de plus grandes tailles. Des anguillettes auront l'avantage de ne plus être transparente mais bien noire ce qui facilitera l'enregistrement à

l'aide de caméra ainsi que le PIT-Taguage. En réalité, ce sont des civelles et anguillettes qui remontent les passes et par conséquent l'utilisation d'anguillettes ne respectera pas les lois de similitude. Ces éléments compliquent l'expérimentation future des anguilles dans le modèle réduit présent au laboratoire des recherches hydrauliques. L'idée de travailler avec des anguilles juvéniles ne doit cependant pas être mise de côté mais il sera probablement nécessaire de travailler avec de plus grands individus et d'adapter quelque peu le modèle en le colmatant par exemple.

---

## 6.5 Discussion interspécifique

---

### 6.5.1 Comportement interbassins

#### 6.5.1.1 *Loche*

L'espèce est peu présente dans les passes à poissons mosanes, les essais sur les trois bassins standards et ceux sur la passe entière ont connu des résultats peu convaincants en termes de remontée totale ou partielle de la passe. Seul une petite partie des individus réalise un déplacement amont en cours d'expérience que ce soit avec ou sans la présence du substrat R42M (7,6% pour R42M et 5,7% pour 0000). De plus, le lot évalué est d'une taille moyenne de 6,18cm ce qui est légèrement supérieur à la valeur cible obtenue par les lois de similitude (section 2.3). Bien que les analyses ne permettent pas d'évaluer la motivation des loches à explorer le modèle ni l'influence des conditions expérimentales sur leur comportement, les résultats laissent penser que l'application d'un substrat de fond ne permettra pas soudainement aux loches de franchir les passes à bassins réelles.

Néanmoins, les résultats obtenus en la présence de substrats sont à chaque fois égaux ou meilleurs à ceux sans substrats. L'efficacité des éléments de fond ne peut pas être prouvée à l'aide d'une analyse statistique à cause d'un manque de données mais les taux de déplacement amont ainsi que les analyses comportementales intrabassins confirment l'aide apportée par la présence du substrat. Cette aide est cependant limitée puisque le taux de franchissement et de stabilisation n'est que sensiblement supérieur.

Par ailleurs, les différences entre les taux de remontées ne peuvent pas être attribuées à l'influence de la taille pour les loches. Comme expliqué de manière plus détaillée dans la discussion de l'optimisation du substrat, la gamme de taille testée pour cette espèce est très étroite et ne permet par conséquent pas de mettre en évidence une quelconque influence de la taille. En analysant les tailles moyennes dans chaque bassin en fin d'expérience, on observe une différence maximale entre deux bassins inférieure à 0,5cm alors que les mesures sont prises au demi-centimètre près.

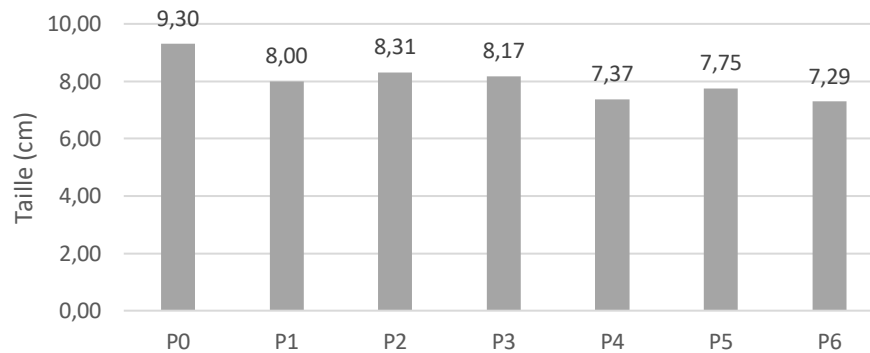
#### 6.5.1.2 *Chabot* :

L'espèce est tout comme la loche très peu présente dans les passes à poissons mosanes. Les résultats sur les chabots sont plus satisfaisants car le test pour le substrat R42M réalisé sur 24h a donné lieu à une proportion de poisson ayant réalisé au moins un franchissement amont net de plus de 40% contre 23% pour ce même avec le substrat 0000. Dans ce cas-ci également, les données ne sont pas assez nombreuses que pour prouver sur base statistique l'impact positif du substrat R42M. Les répartitions en fin d'expérience avec substrat sont toutefois meilleures en termes de taux de déplacement amont et de franchissement amont net. En effet, on recense 1,13 franchissement amont net/poisson pour R42M et 0,5 franchissement amont net/poisson pour 0000.

Etonnement, les déplacements amont obtenus avec les chabots sur les bassins standards sont beaucoup moins satisfaisant que sur la passe entière. Cela peut s'expliquer par le nombre de chabot utilisés pour les différentes expériences. En effet, dans le cas des expériences sur les bassins

standards, 20 à 25 poissons sont utilisés pour un lot de 85 contre 60 poissons lors des expériences sur la passe entière. Afin de respecter les lois de similitudes, les plus jeunes poissons étaient sélectionnés pour les expériences. Cette méthode sélective a donné une moyenne des tailles supérieure pour les expériences à 60 poissons (7,92cm) que pour celle à 20-25 poissons (7,07cm). L'influence de ce facteur peut potentiellement expliquer les différences entre le taux de déplacement amont des expériences sur bassins standards pour le substrat R42M (0%) et ce taux pour les expériences sur la passe entière pour le même substrat (42%).

On se propose dès lors d'analyser statistiquement l'influence de la taille des poissons sur leur tendance à remonter la passe. Les mesures sur les chabots en fin d'expérience corrélées à leur bassin d'arrivée permettent de dresser un graphique comparant les tailles moyennes des individus mesurés dans chaque bassin. Ce graphe est présenté ci-dessous (*Figure 6.20*) et ne tient compte que des mesures récoltées sur les expériences menées sur la passe entière :



*Figure 6.20: Répartition des tailles de chabots dans la passe*

On remarque que la taille moyenne dans chaque bassin diminue légèrement lorsqu'on se retrouve à l'aval. Avant d'entrer dans l'inférence statistique, il est possible de réaliser une simple régression linéaire et d'en interpréter l'équation et le coefficient de détermination.

Dans ce cas-ci, la régression linéaire donne l'équation :  $Y = -0,266x + 9,09$  et un coefficient de détermination  $R^2 = 0,72$ . Le coefficient de détermination indique une certaine correspondance de l'équation avec la réalité même si cette équation n'est pas parfaitement représentative de la distribution des tailles dans les bassins. Le coefficient angulaire est de  $a = -0,266$  ce qui correspond à une diminution de la taille moyenne des chabots de 0,27cm à chaque déplacement d'un bassin vers l'aval. Cette différence est considérable sachant que des données sont récoltées sur sept bassins distincts.

La différence la plus marquée est celle de la taille moyenne des poissons à l'amont (P0). Elle est d'au minimum 1cm supérieure à la taille moyenne de n'importe quel autre bassin.

Cette différence est à comparer avec la distribution des tailles et l'amplitude du lot.

Afin de vérifier que la taille a en effet une influence sur la tendance des poissons à remonter la passe entièrement, un test d'hypothèse va être réalisé. L'hypothèse nulle ( $H_0$ ) sera que la taille moyenne des poissons à l'amont de passe en fin d'expérience est la même que celle du lot dans sa globalité. Notons qu'avec l'ensemble des 94 mesures prises sur le lot de chabot, l'écart-type et la moyenne ont pu être estimés avec une certaine précision.

Caractéristiques statistique du lot entier :

$X$  correspond à la mesure d'un chabot.

$$\mu_{lot} = m_{lot} = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum X = 7,92cm$$

$$\sigma_{lot} = S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (X - \bar{X})^2} = 1,38cm$$

On écrira le test statistique comme ceci :

$$H_0 : m_{p0} = m_{lot}$$

$$H_1 : m_{p0} > m_{lot}$$

$H_1$  est l'hypothèse alternative, rejeter  $H_0$  revient à accepter  $H_1$ .

Lors du test, on considère  $H_0$  comme vraie afin de vérifier sa véracité. Il faut ensuite définir une zone de rejet. Lors de tests d'hypothèses, il y a toujours une possibilité de rejeter l'hypothèse  $H_0$  alors qu'elle est vraie. Ce risque s'appelle le seuil de signification et s'écrit comme suit :

$$\alpha = P(\text{Rejet } H_0 | H_0 \text{ vraie})$$

On posera comme conseillé  $\alpha = 0,05$ . Une zone de rejet est associée à ce seuil de signification.

Dans notre cas,  $m_{p0} = 9,3cm$  et se base sur dix mesures alors que  $m_{lot} = 7,92cm$  se base sur 94 mesures. L'objectif est d'évaluer si la population présente à l'amont de la passe est de taille significativement différente à celle du reste du lot.

Etant donné que l'écart-type est connu et en partant du principe que  $H_0$  est vraie, on peut dire que  $\bar{X} \sim N(m_{lot}, \frac{\sigma_{lot}}{\sqrt{n}})$ . On utilise ensuite le théorème central limite et la fonction discriminante  $T$  définie comme suit :  $T = \frac{\bar{X} - m_{lot}}{\frac{\sigma_{lot}}{\sqrt{n}}} \sim N(0,1)$ .

Il faut maintenant déterminer les bornes de la zone d'acceptation. Cette zone concernant l'écart réduit doit être centrée en 0. Il faut déterminer à l'aide des tables la valeur maximale  $t_\alpha$  de l'écart réduit de manière à ce que :

$$P(T \leq t_\alpha) = 1 - \alpha = 0,95$$

A l'aide des tables on trouve  $t_\alpha = 1,65$ .

On peut calculer  $T = \frac{9,3-7,92}{\frac{1,38}{\sqrt{10}}} = 3,16$  et donc  $T > t_\alpha$ . L'hypothèse H0 est rejetée et de ce fait H1 acceptée.

La taille moyenne des poissons à l'amont de la passe est donc significativement plus importante que celle du lot. On en conclut donc une influence significative de la taille des poissons quant à leur tendance à remonter la passe.

Les résultats sur les bassins standards n'ont amené qu'à une stabilisation ou à des déplacements dirigés vers l'aval. Il est dès lors intéressant de réaliser un second test d'hypothèse pour déterminer si les poissons ne se déplaçant pas vers l'amont (bassin d'arrivée P4, P5 et P6) sont de taille significativement plus faible à la population générale ou pas.

Pour ce faire, un test similaire est réalisé avec pour hypothèses :

$$H0 : m_{P4,P5,P6} = m_{lot}$$

$$H1 : m_{P4,P5,P6} < m_{lot}$$

Dans ce cas,  $m_{P4,P5,P6} = 7,41cm$  et se base sur 47 mesures alors que  $m_{lot} = 7,92cm$  se base sur 94 mesures.

Les conditions sont également respectées pour ce test et on peut dire que la fonction discriminante T suit une loi normale réduite :  $T = \frac{\bar{x} - m_{lot}}{\frac{\sigma_{lot}}{\sqrt{n}}} \sim N(0,1)$ .

La borne d'acceptation est la même que pour le test précédent et vaut  $\alpha = 0,05$  et donc la valeur maximale  $t_\alpha$  est de 1,65. La zone de non-rejet de l'hypothèse nulle se définit comme suit :

$$P(T \geq -t_\alpha) = 1 - \alpha = 0,95$$

Or,  $T = \frac{7,41-7,92}{\frac{1,38/\sqrt{47}}} = -2,53$  et l'hypothèse nulle est rejetée ce qui revient donc à accepter l'hypothèse que  $m_{P4,P5,P6} < m_{lot}$ . La taille moyenne des chabots se stabilisant ou se déplaçant vers l'aval est donc significativement plus faible que celle du lot entier.

Deux éléments principaux peuvent être tirés de ces deux tests d'hypothèses :

- 1) Pour les expériences sur la passe entière, les chabots remontant entièrement la passe ont une taille moyenne (9,3cm) significativement supérieure à celle de la moyenne du lot global (7,92cm). Les chabots qui n'effectuent pas de déplacement ou se déplacent vers l'aval ont une taille moyenne (7,41cm) ce qui est significativement plus faible que la moyenne du lot. Pour les expériences sur les bassins standard, la taille moyenne des chabots expérimentés était de 7,07cm (n=35) soit une taille inférieure à 7,41cm. La discordance des résultats entre les expériences sur la passe entière et bassins standards peut donc être au moins en partie relatée aux différences de taille.

- 2) Un chabot à taille adulte mesure rarement plus de 15cm, les lois de similitude indiquent que pour le modèle réduit, les poissons doivent mesurer de 25 à 30% de leur taille adulte. Les chabots de 7,07cm sont plus grands que la taille préconisée par les lois de similitude et ne parviennent pas à remonter la passe même en la présence de substrat. Il est par conséquent peu probable que le substrat R42M permettent en réalité à une large gamme de chabots de remonter les passes mosanes.

Malgré ces conclusions, le substrat R42M donne de meilleurs résultats en terme de déplacement amont pour les loches et chabots ce qui indique une favorisation des déplacements au sein de la passe pour deux espèces benthiques distinctes. Par extension de ces résultats, on peut dire que la présence du substrat aidera les différentes espèces benthiques à remonter les passes une fois ceux-ci dans le dispositif.

#### 6.5.1.3 *Hotu*

Les expérimentations sur les hotus n'ont pas été (à part l'expérience préliminaire) très convaincantes en termes de déplacement amont mais celles-ci ont néanmoins permis de mettre en évidence certains éléments du comportement de cette espèce bonne nageuse face à la présence d'éléments de fond.

Tout d'abord, il faut tenir compte que le hotu est une espèce grégaire et très peureuse (Hanson M., comm. perso). Leurs mouvements interbassins étaient davantage motivés par la peur que par le désir d'exploration. Ces mouvements ont permis de montrer leurs capacités à franchir des seuils. Toutefois, c'est plutôt leur comportement à l'intérieur des bassins vis-à-vis des substrats qui était intéressant à analyser. L'étude sur ce comportement a montré des similitudes très fortes entre le comportement avec et sans substrat ce qui indique que l'espèce n'est pas particulièrement dérangée par leur présence. Une hauteur de 2cm est en effet assez faible compte tenu du fait que cette espèce nage dans la colonne d'eau. On peut raisonnablement admettre que les bons nageurs ne seront pas perturbés par les substrats tant que ceux-ci n'auront pas une hauteur trop élevée.

#### 6.5.1.4 *Civelle*

Les civelles de 7 à 8cm se sont montrées fébriles en termes de capacité de nage par rapport au courant usuel (8l/s) dans le modèle réduit. En général, les civelles remontent les passes à brosses alors que les anguillettes remontent des plans inclinés avec des substrats alimentés par une lame d'eau. L'expérience préliminaire (effectuée avec substrat R42M) amène donc à penser que les civelles auront du mal à franchir les passes à bassins réelles même avec substrat. De plus, les civelles sont transparentes et ont tendance à se positionner dans des recoins très compliqués à atteindre. Elles sont difficiles à filmer et à récupérer dans la passe.

Néanmoins, l'espèce bouge beaucoup au sein du modèle et a une tendance à la montaison même lorsqu'elle est juvénile. Des essais sur des individus plus âgés pourraient dès lors être filmés puisque les anguillettes sont opaques. Il reste intéressant de voir si les anguillettes sont plus aptes à emprunter les passes à bassins successifs.

### 6.5.2 Comportement intrabassin

Les graphes de densité de présence des hotus et des chabots ont été adimensionnalisés de la même manière que ceux des loches dans la partie optimisation. Cela est réalisé de sorte à ce qu'une même couleur sur l'ensemble des graphes corresponde à un même taux de présence (en fonction du nombre de détection) et pas à un temps de présence pour lequel la durée du film influencerait directement les coloris.

Notons également qu'aucune information quant aux densités de présence ne sont disponibles pour les chabots sans substrat ni pour les civelles avec ou sans substrat. Pour les hotus, c'est le bassin P3 qui est représenté sur les graphiques alors que le bassin P2 est utilisé pour les loches et chabots.

#### 6.5.2.1 Substrat R42M

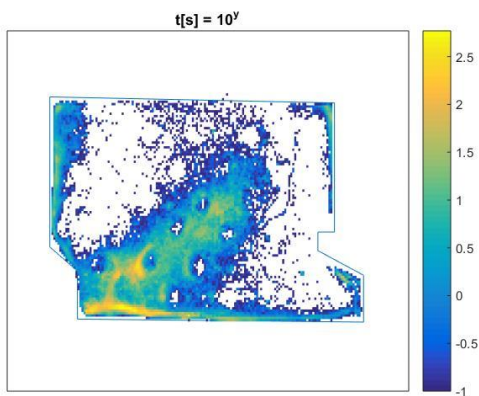


Figure 6.21: Densité de répartition des loches en R42M

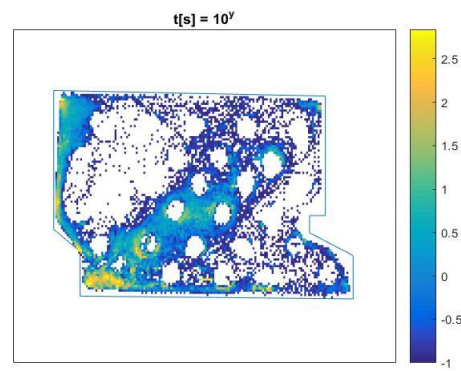


Figure 6.22: Densité de répartition des chabots en R42M

On distingue très clairement les substrats sur le graphique des chabots et un peu moins clairement sur celui des loches. Les loches ont bien plus tendance à se courber que les chabots ce qui peut déplacer leur centroïd sur un substrat sans pour autant que le poisson soit positionné dessus. De manière générale les deux espèces benthiques nagent dans le fond et utilisent les substrats pour se

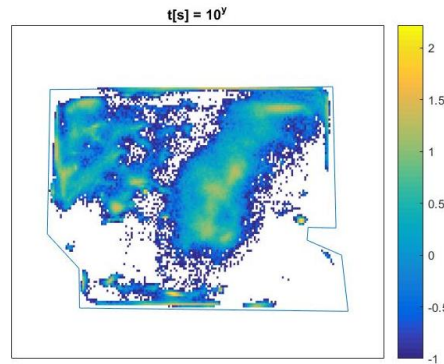


Figure 6.23: Densité de répartition des hotus en R42M

protéger du courant ce qui fait apparaître la forme des substrats sur les graphes de densité de présence. On remarque également que les zones utilisées sont très semblables pour les chabots et loches. Leur comportement intrabassin est fort similaire, ils se protègent des courants forts en se positionnant dans les zones de recirculation et/ou en utilisant les éléments de fond et évitent totalement le courant principal.

Les hotus quant à eux ont un comportement totalement différent puisqu'aucun substrat n'apparaît sur le graphique. Ceux-ci nagent au-dessus des substrats et utilisent des zones différentes de celles empruntées par les espèces benthiques. Les hotus sont régulièrement dans les zones à courant fort et se retrouvent également dans les zones de recirculation de la passe. Les hotus présentent un taux de présence plus faible que les espèces benthiques le long des parois.

#### 6.5.2.2 Substrat 0000

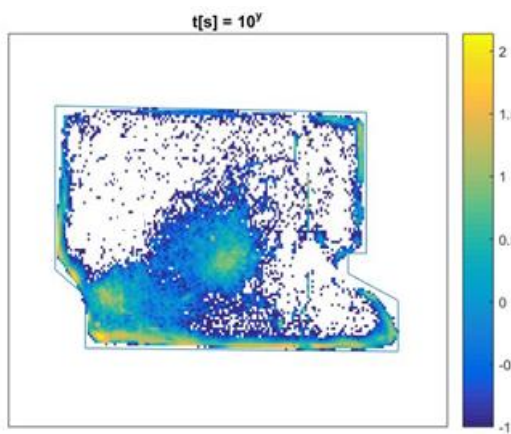


Figure 6.24: Densité de répartition des loches en 0000

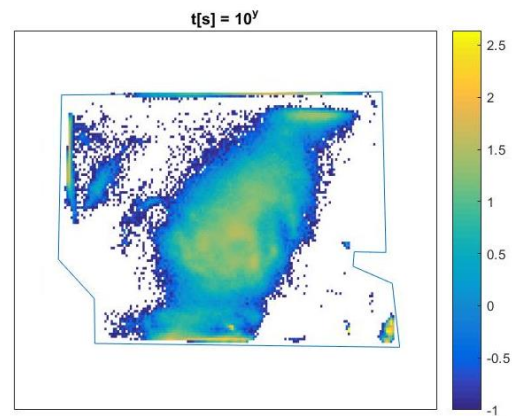


Figure 6.25: Densité de répartition des hotus en 0000

Lorsqu'aucun substrat n'est présent, les hotus utilisent des zones assez similaires que pour les substrat R42M, ils sont présents sur toute la largeur du bassin et plus particulièrement aux alentours de la zone de recirculation. Ils ont tendance à se laisser quelque peu emporter par le courant avant de se repositionner aux alentours du centre de la passe. Les loches sont quant à elles présentes au centre de la passe et près des parois. Les comportements au sein de la passe sont plus dépendants des espèces que des substrats.

# Chapitre 7

---

## Conclusion et perspectives

---

### 7.1 Conclusion

---

L'étude s'inscrit dans la continuité de recherches menées autour du modèle réduit à l'échelle 1 :5 de la future passe de Rivière. La construction de ce modèle en 2013 avait pour objectif l'étude de l'écoulement. A partir, de l'année académique 2014-2015, il a été décidé d'étudier le comportement des poissons au sein de la passe et de cette manière croiser les disciplines en ajoutant l'aspect biologique à l'hydraulique. La première étude multidisciplinaire effectuée par J.C. Pype (2014-2015) a permis de mettre en place une base solide pour le protocole expérimental et d'obtenir les premiers résultats expérimentaux convaincants pour les saumons juvéniles. Le second mémoire centré sur le vivant a étendu la variété d'espèces expérimentées aux chevaines, ablettes communes et chabots. Ce mémoire réalisé par E. Courtois et L. Van Audenhaege (2016-2017) a également développé le traitement d'images permettant dès lors d'obtenir des informations numériques quant au comportement des poissons au sein d'un bassin. L'analyse de ce comportement se base sur la représentation des zones de présence et des distributions de vitesses dans un bassin. L'objectif final de ces travaux sur le vivant est de pouvoir prédire le comportement des poissons face à une passe à bassins réelle et d'en faciliter sa franchissabilité.

La présente étude s'est appuyée sur le protocole expérimental, le protocole d'acquisition, le traitement d'images et les précédents résultats expérimentaux pour étudier dans son ensemble le comportement de deux espèces benthiques (la loche et le chabot), d'une espèce rhéophile (le hotu) et de l'anguille européenne. Ces espèces hormis l'anguille ont été expérimentées avec et sans la présence d'un substrat de fond afin d'analyser l'influence de divers aménagements du fond de la passe sur le comportement des poissons. L'objectif principal des recherches était d'évaluer le potentiel de l'aménagement de la surface de fond et d'optimiser son efficacité pour une espèce benthique. D'autres aspects ont également évolué durant les recherches. La suite de cette section répond aux objectifs et enjeux présentés en début de document.

Dans un premier temps, une loi d'échelle liant la taille des poissons à introduire dans le modèle à leur taille adulte a été revue. Lors des études précédentes, ce rapport était similaire à l'échelle des longueurs du bassin soit 1 :5. Une nouvelle loi basée sur les capacités natatoires des poissons et plus particulièrement sur la vitesse maximale et la vitesse de croisière a été établie. Celle-ci se base sur deux équations empiriques de Kapotodis et Gervais, l'une liée à la vitesse maximale et l'autre à la vitesse de croisière. Ces équations ont été déterminées de manière expérimentale sur des poissons à nage subcarangiforme et les différentes vitesses ne sont fonction que la longueur du poisson. L'extrapolation des équations empiriques indique qu'un poisson mesurant entre 25% et 30% de sa taille adulte aura une difficulté à remonter le modèle réduit comparable de celle ressentie par les adultes dans les passes réelles.

Une simulation numérique complémentaire à celle réalisée lors des précédentes études a été développée à l'aide du logiciel SolidWorks FlowSimulation ®. L'intérêt de cette simulation était de jouer aisément sur l'agencement du fond de la passe et d'obtenir les distributions de vitesses d'eau correspondantes dans le fond de la passe. Cela a permis de mettre en évidence des zones de recirculation, les zones à courant faible apportées par les substrats et de les comparer aux zones de présence et aux vitesses des poissons dans un bassin standard. Cette simulation appuie l'analyse comportement intrabassin. Une bonne corrélation entre les vitesses mesurées in situ et celles calculées par le modèle SolidWorks a été obtenue.

Dans la section matériel vivant, des recherches bibliographiques ont approfondi la connaissance sur les loches, chabots, hotus et anguilles européennes en termes de capacités natatoires, migrations et autres aspects comportementaux. La traçabilité ainsi que des données statistiques sur la distribution des tailles des lots ont aussi été présentées. Ces éléments ont permis une meilleure prise de recul quant aux comportements des espèces dans le modèle. Cela a permis également d'estimer les vitesses maximales et de croisière de nage des poissons expérimentés et d'élaborer des statistiques inférentielles quant à l'influence de la taille sur la franchissabilité de la passe.

En ce qui concerne le matériel d'analyse, des améliorations sont explicitées et datées. L'apport majeur consiste en un contrôle permanent des niveaux d'eau à l'amont du canal d'attrait et de la passe ainsi qu'à l'aval. Le débit dans le canal d'attrait et dans la passe ainsi que la température dans le modèle sont également enregistrés continuellement. Le contrôle des données d'environnement permet de vérifier la validité des expériences et de s'assurer que des résultats potentiellement erronés ne sont pas liés à une modification du milieu.

Ensuite, des substrats types ont été conçus lors de l'établissement d'une stratégie d'optimisation des éléments de fonds. Des recherches bibliographiques sur les hauteurs, sections, densités usuelles ont été effectuées afin de miser directement sur des agencements de la surface de fond affectées par les poissons. L'objectif de ces recherches était de réduire autant que possible le nombre de substrat à tester tout en optimisant efficacement les différents facteurs d'intérêt. Le protocole expérimental a lui aussi évolué, les essais ont été menés sur des lots de 25 individus d'une même espèce pour des durées soit courtes (4 heures) soit longues (20-24 heures). Pour chaque substrat,

un minimum de deux expériences courtes et longues ont été effectuées ce qui a facilité la reproductibilité des essais et augmenté la fiabilité des comparaisons entre les résultats des divers substrats.

La période expérimentale portée sur l'optimisation du substrat a été uniquement basée sur l'espèce de fond qu'est la loche. Cette espèce benthique a été testée avec six types de substrats différents et sans substrat. Les analyses se sont portées d'abord sur les proportions de déplacement vers l'amont, vers l'aval et les non-déplacements et par la suite sur les zones de présence et les distributions de vitesses des loches au sein d'un bassin standard. Les expériences et analyses sans substrat ont mis en évidence la difficulté des loches juvéniles à se maintenir et à se déplacer vers l'amont dans les bassins standardisés du modèle. En effet, la plupart d'entre elles se comportait davantage vers l'aval et avait du mal à se stabiliser dans un bassin. L'ajout de substrats de fond dans la passe a toujours donné lieu à des résultats similaires ou meilleurs en termes de capacité de maintien ou en proportion de remontée vers l'amont. Les individus utilisent relativement bien les substrats et ne se retrouvent presque jamais dans le courant principal. L'analyse approfondie de l'influence de chaque substrat a permis de souligner certaines tendances. Plus les substrats sont imposants et protègent du courant, plus la stabilisation des loches dans un bassin est facilitée mais moins les poissons sont attirés par l'échancrure amont. Un juste milieu entre la stabilisation et l'attraction vers l'amont doit être trouvée. Le substrat répondant le mieux aux facteurs d'intérêts était R42M soit des plots ronds de 4cm de diamètre, d'une hauteur de 2cm et disposé dans le bassin en densité moyenne. Le manque de données n'a pas permis de prouver que ce substrat était statistiquement meilleur que les autres et aucune influence de la taille quant à la franchissabilité de l'ouvrage n'a pu être mise en évidence.

Enfin, des expériences menées sur d'autres espèces sans substrat de fond et avec le substrat optimisé ont été réalisées. Ces tests étaient réalisés soit sur la passe entière soit sur les bassins standards. L'intérêt était d'évaluer l'efficacité du substrat sur une autre espèce benthique qu'est le chabot et de s'assurer que des espèces meilleures nageuses représentées par le hotu ne soient pas perturbées par la présence d'éléments de fond. Les essais sur les plus jeunes chabots du lot ont amené énormément de déplacement vers l'aval alors que ceux sur des chabots légèrement plus grands ont donné lieu à d'importants taux de déplacement amont (jusqu'à 40%). Le comportement intrabassin des chabots est très similaires à celui des loches, les espèces benthiques restent dans le fond et se protègent du courant en se positionnant dans les zones à courant faible et en utilisant les substrats. Un test d'hypothèse a confirmé l'influence de la taille quant à la franchissabilité de la passe pour les chabots. Les tests pour les hotus avec et sans substrats ont donné des résultats extrêmement similaires au niveau de leur comportement et des zones de présence. Les hotus nageaient par-dessus les éléments de fond dans la colonne d'eau, l'analyse laisse penser que l'espèce n'est pas particulièrement dérangée par la présence des plots.

De manière générale, les résultats obtenus sont assez encourageants. La présence de substrats améliore dans tous les cas les déplacements vers l'amont des espèces benthiques, des tendances comportementales face aux différents substrats ont pu être décelées des analyses et un substrat

optimisé a pu être déterminé. Ainsi, la présence de substrats dans les passes à poissons est une solution possible pour en améliorer la franchissabilité pour les espèces de fond moins bonnes nageuses une fois présente dans la passe. Cependant, les loches et les chabots sont en moyenne de tailles supérieures à celles conseillées par les lois de similitude et il est important de garder à l'esprit que les substrats ne résolvent en rien la problématique de l'entrée de la passe pour les poissons de fond. Lors de toutes les expériences réalisées, les individus étaient directement introduits dans la passe. De plus, bien qu'un bon nombre d'éléments soit mis en œuvre pour reproduire l'environnement naturel des espèces, les poissons se trouvent dans un tout nouvel environnement où une perte de repère est normale. Le comportement des poissons peut donc différer de celui dans la nature.

D'autres éléments pratiques ne sont pas pris en compte lors de cette étude. Le coût économique de l'aménagement du fond de la passe et sa proportion par rapport à l'ouvrage global n'est pas pris en compte. Les difficultés liées à l'entretien ne sont pas non plus mentionnées.

Avant de clôturer cette section, on rappellera l'importance du côté multidisciplinaire de ce mémoire. La complémentarité des domaines scientifiques de la biologie et du génie civil est indispensable à la compréhension du sujet dans sa globalité. Afin de réaliser des analyses complètes, un maximum de facteurs relatifs à ces deux domaines scientifiques ont été pris en compte. Par exemple, la quantification des zones de présence et des distributions de vitesse peut confirmer une tendance comportementale. Ce genre de mise en commun ont favorisé l'approfondissement des analyses.

## 7.2 Perspectives

---

La présente étude a la particularité d'être centrée sur un aspect expérimental, ce qui implique une évolution continue du protocole d'essai, de la collecte des données, de l'analyse des données et des éléments de recherches. Les perspectives d'améliorations sont donc vastes. On proposera de les décomposer en six points qui sont détaillés les uns après les autres ci-dessous :

### **Matériel d'acquisition**

Les seuls moyens de quantifier le comportement des poissons dans la passe étaient l'observation visuelle et l'analyse caméra. Avec ces deux méthodes, l'analyse nocturne n'est pas envisageable et une quantité importante de données sont ainsi éliminées. Certaines espèces de poissons ont un comportement plus actif la nuit et donc une analyse adaptée doit être envisagée. Le système RFID est un système de puces (PIT-Tag) à placer dans les individus, ces puces sont couplées à des antennes radars. Il est possible de savoir où se trouve le poisson quand il passe à proximité des antennes. Les PIT-Tag doivent être suffisamment grands pour être captés par les antennes mais ne peuvent pas être trop conséquents par rapport aux poissons sans quoi leur introduction pourrait causer une forte mortalité ou encore réduire les capacités de nage des individus. Cette intervention n'étant pas sans risque pour le poisson et doit être menée par des professionnels. Néanmoins, ce système est intrusif et ne donne pas d'information quant au comportement des poissons à l'intérieur des bassins, il ne résout que partiellement le problème d'acquisition des données durant la nuit. C'est pourquoi il est nécessaire de continuer à développer le traitement d'images.

Le défaut majeur de l'actuel traitement d'images est la difficulté à capter le nombre de poissons présent dans un bassin lorsque ceux-ci sont en groupe. Une perspective d'amélioration serait de placer un polymère de couleur sur la tête des poissons et de filmer les bassins en détectant cette tâche de couleur. Cela permettrait de différencier plusieurs poissons quand ils s'agglutinent les uns aux autres.

Les caméras pourraient également être améliorées, les simples caméras sont suffisantes quand il s'agit de filmer la journée mais quand la nuit tombe, elles ne sont plus d'aucune utilité. L'utilisation de caméras infrarouges est une possibilité d'amélioration. Cela permettrait de suivre l'évolution des poissons dans les bassins même quand toutes les lampes sont éteintes.

Une caméra placée par-dessous la passe permettrait d'éviter la pose de plaque de plexiglass et les potentielles erreurs de détections liées aux turbulences dans un bassin. Il faudrait cependant que la partie inférieure soit modifiée pour la rendre transparente.

Enfin, une caméra latérale permettrait d'avoir des informations supplémentaires quant au positionnement vertical des poissons. Pour en déduire des graphiques de densité de présence et de distribution de vitesse, il est nécessaire de prévoir un fond blanc en arrière-plan.

### **Espèces utilisées**

Un test préliminaire a été réalisé sur les civelles mais n'a pas été concluant (Section 6.4). Travailler sur la civelle de l'anguille ou bien sur l'anguille elle-même semble être une piste à privilégier pour les études futures en raison de sa menace d'extinction. La mise en place du protocole et du traitement d'images ne seront pas aisés car les civelles sont transparentes, capables de se faufiler à travers les filtres et difficiles à récupérer dans la passe.

Il est néanmoins possible de travailler sur cette espèce moyennant un colmatage des interstices. L'acquisition d'images sera facilitée si on trouve sur des anguillettes qui seront davantage foncées que les civelles.

Des expériences sur les chabots et loches ont déjà été réalisées, un substrat optimisé a été proposé et son influence sur des espèces rhéophiles a été évalué. Il serait intéressant de tester son influence sur des poissons de fonds bons nageurs afin de voir si ceux-ci ne sont pas dérangés par les substrats ou si au contraire ils sont aidés par les éléments de fond. Les brèmes communes ou bordelières conviendraient assez bien pour ces essais.

### **Éléments d'intérêt**

Un élément qui est primordial pour permettre aux poissons de remonter une passe est l'entrée dans la passe. En effet, si le poisson de fond ne parvient pas à la trouver ou bien qu'il est incapable de franchir le premier seuil, les études réalisées sur la franchissabilité des bassins ne sont pas valorisées. Une étude sur le débit d'attrait ainsi que sur un dispositif amenant les espèces benthiques à trouver plus facilement l'entrée de la passe serait complémentaire à celle réalisée ici.

Durant la phase de test sur la passe complète un seuil d'une hauteur de 12 cm a été remarqué. Celui-ci empêchait la majorité de la population testée d'évoluer plus en amont de la passe. Il semble donc que dès qu'une hauteur se dresse devant les poissons de fonds, le taux de déplacement amont chute. Un abaissement de ce seuil ou une surélévation du bassin aval sont des solutions qui permettraient à toutes les espèces benthiques d'accéder plus facilement aux bassins amont.

### **Substrats**

Des substrats de type macro-rugosité ont été utilisés, la taille des substrats était du même ordre de grandeur que la taille des poissons. Cependant, il est possible d'améliorer la passe en augmentant la rugosité de fond avec de l'herbe synthétique. Cette fine couche de fond permettra aux poissons benthiques d'adhérer à la surface et donc faciliter leur stabilisation sans diminuer l'attractivité de l'échancrure amont (voir Annexe A: Lexique). La comparaison de l'effet de l'herbe synthétique avec la macro-rugosité s'avère très intéressante.

### **Automatisation du modèle**

Parmi les améliorations apportées au modèle, une grande partie est liée à l'automatisation des expériences. Les mesures des conditions environnementales ont été intégrées au modèle notamment

via la calibration des capteurs de niveaux et débitmètres. Les données hydrauliques sont enregistrées par le logiciel Hydrocap. Il est primordial d'aller vers une automatisation des systèmes de mesures afin de standardiser toujours un peu plus les tests. Au plus le modèle va fonctionner seul, au plus les données obtenues seront comparables entre elles.

Le matériel nécessaire à l'automatisation de la lumière est présent au Laboratoire des Recherches Hydrauliques, une proposition de paramétrage est proposée en Annexe C. La programmation n'est pas effectuée mais l'automate permettra de reproduire le cycle circadien et augmentera dès lors l'automatisation du modèle. L'allumage progressif des lampes réduira le facteur stress des poissons et évitera l'éventuel biais lié à cet aspect.

### **Test statistique**

Pour pouvoir réaliser des tests d'hypothèses, le nombre de données doit être supérieur à vingt. Dans le cas de l'optimisation du substrat, il aurait été nécessaire d'avoir des taux de répartition sur vingt substrats différents afin de définir si certains d'entre eux procuraient des taux de déplacement amont, aval ou une stabilité significativement différents des autres. Si on considère que quatre expériences par substrat sont nécessaires pour avoir des taux représentatifs, il aurait fallu un total de quatre-vingt expériences.

Par contre, des tests statistiques sur les loches et chabots quant à l'influence de la taille sur la franchissabilité de la passe ont pu être effectués puisqu'avec 166 mesures pour les loches et 94 pour les chabots, la moyenne et l'écart-type des lots ont pu être déterminés. Une fois ces deux paramètres statistiques déterminés pour la population, il était possible de vérifier si la taille moyenne de la population retrouvée dans un bassin était significativement différente ou pas à la moyenne de la population totale.

Les besoins en termes de données statistiques varient en fonction des tests que l'on veut effectuer. Une perspective d'amélioration serait d'anticiper les tests d'hypothèses avant la réalisation d'expérience et d'adapter la stratégie expérimentale afin de générer des données exploitables par l'analyse inférentielle.



# Chapitre 8

---

## Bibliographie

---

Baisez A., 2001. *Optimisation des suivis des indices d'abondance et des structures de taille de l'Anguille européenne (Anguilla anguilla) dans un marais endigué de la côte atlantique. Relations « espèces-habitats »*. Université Toulouse III, Cemagref, Bordeaux, thèse de doctorat, pp.396

Baker, E., A. Jamaluddin, and J. Li. 2015. *Cottus gobio*. USGS Nonindigenous Aquatic Species Database, Gainesville, Florida, and NOAA Great Lakes Aquatic Nonindigenous Species Information System, Ann Arbor, Michigan. Sur <http://nas.er.usgs.gov/queries/greatlakes/FactSheet.aspx?SpeciesID=45&Potential=Y&Type=2&HUCNumber=>, consulté le 04 avril 2018.

Ballu A. (2017). *Étude numérique et expérimentale de l'écoulement turbulent au sein des passes à poissons à fentes verticales. Analyse de l'écoulement tridimensionnel et instationnaire*, Université de Poitiers, Disponible sur Internet <http://theses.univ-poitiers.fr>, consulté le 05 février 2018

Baudoin J.M., Burgun V, Chanseau, M, Larinier, M., Ovidio, M., Sremski W, Steinbach P., Voegtle, B. (2015). *Assessing the passage of obstacles by fish*. Concepts, design and application. pp. 21,36,61-73,83

Baagnée A., De Greef J.C. (2014). *Modélisation numérique de l'écoulement d'une échelle à poissons*. Université Catholique de Louvain, Ecole polytechnique de Louvain (EPL), pp.178

Benitez J.P., (2018), Etude dynamique des déplacements de montaison de poissons holobiotiques potamodromes, par l'intermédiaire de passes migratoires, Université de Liège, Faculté des sciences, pp. 1-29

Berg, L.S., 1964. *Freshwater fishes of the U.S.S.R. and adjacent countries*. volume 2, 4th edition. Israel Program for Scientific Translations Ltd, Jerusalem. (Russian version published 1949).

Blaxter J.H.S., Dickson W., 1959. *Observations on the swimming speeds of fish*. J. Cons. Perm. Int. Explor Mer, 24 (3) : 472-9.

Boetius I., Boetius J., 1980. *Experimental maturation of female silver eels, *Anguilla anguilla*. Estimates of fecundity and energy reserves for migration and spawning*, Dana, 1 : pp. 1-28.

Burgun V, (2014), Les dispositifs de franchissement, Onema, sur [http://www.eau-rhin-meuse.fr/sites/default/files/medias/actus/2014/JTContEco/8a\\_Passe\\_a\\_poissons\\_BURGUN.pdf](http://www.eau-rhin-meuse.fr/sites/default/files/medias/actus/2014/JTContEco/8a_Passe_a_poissons_BURGUN.pdf), consulté le 25 février 2018.

Carling PA, Dobson JH. *Fish Pass Design and Evaluation* : Phase1 –National Rivers Authority, Institute of Freshwater Ecology, 1992, pp.15

CITES, UNEP-WCMC, 2017. *The Checklist of CITES Species Website*. Appendices I, II and III. sur <https://www.cites.org/eng/app/appendices.php>, consulté le 06 mars 2018

Commission internationale de la Meuse, *Obstacles à la migration des poissons dans la Meuse de l'embouchure à La Chiers*, sur le portail de meuse-maas.be, <http://www.meuse-maas.be/CIM/media/EspacePublic-Documents/Publications/1997-2002/PUBLHINDERNISF.pdf?ext=.pdf>, consulté le 09 mai 2018

COROLLA Jean-Pierre, KUPFER Michel *in* : DORIS, (2017) : *Cottus gobio* Linnaeus, 1758, sur <http://doris.ffessm.fr/ref/specie/241>, consulté le 04 avril 2018

Courtois E, Van Audenhaege L (2017). Passes à poissons – Etude comportementale de différentes espèces de poisson dans un modèle réduit de la passe à bassins multi-espèces de Rivière en Meuse belge. Université catholique de Louvain, Ecole polytechnique de Louvain (EPL), pp.91-94

Delbeuck C., Identification des poissons de Wallonie : clef visuelle simplifiée, Service Public de Wallonie

Ecole de pêche, Hotu, sur [http://www.ecoledepeche.be/Fr/Le-hotu\\_277\\_2.html](http://www.ecoledepeche.be/Fr/Le-hotu_277_2.html), consulté le 29 mai 2019.

François Y., Saint-André P.A., *Théléostéens et holostéens*, dans Encyclopaedia [en ligne], <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/teleosteens-et-holosteens/>, consulté le 29 mai 2018/

- Froese, R., and D. Pauly, (2016). *Cottus gobio* Linnaeus, 1758. FishBase. sur <http://www.fishbase.org/summary/Cottus-gobio.html>, consulté le 04 avril 2018.
- Gerday, J. Simon D., *Modernisation de la haute Meuse*, en ligne sur le portail wallonnie.be, <http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/export/sites/met.dg2/doc/fr/nouv/modernisation.pdf>, consulté le 07 mai 2018, pp 12-14
- Gomes P., Vighetti S., Larinier M., (2005), *Etude pour la conception de passes à poissons adaptées à l'apron*, Conception et retour d'expériences, Life apron, pp. 34
- Herold Jean-Pierre, Kupfer Michel, Corolla Jean-Pierre in : DORIS, (2014): *Chondrostoma nasus* (Linnaeus, 1758), sur <http://doris.ffessm.fr/ref/specie/2164>, consulté le 15 mai 2018
- Katopodis C., Gervais R. (1991), *Ichthyomechanics*, Freshwater Institute, Canada, pp.44
- Kirchhofer A, Müller D. (2012), *Conservation of Endangered Freshwater Fish in Europe*, Birkhäuser, p.269
- Kynard, B., Godinho, A. (2009). Migratory fishes of Brazil: Life History and fish passage needs. *River Research and Applications*. 25. pp.702 - 712.
- Larinier M., (1992), *Passe à bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles*, GSP, pp.50
- Larinier M. (1987). *Les passes à poisson : méthodes et techniques générales*. La Houille Blanche, N° 1/2, pp. 51-57
- Legault A., 1991. Etude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles. Communication EIFAC, Working party on eel, Dublin, pp.12
- Lelek, A., 1987. *Threatened fishes of Europe. The freshwater fishes of Europe* Vol.9. Aula-Verlag Wiesbaden. pp. 343.
- Linnaeus, C. (1748), *Systema naturae, sistens Regna tria naturae, in Classes et Ordines, Genera et Species, Editio Sexta, Emendata et Aucta*, Stockholmiae, Impensis Godofr. Kiesewetteri : pp. 1-224
- Lucas M., Baras E., 2008, *Migration of Freshwater Fishes*, John Wiley & Sons, pp. 171
- Lunel G., *Poissons du bassin du Lemán*, Histoire naturelle des poissons, pp. 97
- Matar. Y., Etude expérimentale de la nage anguilliforme : application à un robot biomimétique. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Ecole des Mines de Nantes, 2013. Français. <NNT : 2013EMNA0059>.
- Moelo J.Y. (2018). *Anguille* paru sur le site [www.observatoire-poissons-migrateurs-bretagne.fr](http://www.observatoire-poissons-migrateurs-bretagne.fr) (BGM), consulté le 20 mai 2018.

- Monk, S., Hays, M., Hawkes, T., Webb R., Hotchkiss, R., Belk, M., Rader, R. (2009). Fish Passage Can Be Improved by Introducing Hydraulic Refuge: Can the Effects Be Quantified?. 342. Pp. 1-15.
- Myers, P., R. Espinosa, C. S. Parr, T. Jones, G. S. Hammond, and T. A. Dewey. 2018. The Animal Diversity Web (online). Sur <https://animaldiversity.org>. <http://www.fishbase.be/Summary/SpeciesSummary.php?ID=6377&AT=loche+franche>, consulté le 4 mars 2018
- Ovidio M., (2015) Convention relative à la réhabilitation du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse – Rapport de convention février 2014-janvier 2015. Service Public de Wallonie, Région Wallonne, pp.8
- Ovidio, M., Dierckx, A., Matondo, B.N., Benitez, J.P., Philippart, J.C., Bernard, B., Mandiki, R., Evrard, A. Kestemont, P. (2016). *Rapport final annuel 2016 au Service Public de Wallonie, (DGARNE/DNF-SP) de la Subvention 2015-2016 relative au suivi scientifique de la réhabilitation du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse*. Université de Liège et Université de Namur, pp.29
- Ovidio M., Dierckx A. (2017) Convention relative à la réhabilitation du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse – Rapport de convention février 2016-janvier 2017. Service Public de Wallonie, Région Wallonne, pp.68
- Plongée Passion, *Chabot*, sur <http://www.plongee-passion.ch/Faune/Chabot.htm>, consulté le 29 mai 2018.
- Pype J.C. (2015). Passes à poissons – Etude comportementale expérimentale en modèle réduit. Université Catholique de Louvain, Ecole polytechnique de Louvain (EPL), pp.107
- Région Wallonne, (2007), *La réintroduction du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse : synthèse et résultats*, en ligne sur le portail wallonie.be, <http://environnement.wallonie.be/publi/education/saumon2000.pdf>, consulté le 07 mai 2018, pp. 5-19
- Région Wallonne, *Ecluse d'Ampsin*, sur <http://www.ecluseampsin.be/>, consulté le 08 mai 2018
- Romero, P., 2002. An etymological dictionary of taxonomy. Madrid, unpublished.
- Santos, T, Sanz-Ronda, F, Ruiz-Legazpi, J. (2013). Breaking the Speed Limit—Comparative Sprinting Performance of Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*) and Brown Trout (*Salmo trutta*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 70.
- Smavas, Travaux de rétablissement de la continuité écologique 2018 : l'Aisne et le Thabas dans le département de la Meuse, sur <https://smavas.fr/gestion-des-milieus/continuite-ecologique/travaux-en-cours/>, consulté le 29 mai 2018.

Sobachkin A. Dumnov G. (2014), *Numerical Basis of CAD-Embedded CFD*, NAFEMS World Congress, pp.1-12

Stevenson, C.; Baker, C. (2009). Fish Passage in the Auckland Region – a synthesis of current research. Prepared by NIWA for Auckland Regional Council. Auckland Regional Council Technical Report 2009/084.

Tudorache, C., Viaene, P., Blust, R., Vereecken, H. and De Boeck, G. (2008), *A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species*. Ecology of Freshwater Fish, 17: pp. 284–291.

Vinyoles, D., De Sostoa, A., Franch, C., Maceda-Veiga, A., Casals, F. and Caiola, N. (2010), *Life-history traits of the stone loach *Barbatula barbatula**. Journal of Fish Biology, 77, pp. 20–32.

Wheeler, A., 1992. Freshwater fishes of Britain and Europe. Rainbow Books, Elsley House, London. pp. 124

Zorzan, G., Bousmar, D. Libert, Y. (2016). Modernisation de l'échelle à poissons du barrage de Rivière (Haute-Meuse). Service Public de Wallonie, DG02, D0.222, pp. 49



---

# Annexes

---

---

# A. Annexe lexicale

---

## A.1 Lexique

---

**Habitat** : Un habitat correspond à un élément spatio-temporel du biotope qui possède des caractéristiques physico-chimiques et biologiques précises pour répondre à un besoin donné

**Cyprinidés** : Les cyprinidés (Cyprinidae) forment la plus grande famille de poissons d'eau douce. Elle contient environ 3 000 espèces. Ces espèces sont connues de par leur pêche et élevage en pisciculture pour l'alimentation humaine. Cette famille regroupe les carpes, goujons, vairons, ...

**Salmonidés** : Les salmonidés (Salmonidae) forment une famille de poissons à nageoires rayonnées. Elle fait partie de l'ordre des Salmoniformes. Les saumons, truites, ombres, ... font partie de cette famille.

**Smoltification** : Processus métabolique qui permet à un poisson d'eau douce anadrome de s'adapter à l'eau de mer. C'est notamment lors de ce processus que le saumon prend sa couleur argentée.

**Poisson rhéophile** : Se dit d'un poisson qui apprécie le courant, les eaux torrentielles.

**Poisson benthique** : Poisson qui vit dans le fond des eaux.

**Biome** : Ecosystèmes terrestres ou aquatiques caractéristiques de grandes zones biogéographiques soumises à un climat particulier.

**Eutrophication** : Phénomène qui décrit l'accumulation de minéraux et nutriments dans l'eau qui induit une croissance excessive des plantes et algues. Le résultat de cette croissance implique une diminution d'oxygène dans l'eau.

**Débitance** : débit d'eau maximal supportable par un canal pour un gabarit donné.

**Nage subcarangiforme** : Cette nage fait intervenir l'entièreté du corps dans la création de l'onde corporelle, elle est représentée sur l'image ci-dessous.



**Physostome** : Poisson dont la vessie natatoire communique directement avec l'œsophage.

**Grégaire** : Se dit des espèces qui ont tendance à vivre et se déplacer en groupe.

**Lucifuge** : qui n'aime pas la lumière.

**Attractivité d'une passe à poissons** : Ce terme désigne le côté attrayant d'une passe à poissons. Un courant fort au droit de l'entrée de la passe la rend plus attrayante. Ceci décrit l'intérêt, la tendance d'un poisson à rentrer dans le premier bassin d'une passe à poissons.

**Attractivité de l'échancrure amont** : Ce terme décrit le côté attrayant du bassin amont lorsqu'un poisson est présent dans une passe à bassins successifs. Cette attractivité est caractérisée dans cette étude par le nombre de franchissement amont sur le nombre de poissons expérimentés.

**Franchissement amont de seuil** : Passage d'un poisson provenant d'un bassin vers le bassin juste à l'amont de celui-ci.

**Franchissement aval de seuil** : Passage d'un poisson provenant d'un bassin vers le bassin juste à l'aval de celui-ci.

**Déplacement amont** : Ce terme est utilisé lorsqu'un poisson finit l'expérience un ou plusieurs bassins à l'amont de son bassin d'introduction.

**Déplacement nul (ou stabilité)** : Ce terme est utilisé lorsqu'un poisson finit l'expérience dans son bassin d'introduction.

**Déplacement aval** : Ce terme est utilisé lorsqu'un poisson finit l'expérience un ou plusieurs bassins à l'aval de son bassin d'introduction.

**Taux de déplacement/répartition amont** : Ce taux est un peu particulier, puisqu'intuitivement, il devrait être le rapport entre le nombre de déplacement à l'amont sur le nombre de poissons expérimentés. Ce n'est pas tout à fait le cas, au cours de l'analyse des données, c'est le nombre maximum de poisson en amont du bassin d'introduction qui a été pris en compte. Le taux de déplacement amont est donc pris au « meilleur moment ».

$$\text{Taux de déplacement amont} = \frac{\# \text{Maximum de poissons à l'amont} * 100}{\# \text{Poissons expérimentés}} [\%]$$

**Taux de déplacement/répartition aval** :

$$\text{Taux de déplacement aval} = \frac{\# \text{Poissons à l'aval en fin de test} * 100}{\# \text{Poissons expérimentés}} [\%]$$

**Taux de déplacement/répartition nul (ou stabilité)** :

$$\text{Taux de déplacement nul} = 100 - \text{Taux depl. amont} - \text{Taux depl. aval} [\%]$$

**Franchissement amont net :**

Ce facteur d'intérêt ne tient compte que des poissons effectuant un déplacement amont au cours de l'expérience. Parmi ces poissons, certains peuvent effectuer un franchissement amont net s'ils se retrouvent un bassin plus haut que leur bassin d'introduction en fin d'expérience ou plusieurs franchissement amont net s'ils finissent l'expérience plusieurs bassin en amont de celui d'introduction. Il faut bien garder à l'esprit que les déplacements nul et en aval ne sont pas comptabilisés.

Pour un poisson effectuant un déplacement amont :

$$\#Franchissement\ amont\ net = \#Franchissement\ amont - \#Franchissement\ aval \ [/]$$

Cette formule peut être utilisée de la même manière pour une population de poissons effectuant un déplacement amont.

**Taux de franchissement amont net :**

$$Taux\ de\ franch.\ amont\ net = \frac{\#franch.\ amont\ net}{\#Poissons\ expérimentés} \left[ \frac{franch.\ amont\ net}{poisson} \right]$$

**Taux de franchissement amont :** Décrit le rapport entre le nombre de franchissement amont réalisé par l'ensemble des poissons expérimentés et le nombre de poissons expérimentés.

$$Taux\ de\ franch.\ amont = \frac{\#franch.\ amont}{\#Poissons\ expérimentés} \left[ \frac{Franch.\ amont}{poisson} \right]$$

**Capacité à se maintenir dans la passe à LT :** Critère basé sur le taux de déplacement aval pour des temps long. Moins ce pourcentage est grand, plus la capacité de se maintenir est importante.

## B. Annexe liée au modèle (chapitre 2)

### B.1 Paramètres fixés lors de la modélisation numérique sur SolidWorks

Tableau 9.1: Paramètres enregistrés pour la modélisation numériques de l'écoulement sur SolidWorks

| <i>Fluide utilisé</i>          | <i>Eau</i>   |
|--------------------------------|--|
| <i>Type d'écoulement</i>       | Turbulent uniquement<br>Pas de cavitation<br>Paroi adiabatique |
| <i>Rugosité des parois</i>     | 1.5 micromètres  |
| <i>Température</i>             | 20°C   |
| <i>Pression</i>                | 1 atm  |
| <i>Intensité de turbulence</i> | 2%   |
| <i>Longueur de turbulence</i>  | 0.005m   |
| <i>Débit d'entrée</i>          | 8l/s   |
| <i>Nombre de mailles en X</i>  | 26   |
| <i>Nombre de mailles en Y</i>  | 14   |
| <i>Nombre de mailles en Z</i>  | 16   |

## B.2 Plan de la passe

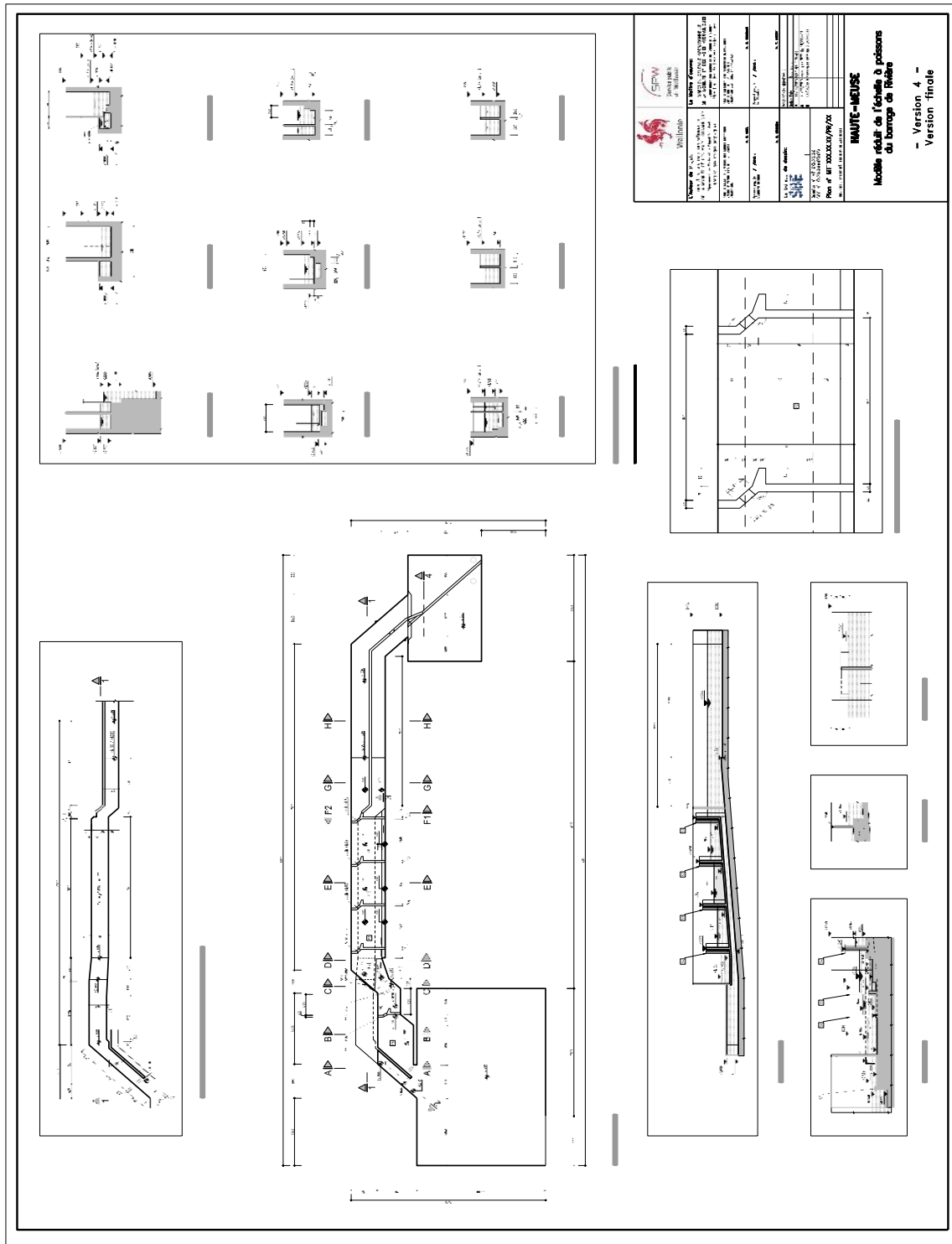



Figure 9.1: Plan du modèle réduit de la passe de Rivière présent au laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques (Zorzan, 2016)

## C. Annexe liée au matériel

### C.1 Attestations formation bien-être animal

UCL Université catholique de Louvain  Faculté de Médecine

**Animalerie Sectorielle - UCL**

Louvain en Woluwe, le 21 décembre 2017

Cette attestation confirme que Monsieur **Thibaut Cabo** a suivi la formation destinée aux personnes/techniciens apportant des soins élémentaires aux animaux.

Conformément à l'Annexe I de l'arrêté royal du 13 septembre 2004 relatif à protection des animaux d'expérience en ce qui concerne la formation des personnes effectuant des expériences sur animaux, y participant ou assurant les soins aux animaux utilisés à des fins expérimentales,

L'apprentissage comprend :

(i) Une formation théorique d'un minimum de 4 heures abordant les notions relatives aux thèmes repris ci-après : 1. Connaissance du mode d'utilisation et d'entretien des équipements de stérilisation et de nettoyage; 2. Entretien, nettoyage et désinfection des aires de service (hygiène des locaux-laveries, des couloirs,...); 3. Manipulation des déchets d'animalerie; 4. Réception, déchargement et entreposage des fournitures d'animalerie; 5. Notion du contrôle de l'environnement des animaux utilisés à des fins expérimentales et du bon fonctionnement des appareils de désinfection et de stérilisation; 6. Hébergement et soins aux animaux utilisés à des fins expérimentales en élevage et en cours de procédure; 7. Maniement et contention des espèces d'animaux les plus couramment utilisées à des fins expérimentales; 8. Contrôle de l'état de santé des animaux utilisés à des fins expérimentales; 9. Hygiène des locaux d'animalerie et des locaux d'expérience et apport des articles courants de protection (gants, masques, survêtements ou vêtements dédiés à l'animalerie,...); 10. Enregistrement des paramètres de l'environnement des animaux (température, humidité relative, etc.), des activités de soins aux animaux et d'hygiène des équipements et signalement des anomalies observées; 11. Sécurité du personnel et des animaux; 12. Notions sur la législation en vigueur en Belgique en matière d'hébergement et d'utilisation des animaux utilisés à des fins expérimentales.

(ii) Une formation pratique appropriée sur le terrain, sous la responsabilité directe d'une personne ayant la formation adéquate

Le responsable académique  
Prof Jean-Paul Dehoux

Le secrétaire du jury  
Dr Magali Crutzen

Prof. Jean-P. DEHOUX  
Dr. Magali CRUTZEN  
Faculté de Médecine UCL  
Avenue Hippocrate 55  
1200 - Bruxelles  
Tél. 02 764 55 22

Université catholique de Louvain – Secteur des Sciences de la Santé

UCL Université catholique de Louvain



Faculté de Médecine

### *Animalerie Sectorielle - UCL*

Louvain en Woluwe, le 21 décembre 2017

Cette attestation confirme que Monsieur **Antoine Bodarwé** a suivi la formation destinée aux personnes/techniciens apportant des soins élémentaires aux animaux.

Conformément à l'Annexe I de l'arrêté royal du 13 septembre 2004 relatif à protection des animaux d'expérience en ce qui concerne la formation des personnes effectuant des expériences sur animaux, y participant ou assurant les soins aux animaux utilisés à des fins expérimentales,

L'apprentissage comprend :

- (i) Une formation théorique d'un minimum de 4 heures abordant les notions relatives aux thèmes repris ci-après : 1. Connaissance du mode d'utilisation et d'entretien des équipements de stérilisation et de nettoyage; 2. Entretien, nettoyage et désinfection des aires de service (hygiène des locaux-laveries, des couloirs,...); 3. Manipulation des déchets d'animalerie; 4. Réception, déchargement et entreposage des fournitures d'animalerie; 5. Notion du contrôle de l'environnement des animaux utilisés à des fins expérimentales et du bon fonctionnement des appareils de désinfection et de stérilisation; 6. Hébergement et soins aux animaux utilisés à des fins expérimentales en élevage et en cours de procédure; 7. Maniement et contention des espèces d'animaux les plus couramment utilisées à des fins expérimentales; 8. Contrôle de l'état de santé des animaux utilisés à des fins expérimentales; 9. Hygiène des locaux d'animalerie et des locaux d'expérience et apport des articles courants de protection (gants, masques, survêtements ou vêtements dédiés à l'animalerie,...); 10. Enregistrement des paramètres de l'environnement des animaux (température, humidité relative, etc.), des activités de soins aux animaux et d'hygiène des équipements et signalement des anomalies observées; 11. Sécurité du personnel et des animaux; 12. Notions sur la législation en vigueur en Belgique en matière d'hébergement et d'utilisation des animaux utilisés à des fins expérimentales.
- (ii) Une formation pratique appropriée sur le terrain, sous la responsabilité directe d'une personne ayant la formation adéquate

Le responsable académique  
Prof Jean-Paul Dehoux

Prof. Jean-Paul Dehoux  
Dr. Yves Malin  
Faculté de Médecine UCL  
Avenue Hippocrate 56  
1200 - Bruxelles  
Tél 02 754 56 22

Le secrétaire du jury  
Dr Magali Crutzen

## C.2 Traçabilité des poissons et nourriture

### Traçabilité

Tableau 9.2: Traçabilité des espèces utilisées

| Espèce  | Provenance       | Date arrivée | Date départ |
|---------|------------------|--------------|-------------|
| Loche   | Erezée           | 07-févr      | 16-mai      |
| Chabot  | Court-St-Etienne | 27-févr      | 16-mai      |
| Hotu    | Erezée           | 07-mars      | 16-mai      |
| Civelle | Erezée           | 11-avr       | 20-avr      |

### Nourriture

Tableau 9.3 : Nourrissage des loches

| Date         | Espèce | Nbr indiv | Qté (g)    | Qté par poisson (g) |
|--------------|--------|-----------|------------|---------------------|
| 16-févr      | Loche  | 19        | 8          | 0,42                |
| 20-févr      | Loche  | 19        | 4          | 0,21                |
| 23-févr      | Loche  | 19        | 8          | 0,42                |
| 27-févr      | Loche  | 19        | 8          | 0,42                |
| 02-mars      | Loche  | 19        | 4          | 0,21                |
| 07-mars      | Loche  | 150       | 12         | 0,08                |
| 09-mars      | Loche  | 150       | 10         | 0,07                |
| 13-mars      | Loche  | 150       | 20         | 0,13                |
| 14-mars      | Loche  | 150       | 32         | 0,21                |
| 15-mars      | Loche  | 150       | 8          | 0,05                |
| 16-mars      | Loche  | 150       | 4          | 0,03                |
| 20-mars      | Loche  | 150       | 32         | 0,21                |
| 22-mars      | Loche  | 150       | 28         | 0,19                |
| 23-mars      | Loche  | 150       | 40         | 0,27                |
| 26-mars      | Loche  | 150       | 16         | 0,11                |
| 27-mars      | Loche  | 150       | 36         | 0,24                |
| 28-mars      | Loche  | 146       | 12         | 0,08                |
| 02-avr       | Loche  | 146       | 28         | 0,19                |
| 04-avr       | Loche  | 146       | 20         | 0,14                |
| 05-avr       | Loche  | 146       | 4          | 0,03                |
| 06-avr       | Loche  | 146       | 32         | 0,22                |
| 12-avr       | Loche  | 146       | 32         | 0,22                |
| 20-avr       | Loche  | 146       | 36         | 0,25                |
| 04-mai       | Loche  | 146       | 36         | 0,25                |
| <b>Total</b> |        |           | <b>470</b> | <b>4,64</b>         |

Tableau 9.4 : Nourrissage des chabots

| Date         | Espèce | Nbr indiv | Qté (g)    | Qté par poisson (g) |
|--------------|--------|-----------|------------|---------------------|
| 27-févr      | Chabot | 95        | 4          | 0,04                |
| 02-mars      | Chabot | 95        | 12         | 0,13                |
| 07-mars      | Chabot | 95        | 4          | 0,04                |
| 07-mars      | Chabot | 95        | 8          | 0,08                |
| 09-mars      | Chabot | 95        | 3          | 0,03                |
| 13-mars      | Chabot | 95        | 8          | 0,08                |
| 14-mars      | Chabot | 95        | 8          | 0,08                |
| 14-mars      | Chabot | 95        | 8          | 0,08                |
| 22-mars      | Chabot | 95        | 16         | 0,17                |
| 26-mars      | Chabot | 95        | 16         | 0,17                |
| 02-avr       | Chabot | 95        | 16         | 0,17                |
| 05-avr       | Chabot | 85        | 16         | 0,19                |
| 06-avr       | Chabot | 85        | 28         | 0,33                |
| 12-avr       | Chabot | 85        | 20         | 0,24                |
| 19-avr       | Chabot | 85        | 8          | 0,09                |
| 20-avr       | Chabot | 85        | 36         | 0,42                |
| 04-mai       | Chabot | 85        | 36         | 0,42                |
| <b>Total</b> |        |           | <b>247</b> | <b>2,78</b>         |

Tableau 9.5 : Nourrissage des hotus

| Date         | Espèce | Nbr indiv | Qté (g)    | Qté par poisson (g) |
|--------------|--------|-----------|------------|---------------------|
| 07-mars      | Hotu   | 65        | 8          | 0,12                |
| 09-mars      | Hotu   | 65        | 3          | 0,05                |
| 13-mars      | Hotu   | 65        | 4          | 0,06                |
| 14-mars      | Hotu   | 65        | 8          | 0,12                |
| 22-mars      | Hotu   | 65        | 12         | 0,18                |
| 26-mars      | Hotu   | 65        | 16         | 0,25                |
| 02-avr       | Hotu   | 65        | 12         | 0,18                |
| 06-avr       | Hotu   | 55        | 20         | 0,36                |
| 12-avr       | Hotu   | 55        | 24         | 0,44                |
| 20-avr       | Hotu   | 55        | 24         | 0,44                |
| 04-mai       | Hotu   | 55        | 28         | 0,51                |
| <b>Total</b> |        |           | <b>159</b> | <b>2,71</b>         |

### C.3 Paramètres fixés pour le matériel

Tableau 9.6: Paramètres utilisés pour les caméras

|  | Caméra 1  | Caméra 2  | Caméra 3  |
|--|-----------|-----------|-----------|
| <i>Palier filmé</i>                    | Palier P1 | Palier P2 | Bassin P3 |
| <i>Hauteur du sol [cm]</i>             | 305       | 305       | 295       |
| <i>Résolution [pixel]</i>              | 600X800   | 600x800   | 600X800   |
| <i>Fréquence d'enregistrement [Hz]</i> | 15 ou 7,5 | 15 ou 7,5 | 7,5       |
| <i>Ouverture</i>                       | 1 :1,8    | 1 :1,8    | 1 :1,8    |
| <i>Distance focale [mm]</i>            | 4,8       | 4,8       | 4,8       |
| <i>Shutter</i>                         | 1000      | 1000      | 10000     |

Tableau 9.7: Paramètres fixés lors de l'utilisation de la pompe

| <i>Pompe</i>                               |       |
|--|-------|
| <i>Marque</i>                              | Stork |
| <i>Débit passe à poissons [l/s]</i>        | 8     |
| <i>Débit canal d'attrait [l/s]</i>         | 36    |
| <i>Variateur de fréquence [Hz]</i>         | 29    |
| <i>Vanne papillon canal d'attrait [°]</i>  | 25    |
| <i>Vanne papillon passe à poissons [°]</i> | 0     |

### C.4 Automate de lumière

Pour imiter un cycle circadien, c'est-à-dire un cycle naturel de lumière, un automate a été utilisé. Le logiciel LOGO conçu par la société Siemens a servi à programmer les séquences d'allumages et d'extinction des lampes. Le programme est basé sur une programmation filaire. Etant donné que l'automate n'est devenu fonctionnel que tardivement dans la séquence d'expérimentations, la simulation de l'aurore et du crépuscule sont restées à un stade basique, c'est-à-dire que l'allumage

et l'extinction complète des cinq lampes sont réalisés sur un laps de temps d'une minute. Dans la suite de cette section une proposition de simulation du cycle circadien sera présentée.

Pour imiter un vrai cycle, les données de luminosité du 05/04/2015 ont été obtenues.

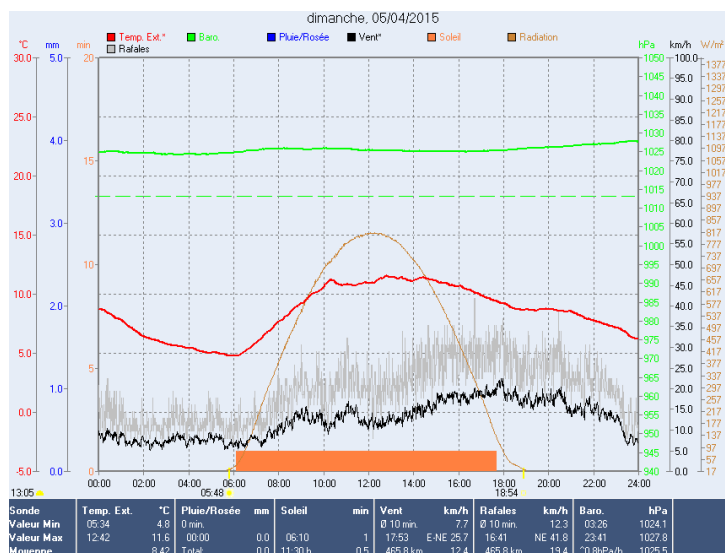


Figure 9.2: Données liées à la lumière du jour du 05/04/2015

Pour reproduire le plus fidèlement possible la luminosité extérieure, la programmation du système LOGO a été prévue comme suit : une séquence d'allumage est commencée à 7h et se termine à 8h30, un éclairage progressif de la passe est visé. Pour l'extinction des lampes, la même séquence est initialisée mais dans le sens inverse.

Tableau 9.8: Séquence d'allumage des lampes pour simuler l'aurore et le crépuscule

| Heures | On     | OFF    |
|--------|--------|--------|
| 0h     | /      | /      |
| 7h     | Spot 4 | /      |
| 7h20   | Spot 5 | /      |
| 7h35   | Spot 1 | /      |
| 8h     | Spot 2 | /      |
| 8h20   | Spot 3 | /      |
| 19h40  | /      | Spot 3 |
| 20h05  | /      | Spot 2 |
| 20h25  | /      | Spot 1 |
| 20h40  | /      | Spot 5 |
| 21h    | /      | Spot 4 |

Les graphes d'éclairement qui sont présentés plus bas ont été établis en posant des coefficients d'éclairage pour chaque spot en fonction de leur distance par rapport au point d'intérêt et leur orientation. Une lampe se situant plus loin des bassins aura un impact moins grand que les deux lampes présentes juste au-dessus de la passe et donc aura un coefficient plus petit. Il a été décidé de procéder à un allumage complet des lampes après 1h20.

L'augmentation progressive de l'éclairement de la passe en fonction du temps est représentée et comparée à l'éclairement au lever du jour. La diminution progressive de l'éclairement est symétrique à son augmentation.

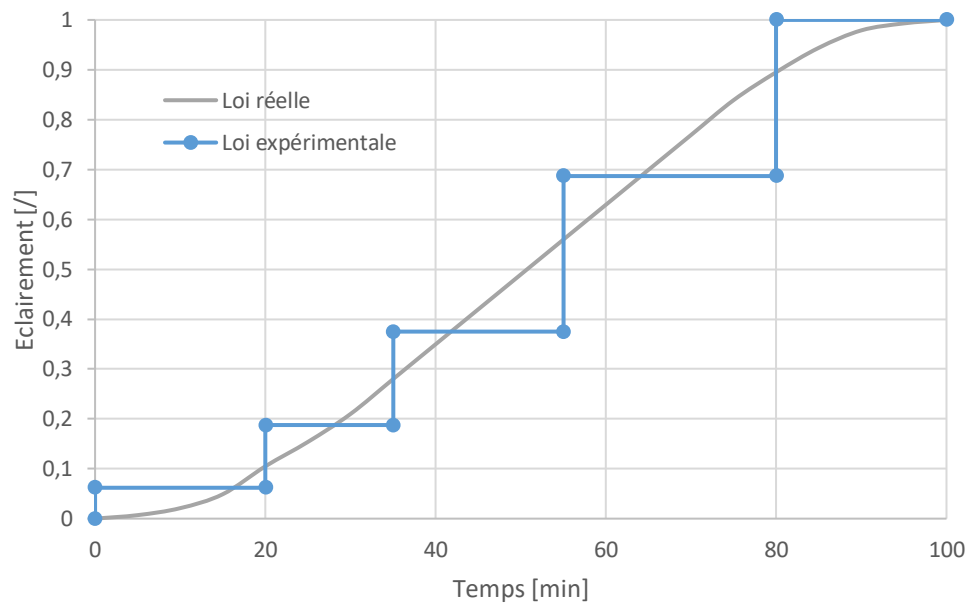


Figure 9.3: Loi d'éclairage progressif de la passe

## C.5 Résultats des mesures d'environnement

La calibration des capteurs de niveaux et débitmètres a permis l'enregistrement de débit et hauteur d'eau dans la passe. Lors de différentes expériences menées du 5 avril au 19 avril, les données moyennes (sur l'expérience) de débits et hauteurs sont représentées sur les deux graphiques ci-dessous :

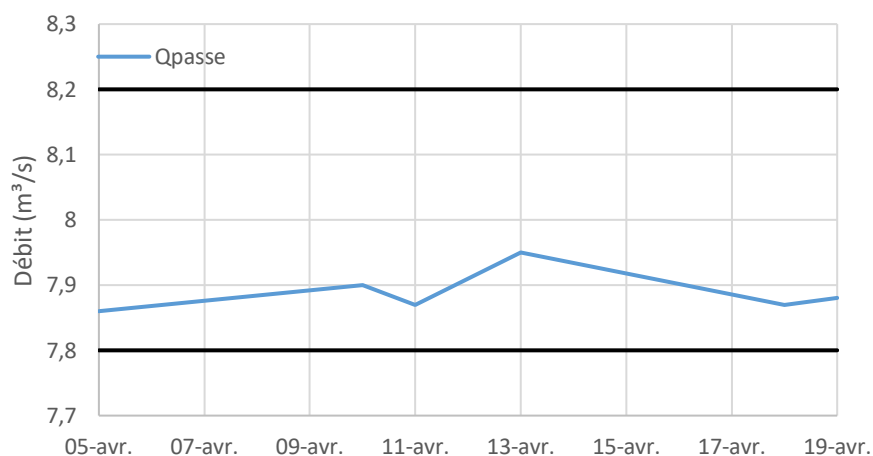


Figure 9.4: Débit moyen mesuré avec hydraucap située entre les deux bornes admissibles

Ces mesures ont permis de contrôler que le débit se situait toujours bien entre 7,8 l/s et 8,2 l/s, le débit cible étant de 8 l/s. Ce débit varie très peu au cours d'une d'expérience et entre les différentes expériences. En effet, les conditions d'ouverture de vanne et de fréquence à la pompe ne sont jamais modifiées.

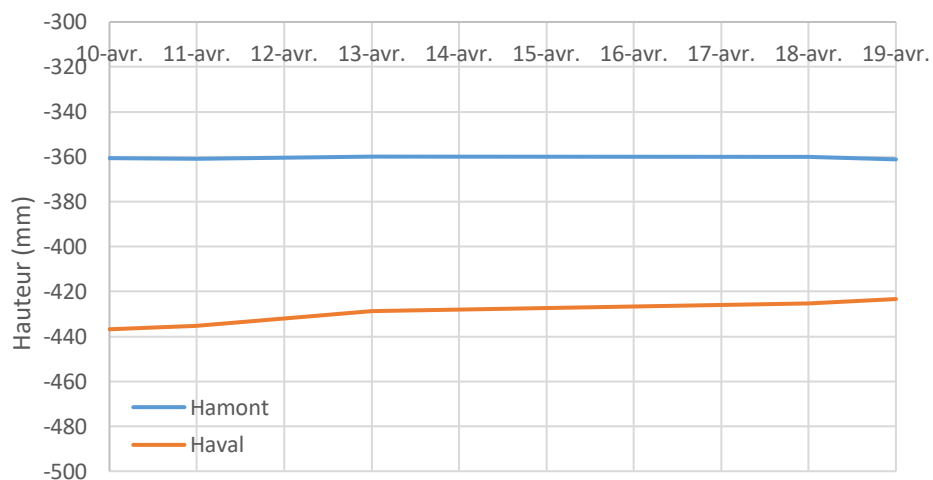


Figure 9.5: Hauteur moyenne du bassin amont et aval

Les hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval sont elles aussi très constantes. On observe une légère augmentation du niveau à l'aval, celui-ci est dû à un encrassement du filtre à l'aval. Plus les

expériences ont lieu, plus des impuretés s'accumulent à la sortie du circuit, l'eau ne peut sortir de ce circuit qu'en surpassant le niveau de ces impuretés et c'est ce qui augmente le niveau à l'aval. Un nettoyage régulier de ce filtre est à prévoir.

En plus des mesures de débit et niveau, la température de l'eau a été enregistrée du 4 au 19 avril à l'aide de deux thermopuces. Celles-ci enregistrent la température que ce soit dans l'eau ou à l'air libre toutes les 30 minutes.

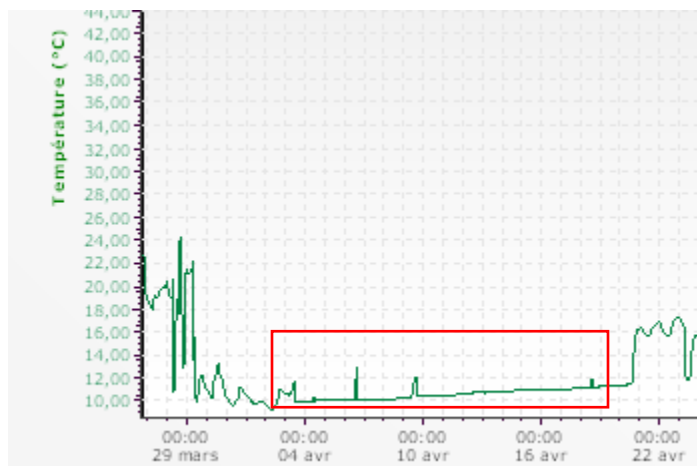


Figure 9.6 Enregistrement des températures avec la thermopuce

La zone encadrée en rouge correspond à la période à laquelle les thermopuces étaient placées dans la passe. La majorité du temps le modèle tournait et ces thermopuces étaient immergées. Les quelques pics de température sont probablement dû à des instants où l'eau a été coupée.

On observe un réchauffement progressif de l'eau à partir de 10°C le 4 avril jusqu'à près de 12°C au 19 avril.

## D. Annexe liée à la méthode expérimentale (chapitre 4)

### D.1 Planning des expériences

#### Phase 1 : Optimisation

| N° Expérience | N° lot | Substrat | Espèce | Nombre individus | Date début | Date fin | Durée |
|---------------|--------|----------|--------|------------------|------------|----------|-------|
| 1             | 1      | 0000     | Loche  | 26               | 15-févr    | 16-févr  | 24h   |
| 2             | 1      | R42M     | Loche  | 18               | 22-févr    | 23-févr  | 22h   |
| 3             | 2      | R42M     | Loche  | 18               | 07-mars    | 07-mars  | 3h30  |
| 4             | 3      | R42M     | Loche  | 27               | 07-mars    | 08-mars  | 18h30 |
| 5             | 4      | R42M     | Loche  | 30               | 08-mars    | 09-mars  | 17h   |
| 6             | 5      | R42M     | Loche  | 22               | 09-mars    | 09-mars  | 2h30  |
| 7             | 1      | R44M     | Loche  | 19               | 12-mars    | 13-mars  | 23h   |
| 8             | 2      | R44M     | Loche  | 27               | 13-mars    | 14-mars  | 18h   |
| 9             | 3      | R44M     | Loche  | 20               | 14-mars    | 14-mars  | 3h    |
| 10            | 4      | R44M     | Loche  | 25               | 14-mars    | 15-mars  | 17h   |
| 12            | 2      | 0000     | Loche  | 25               | 15-mars    | 16-mars  | 16h   |
| 11            | 5      | R44M     | Loche  | 19               | 15-mars    | 15-mars  | 4h    |
| 13            | 3      | 0000     | Loche  | 25               | 16-mars    | 16-mars  | 3h    |
| 14            | 4      | 0000     | Loche  | 25               | 16-mars    | 16-mars  | 2h30  |
| 15            | 1      | C84B     | Loche  | 25               | 20-mars    | 20-mars  | 3h30  |
| 16            | 2      | C84B     | Loche  | 25               | 20-mars    | 21-mars  | 18h   |
| 17            | 3      | C84B     | Loche  | 26               | 21-mars    | 21-mars  | 4h    |
| 18            | 4      | C84B     | Loche  | 25               | 21-mars    | 22-mars  | 20h   |
| 19            | 1      | C82B     | Loche  | 25               | 22-mars    | 22-mars  | 3h    |
| 20            | 2      | C82B     | Loche  | 25               | 22-mars    | 23-mars  | 15h30 |
| 21            | 3      | C82B     | Loche  | 25               | 23-mars    | 23-mars  | 4h    |
| 22            | 4      | C82B     | Loche  | 25               | 26-mars    | 26-mars  | 4h    |
| 23            | 1      | R42E     | Loche  | 25               | 26-mars    | 27-mars  | 16h30 |
| 24            | 2      | R42E     | Loche  | 25               | 27-mars    | 27-mars  | 4h    |
| 25            | 3      | R42E     | Loche  | 25               | 27-mars    | 28-mars  | 17h30 |
| 26            | 4      | R42E     | Loche  | 25               | 28-mars    | 28-mars  | 4h    |
| 27            | 1      | C42M     | Loche  | 25               | 28-mars    | 29-mars  | 17h   |

|    |   |      |       |    |         |         |       |
|----|---|------|-------|----|---------|---------|-------|
| 28 | 2 | C42M | Loche | 25 | 29-mars | 29-mars | 4h    |
| 29 | 3 | C42M | Loche | 25 | 29-mars | 30-mars | 17h30 |
| 30 | 4 | C42M | Loche | 25 | 30-mars | 30-mars | 4h    |
| 31 | 5 | 0000 | Loche | 25 | 03-avr  | 03-avr  | 4h    |
| 32 | 6 | 0000 | Loche | 25 | 03-avr  | 04-avr  | 16h30 |
| 33 | 6 | R42M | Loche | 25 | 04-avr  | 04-avr  | 4h    |
| 34 | 7 | R42M | Loche | 25 | 04-avr  | 05-avr  | 4h    |
| 35 | 8 | R42M | Loche | 25 | 05-avr  | 05-avr  | 4h    |

### Phase 2 : Post-optimisation

| N°<br>Expérience | N° Lot       | Substrat | Espèce  | Nombre<br>individus | Bassin<br>initial | Date<br>début | Date fin | Durée |
|------------------|--------------|----------|---------|---------------------|-------------------|---------------|----------|-------|
| 1                | 1            | R42M     | Chabot  | 21                  | P2                | 05-avr        | 05-avr   | 2h    |
| 2                | 2            | R42M     | Chabot  | 20                  | P2                | 05-avr        | 06-avr   | 17h   |
| 3                | 3            | R42M     | Chabot  | 25                  | P2                | 06-avr        | 06-avr   | 4h    |
| 4                | 1            | R42M     | Loche   | 75                  | P6                | 06-avr        | 09-avr   | 68h   |
| 5                | 1            | R42M     | Loche   | 65                  | P4                | 09-avr        | 10-avr   | 22h30 |
| 6                | 1            | R42M     | Chabot  | 64                  | P4                | 10-avr        | 11-avr   | 24h   |
| 7                | 1            | R42M     | Hotu    | 57                  | P4                | 11-avr        | 12-avr   | 20h   |
| 8                | Préliminaire | R42M     | Civelle | 10                  | P3                | 12-avr        | 12-avr   | 2h    |
| 9                | 2            | R42M     | Loche   | 75                  | P4                | 12-avr        | 13-avr   | 24h   |
| 10               | 1            | 0000     | Loche   | 70                  | P4                | 13-avr        | 16-avr   | 68h   |
| 11               | 2            | 0000     | Loche   | 69                  | P4                | 16-avr        | 17-avr   | 21h   |
| 12               | 1            | 0000     | Chabot  | 60                  | P4                | 17-avr        | 18-avr   | 24h   |
| 13               | 1            | 0000     | Hotu    | 25                  | P3                | 18-avr        | 18-avr   | 2h    |
| 14               | 3            | R42M     | Loche   | 70                  | P4                | 18-avr        | 19-avr   | 22h   |
| 15               | 1            | R42M     | Hotu    | 25                  | P3                | 19-avr        | 19-avr   | 2h    |
| 16               | 2            | R42M     | Chabot  | 60                  | P4                | 19-avr        | 20-avr   | 23h   |

---

## D.2 Analyse de risque

---

### Hauteur

La passe étant surélevée par rapport au sol, il est souvent nécessaire de monter sur un élément pour gagner en hauteur. Afin d'éviter toute chute, un escabeau mobile grande plateforme sécurisée est utilisé. Si l'action à réaliser n'a qu'une courte durée et ne nécessite pas la manutention d'éléments lourds ou volumineux, un escabeau classique peut être utilisé.

### Sol

Le sol pouvant être mouillé à cause de fuite du modèle peut devenir dangereux pour deux raisons :

La surface devient glissante et peut entraîner une chute.

La surface peut causer une électrocution s'il y a contact avec de l'électricité.

Pour empêcher ces deux événements de survenir, quelques précautions sont à prendre :

- Placer un caillebotis antidérapant sur le sol pour éviter toute glissade.
- Veiller à ce que les câbles électriques ne soient pas en contact avec le sol et qu'ils soient correctement isolés.



*Figure 9.7: Caillebotis antidérapant*

---

## E. Annexe liée aux résultats (chapitres 5 et 6)

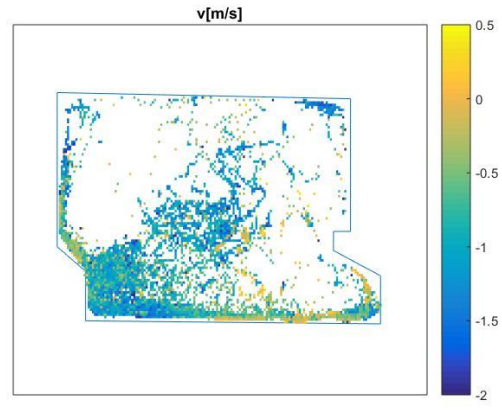
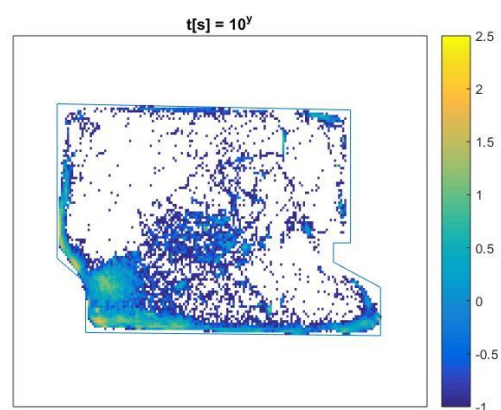
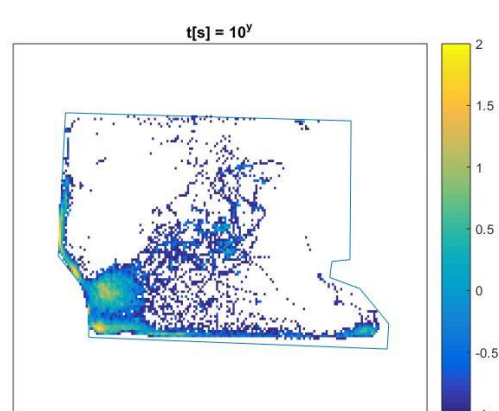
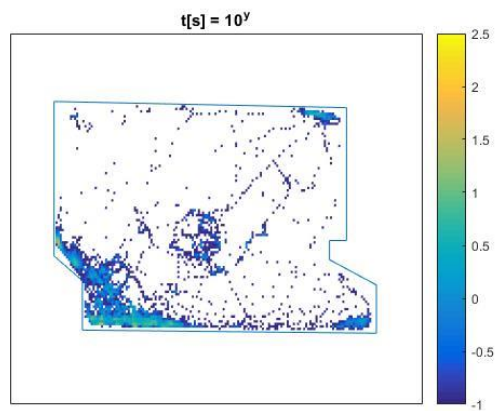
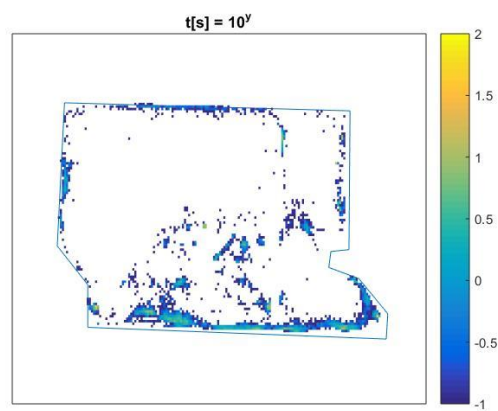
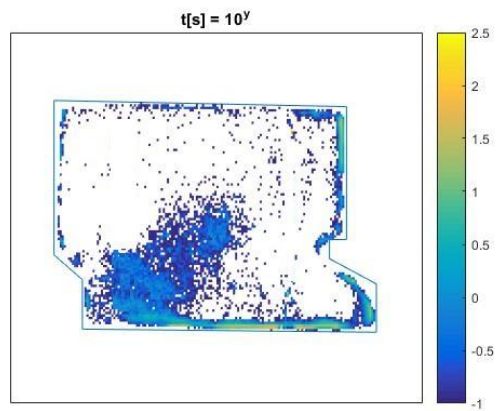
---

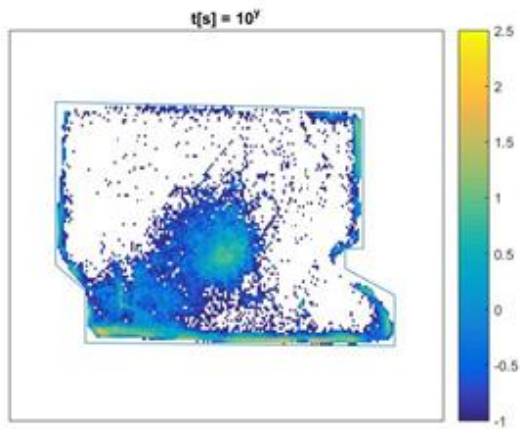
### E.1 Graphe de densité et vitesse : Optimisation

---

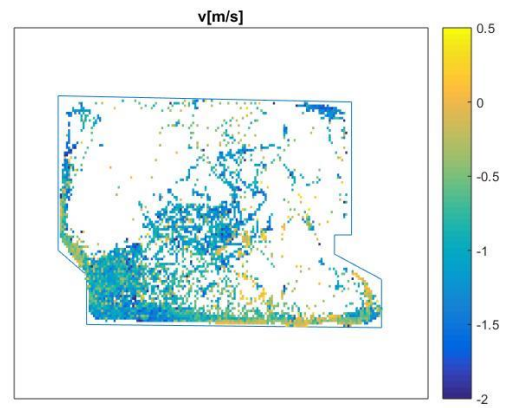
Cette annexe présente les graphes de présence intermédiaires obtenus en cours d'analyse et propose un vis-à-vis entre les vitesses et zones de présence pour les temps courts et longs de chaque substrat.

## E.1.1 0000



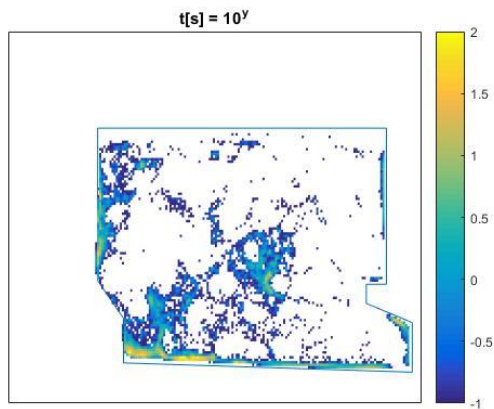


Densité temps longs - 0000

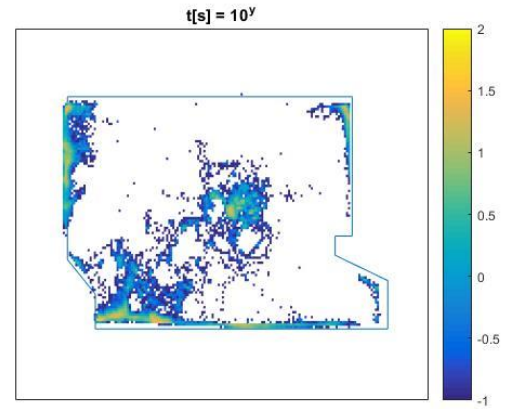


Vitesse temps longs - 0000

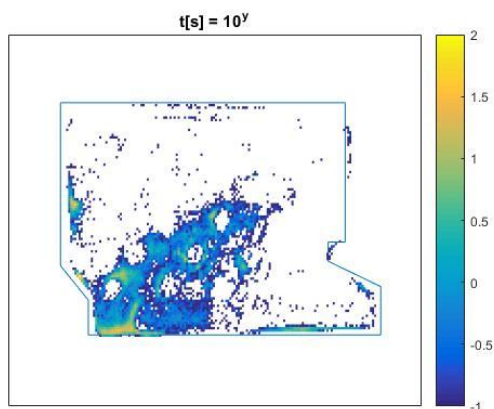
### E.1.2 R42M



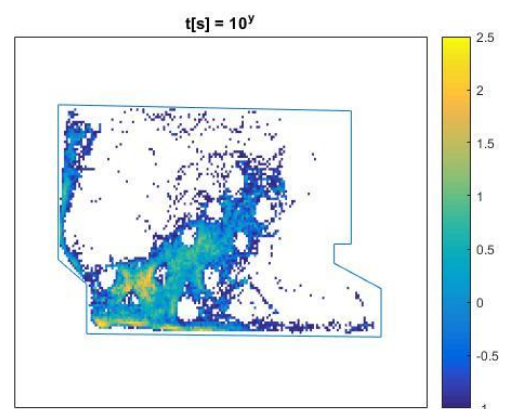
Densité lot 2- R42M



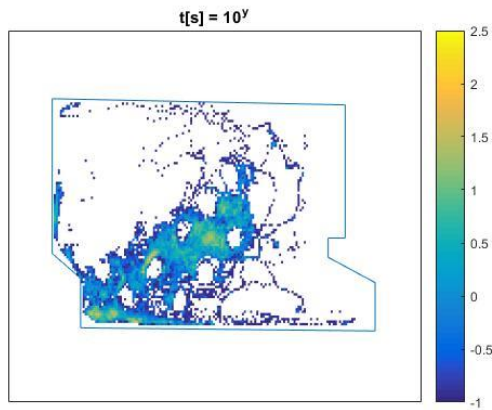
Densité lot 4 -R42M



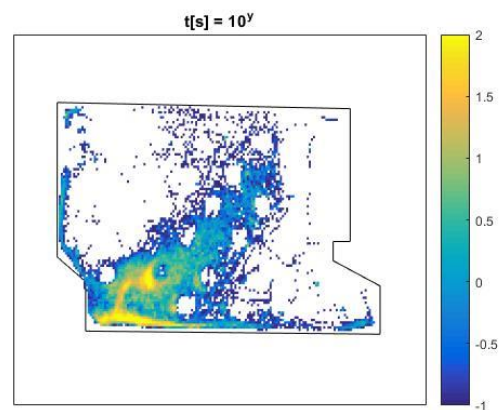
Densité lot 5 - R42M



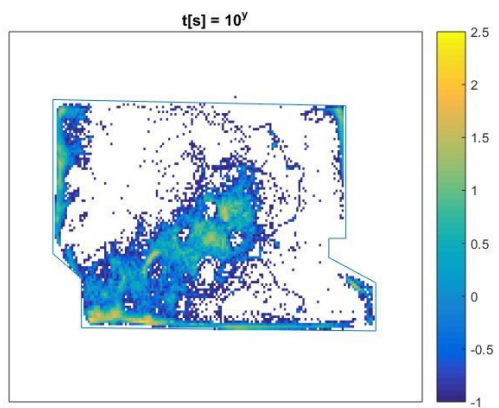
Densité lot 6 - R42M



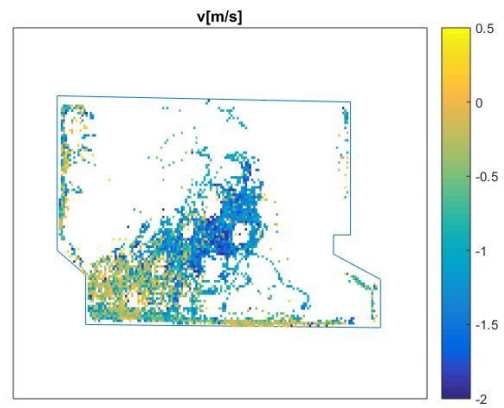
*Densité lot7 - R42M*



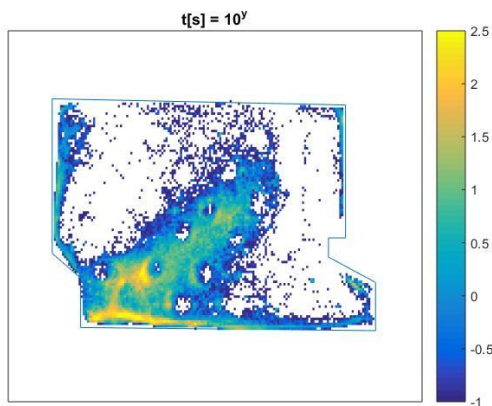
*Densité lot 8 - R42M*



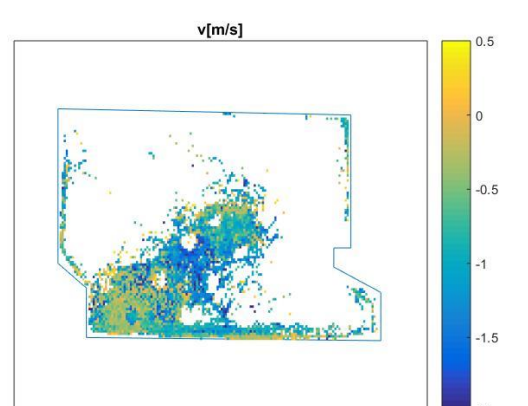
*Densité temps longs - R42M*



*Vitesse temps longs - R42M*

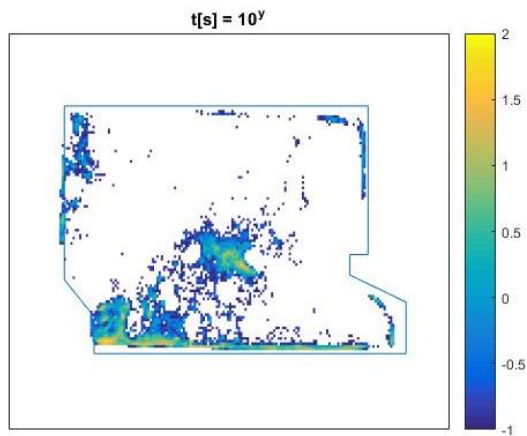
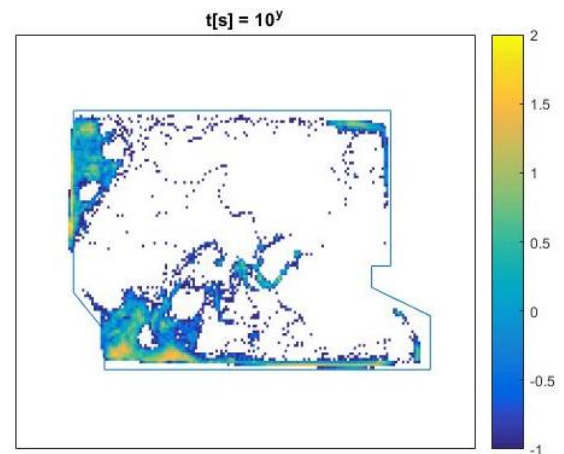
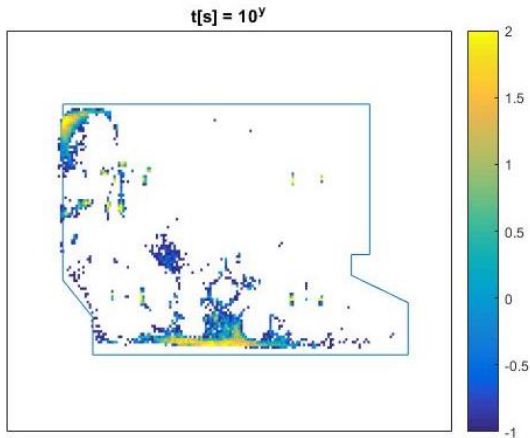
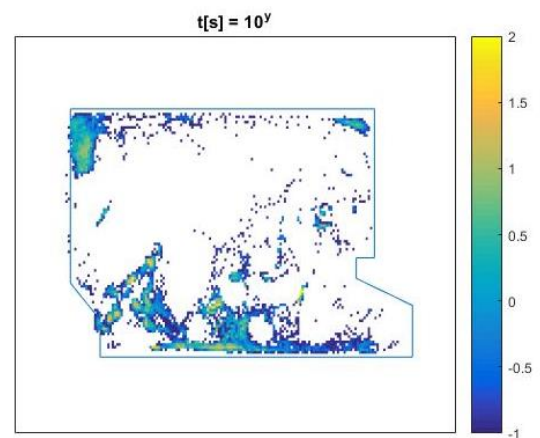
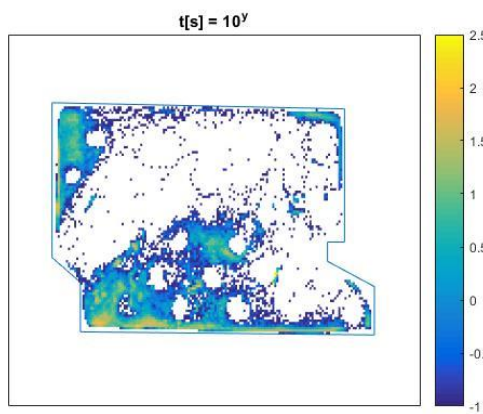
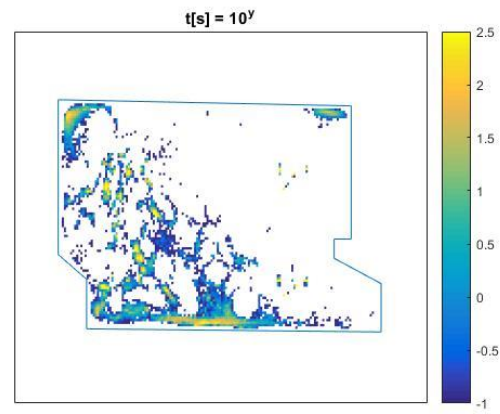


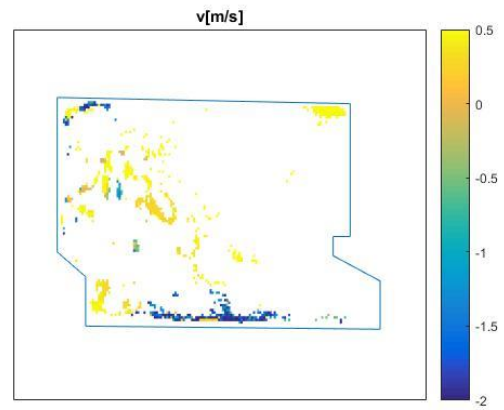
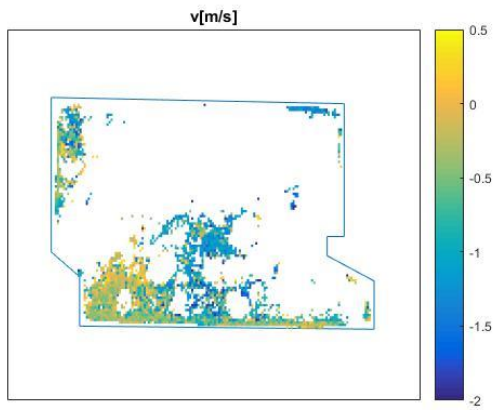
*Densité temps courts - R42M*



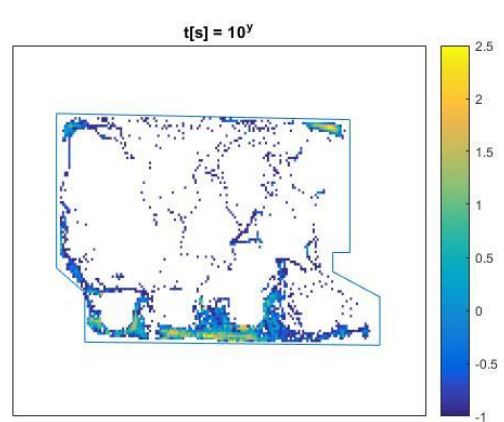
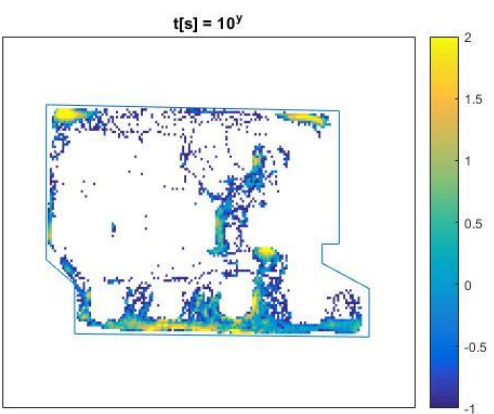
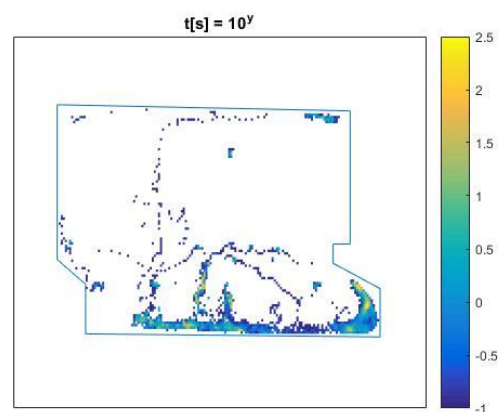
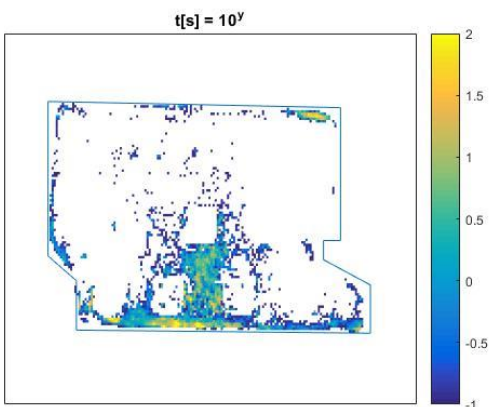
*Vitesse temps courts - R42M*

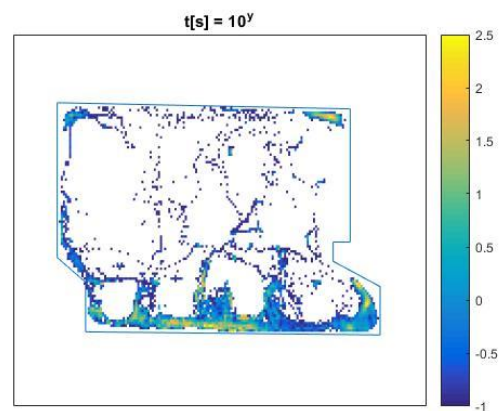
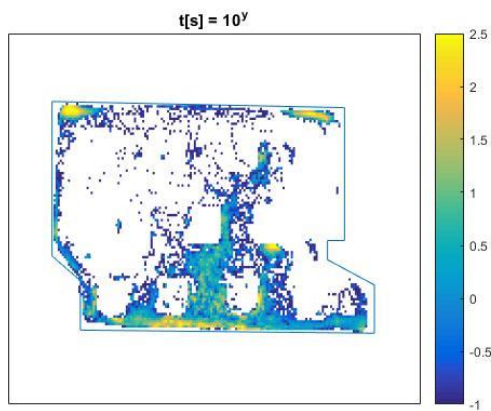
## E.1.3 R44M

*Densité lot 1 - R44M**Densité lot 2- R44M**Densité lot 3 -R44M**Densité lot 4 - R44M**Densité temps longs**Densité temps courts - R44M*

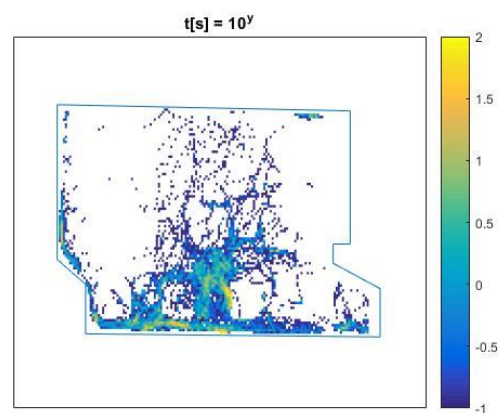
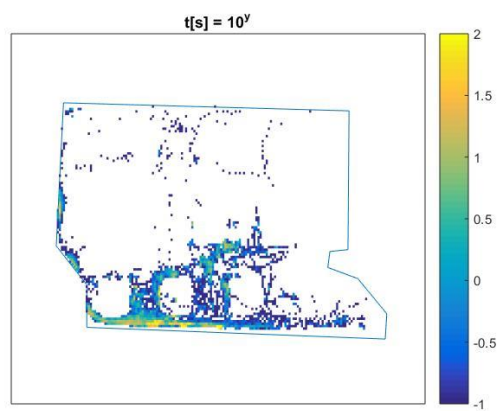
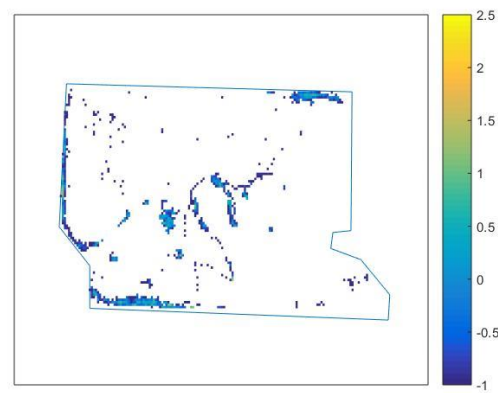
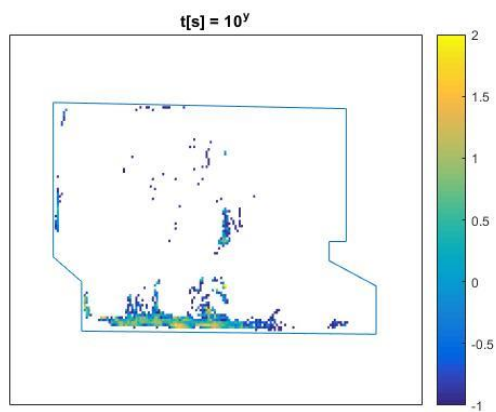


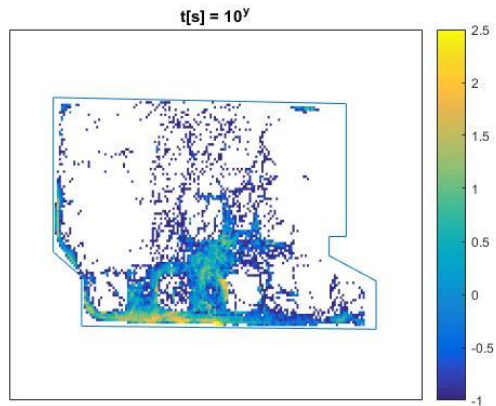
## E.1.4 C84B



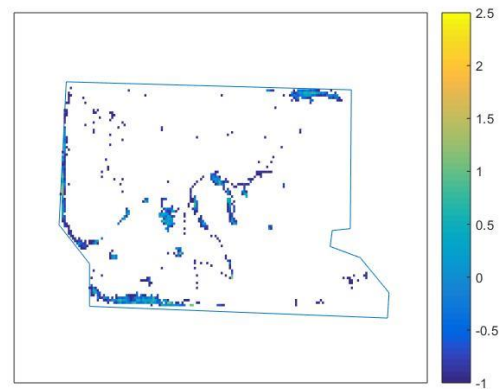


## E.1.5 C82B



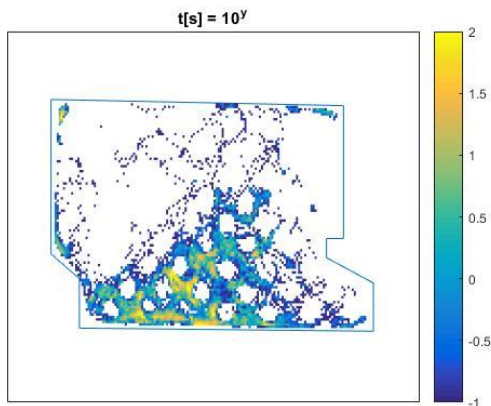


*Densité temps courts - C82B*

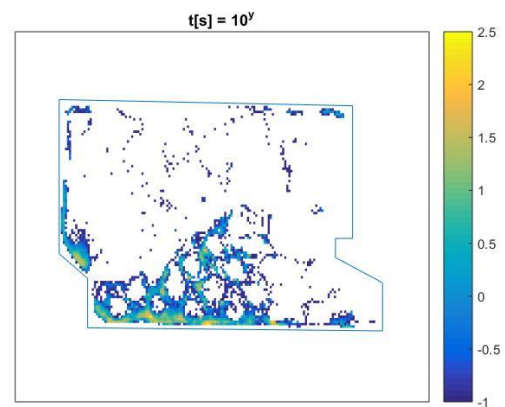


*Densité temps longs - C82B*

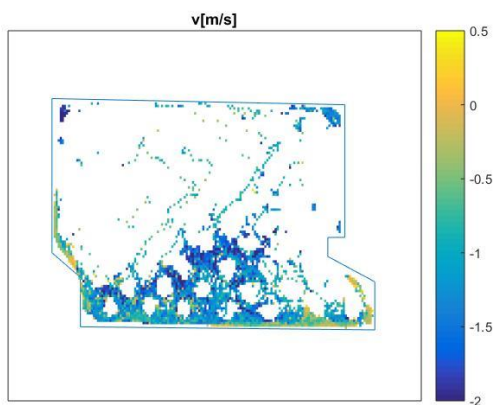
### E.1.6 R42E



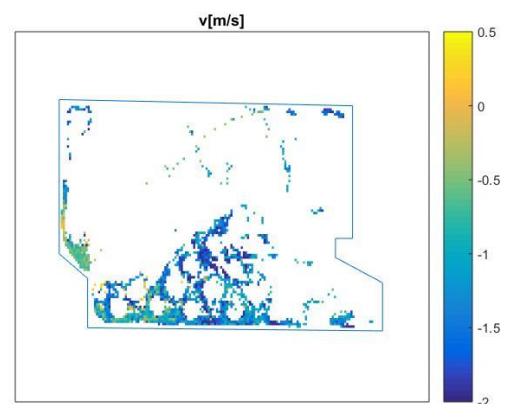
*Densité temps courts - R42E*



*Densité temps longs - R42E*

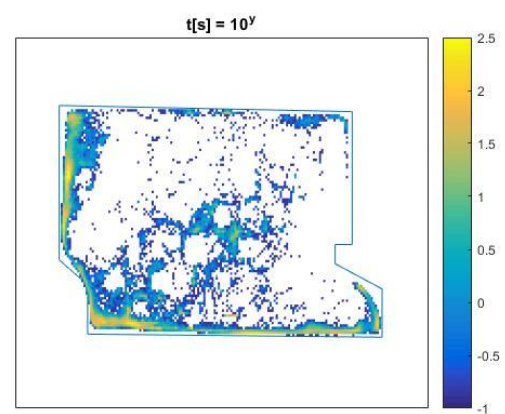
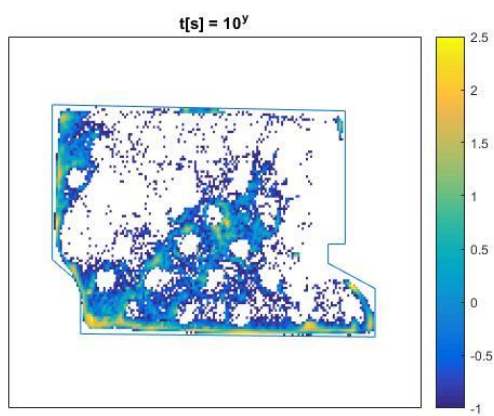
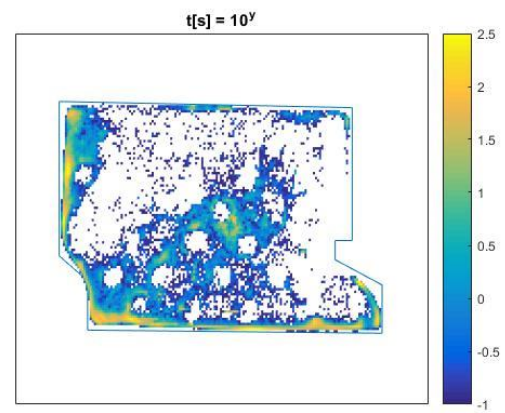
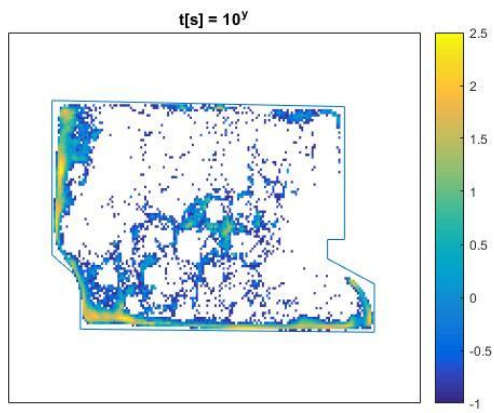
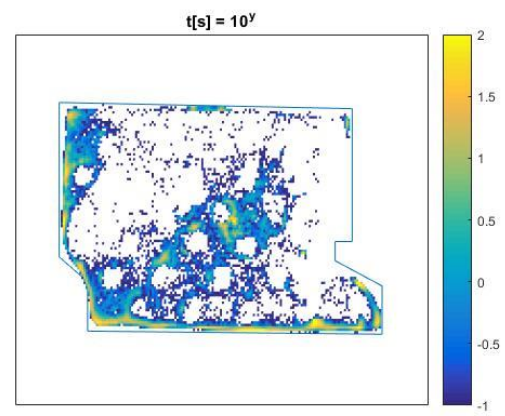
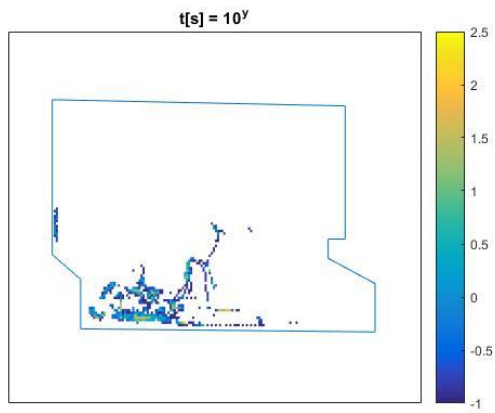


*Vitesse temps courts - R42E*



*Vitesse temps longs - R42E*

## E.1.7 C42M

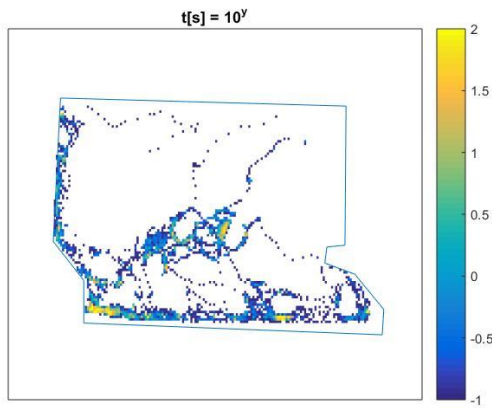


## E.2 Graphe de densité et vitesse : Post-optimisation

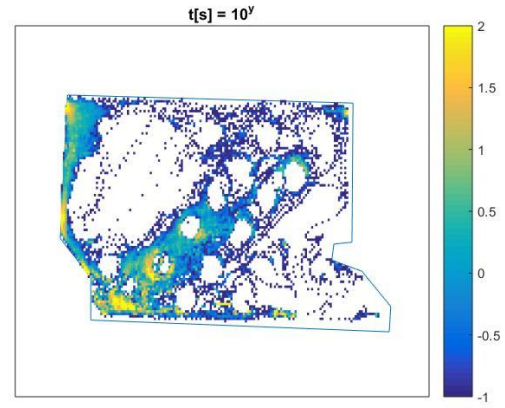
Cette annexe présente les graphes de zones de présence intermédiaires à ceux obtenus dans la section 6 de cette étude.

### E.2.1 R42M

#### Chabot



*Densité lot 2 - R42M chabot*



*Densité lot 3 - R42M chabot*

---

# F. Annexe liée au code ImageJ

---

## F.1 Code *ImageJ* traitant les images

---

Le code ImageJ est entièrement repris du mémoire 2016-2017 et a été écrit par Courtois et Van Audenhaege. Il constitue la première étape du traitement d'image.

### Protocole ImageJ

- Créer un nouveau dossier
- Créer une image moyenne avec les 1000 premières images du dossier
  1. Sélection de 1000 photos pour l'image référence (les premières) et les mettre dans un dossier
  2. Glisser ce dossier dans ImageJ
  3. Image moyenne : Image > Stacks > Z project... > Average Intensity
  4. Enregistrer l'image moyenne dans le dossier correspondant sous le nom "AVG\_especeX\_camX\_lotX.jpg"
- Créer une nouvelle image noir-blanc si nécessaire
  1. Ouvrir une image moyenne
  2. Lancer le Plugin > Macros > Record...
  3. Tracer un polygone en supprimant un max de zones irrélevantes
  4. Travailler avec le ROI Manager : Analyze > Tools > ROI Manager...
  5. Ajouter le polygone tracé & le remplir de blanc : Add [t] & More >> Fill
  6. Appliquer un Gaussian Blur pour éviter les points blancs : Process > Filters > Gaussian Blur... > 0,40
  7. Appliquer un threshold pour noircir le reste : Image > Adjust > Threshold
- Supprimer les images noires (nuit) du dossier complet (attention, cela prend beaucoup de temps)

- Tester les paramètres de la macro sur des échantillons d'images
  1. Tester la limite inférieure du threshold
  2. Tester la taille des tâches vs poissons (size)
- Lancer la macro sur le dossier complet
  1. Faire attention à bien sauvegarder les données Excel dans le dossier correspondant
  2. Modifier le nom de l'image AVG
  3. Modifier le nom de l'image BW si nécessaire
  4. Sauvegarder les images seulement si nécessaires

```

1 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
2 //                               Open and save                               //
3 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
4
5 // Creating a list of the images you want to work with
6 dir_in=getDirectory("Where are your images"); // ask the user to select a directory
7 list=getFileList(dir_in); // Get the list of file in that directort as a vector of names
8 num=list.length; // Get the length of the name vector
9
10 // Localisation of the field you want to use to save the images that where created
11 dir_out=getDirectory("Where do you want to save your images");
12
13 // Where do we save the results - excel ?
14 dir_results=getDirectory("Where do you want to save the Results");
15
16 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
17 //                               Average IMAGE                               //
18 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
19
20 // Open the average image (verify if the name of the image is correct)
21 dir_AVG=getDirectory("Where did you save the average image?");
22 open(dir_AVG + "AVG_cami_100_lot1.jpg");
23 title_AVG = getTitle();
24
25 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
26 //                               Black & white IMAGE                               //
27 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
28
29 // Open the BW image used to define the ROI (Region of Interest)
30 dir_BW=getDirectory("Where did you save the BW image?");
31 open(dir_BW + "crop_BW.jpg");
32 title_BW = getTitle();
33
34 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
35 //                               Definition of the FUNCTION                               //
36 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
37
38 run("Set Measurements...", "area centroid perimeter feret's display redirect=None decimal=3"
39
40 // FindFish is the function you need to apply on each image
41 function FindFish(output, filename) {
42
43 // Create an image with the difference of both (processed image and average one)
44 imageCalculator("Difference create", filename, title_AVG);
45 //selectWindow("Result of " + filename);
46
47 // Select the zone of interest with the use of the BW image
48 imageCalculator("Min create", "Result of " + filename, title_BW);
49 //selectWindow("Result of Result of " + filename);
50
51 // Apply filters
52 run("Gaussian Blur...", "sigma=2");
53
54 // Apply threshold
55 setAutoThreshold("Default dark");
56 setAutoThreshold("RenyiEntropy dark");
57 setOption("BlackBackground", false);
58
59 // Uncomment to set the Lower threshold level
60 getThreshold(lower, upper);

```

```

61 if (lower < 10) {
62     lower = 10;
63     setThreshold(lower, upper);
64 // print("New Lower level of " + filename + " : " + lower);
65 }
66
67 // Apply the analyse of particles
68 // Select one of the 2 following lines (one display the measurements, the other not)
69 run("Analyze Particles...", "size=250-inf show=Masks display"); //diplay
70 // run("Analyze Particles...", "size=250-inf show=Masks"); //no display
71
72
73 // Close the unnecessary images
74 selectWindow(filename);
75 close();
76 selectWindow("Result of " + filename);
77 close();
78 selectWindow("Result of Result of " + filename);
79 close();
80
81
82 // Uncomment to save the ultimate image (with only the fish, in BW)
83 // Can be useful to check what kind of shape has been detected or not
84 selectWindow("Mask of Result of Result of " + filename);
85 //saveAs("Jpeg", output + filename);
86 close();
87
88 }
89
90 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
91 // Execution of the FUNCTION //
92 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
93
94
95 // Get the time of execution of the macro
96 start = getTime();
97
98
99 //setBatchMode cancels the opening of each image in order to save time
100 setBatchMode(true);
101
102
103 // Loop over each image to apply the image processor
104 for(k = 0 ;k < num ; k++){ // Loop over the vector length
105
106     open(dir_in+list[k]); // Open each image in the vector
107
108     FindFish(dir_out, list[k]); // Apply the function FindFish for each opened image
109 }
110
111 setBatchMode(false);
112
113
114 // Uncomment to print the time of execution of the macro
115 // "getTime" gives the time in ms
116 print("Fichier ouvert : " + dir_in);
117 print("Temps d'exécution de la macro: " + (getTime()-start)/1000 + "secondes");
118

```

```

119
120
121 //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
122 //                               Close IMAGES                               //
123 //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
124
125 //Close the average image that we opened in the beginning
126 selectWindow(title_AVG);
127 close();
128
129 //Close the black and white image that we opened in the beginning
130 selectWindow(title_BW);
131 close();
132
133 //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
134 //                               Save RESULTS                               //
135 //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
136
137 //Uncomment to save the results of the Particle Analyze in an excel file (choose one of the
138 saveAs("Results", dir_results + "Resultats.xls");
139 //saveAs("Results", "C:\\Users\\ecour\\Desktop\\Résultats ImageJ\\Résultats_temp\\Resultats.
140
141 //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
142 //   Parts of code that can be used for some specific actions   //
143 //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
144 /*
145 // Uncomment to find the localization of the folder you want to open
146 // To open an image at that localization, use : open(dir_out + "Inser name of your image");
147 find_dir=getDirectory("Where can you find or save what your looking for ?");
148 print(find_dir);
149
150 // Used to define the rectangle to crop
151 // Apply on the average image (nb: insert at the end of the average block) & the "filename"
152 //setTool("rectangle");
153 makeRectangle(96, 105, 576, 419);
154 run("Crop");
155
156 // Used to define the polygone of the BW image
157 makePolygon(600,129,120,128,120,190,209,221,208,241,158,241,158,472,646,482,646,248,598,204);
158
159 // Uncomment to set the parameters of the threshold
160 // Insert before the "if" condition of the threshold
161 print("Threshold Method : " + getInfo("threshold.method"));
162 print("Threshold Mode : " + getInfo("threshold.mode"));
163 getThreshold(lower, upper);
164 print("Threshold lower and upper level : Lower " + lower + " & upper " + upper);
165
166 // Uncomment to set the measurements you want to calculate on each image
167 // Insert before the analyze particles inside the function
168 // Note: select one of the 2 following lines (one gives only the centroide & feret's data)
169 // run("Set Measurements...", "area centroid center perimeter fit shape feret's display redi
170 run("Set Measurements...", "area centroid feret's display redirect=None decimal=3");
171
172 */

```

---

## G. Annexe liée au code Excel

---

### G.1 Code *Excel* traitant les images

---

#### Protocole

Lorsque le programme ImageJ termine la macro pour un jeu d'image, il renvoie un fichier « .xls » qui doit être traité avant son importation dans le code général Matlab.

Pour ce faire, il est nécessaire de suivre le protocole suivant :

- 1) Renommer et classer le fichier de sortie d'ImageJ « Resultats.xls ».
- 2) Ouvrir le fichier dans Excel.
- 3) Lancement de la macro présentée ci-dessous :
  - Activer l'onglet développeur sur Excel : Fichier-> Options -> Personnaliser le ruban et décocher la case développeur.
  - Nommer la macro dans vos macros personnelles : Onglet Développeur -> Enregistrer une macro -> Enregistrer dans classeur de macro personnelle -> Définir le nom de la macro.
  - Enregistrer la macro : Onglet développeur -> Macros -> Sélectionner la macro définie précédemment -> Pas à pas détaillé -> Coller la macro implémentée ci-dessous
  - Exécuter la macro : Onglet développeur -> Macros -> Exécuter la macro
- 4) Convertir en nombre la colonne B (Label).
- 5) Enregistrer le fichier dans votre document « Matlab » sous la forme « .xlsx ».

Le fichier est désormais prêt à être lancé dans le code général Matlab.

#### Macro Excel

```
Sub Macro1()
```

```
,
```

```
' Macro1 Macro
```

```
,
```

```
,
```

```
Range("L2").Select
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=ROUND(RC[-8]/1000,0)"
```

---

```
Range("L2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("L2:L257514")
Range("L2:L257514").Select
Range("L2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("L2:S2"), Type:=xlFillDefault
Range("L2:S2").Select
Range("M2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("M2:M257514")
Range("M2:M257514").Select
Range("N2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("N2:N257514")
Range("N2:N257514").Select
Range("O2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("O2:O257514")
Range("O2:O257514").Select
Range("R2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("R2:R257514")
Range("R2:R257514").Select
Range("S2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("S2:S257514")
Range("S2:S257514").Select
Range("L2:O4").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.Copy
Range(Selection, Selection.End(xlUp)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-15
Range("D2").Select
```

---

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Range("R2:S2").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range(Selection, Selection.End(xlUp)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-18
Range("J2").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Range("L2:S12").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.ClearContents
Range("L2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MID(RC[-10],27,7)"
Range("L2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("L2:L257514")
Range("L2:L257514").Select
Selection.Copy
Range("B2").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Range("L2").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Application.CutCopyMode = False
```

Selection.ClearContents

Range("B2").Select

End Sub

---

## H. Annexe liée aux codes Matlab

---

### H.1 Codes *MATLAB* traitant les images

---

Le code Matlab est entièrement repris du mémoire 2016-2017 et a été écrit par Courtois et Van Audenhaege. Il constitue la dernière étape du traitement d'image.

#### H.1.1 Elimination des erreurs de détection

```
clear all
```

```
% Code de nettoyage de la matrice
% Sortie : matrice complete avec un minimum de bulles
%         matrice avec uniquement les détections uniques
tic
%% Importation du fichier Excel de départ
input=xlsread('Resultats_s0_p3_18-04.xlsx',1);
% Définition des variables
length_input = length(input(:,1));    % Longueur des colonnes du vecteur input
%area = input(:,3);                  % Vecteur area
label = input(:,2);                  % Vecteur label
%MaxArea = max(area);                % Valeur max de la colonne area
%% PART 1. CREATION DE MATRICE SANS BULLES ISOLEES - fish_input

% Régler les paramètres statistiques de détection
nbr_images_analysees = 50;
nbr_de_detections_requises = 25;
%% Création d'une matrice "matr_first_detection" indiquant le
% nombre de détections pour chaque image
% et ne reprennant que la première détection de chaque image
n = 1; i = 1;                        % Initialisation des compteurs
nbr_detection = 1;                    % Variable qui compte le nombre de détection par image
matr_first_detection = zeros(length_input,12); %Initialisation de la matrice
while n < length_input-50
    m = n;
```

```

while label(m) == label(m+1)
    nbr_detection = nbr_detection + 1;
    m = m + 1;
end
matr_first_detection(i,1:11) = input(n,:);
matr_first_detection(i,12) = nbr_detection;
i = i + 1;
n = n + nbr_detection;
nbr_detection = 1;
end
% Ajuster la taille de la matrice "matr_first_detection"
i_last = find(matr_first_detection(:,1),1,'last');
matr_first_detection = matr_first_detection(1:i_last,:);
% Matrice ne reprenant que le label et le nombre de détection (colonne12)
detection_count = [matr_first_detection(:,2) matr_first_detection(:,12)];
% Tests de control de la matrice matr_first_detection
% Impression des 10 premières lignes (retirer le point-virgule)
% matr_first_detection(matr_first_detection(:,1)<10,:);
% Test pour voir si deux labels sont identiques
% length_matr_first_detect = length(matr_first_detection);
% for i=1:(length_matr_first_detect-1)
%     if matr_first_detection(i,2) == matr_first_detection(i+1,2)
%         disp('Error: "matr_first_detection" contains dubbel labels');
%     end
% end
% Calcul du max de détection (retirer le point-virgule)
% max_nbr_detection = max(matr_first_detection(:,12));
%% Détection de poisson
% Dans la matrice qui ne contient que les premières détections, repérer
% lorsqu'il y a plusieurs détections successives
images_nbr = nbr_images_analysees;
detection_nbr = nbr_de_detections_requises;
label_first_detec = matr_first_detection(:,2);
fish_detection = zeros(size(label_first_detec)); % Initialisation de la matrice
j = 1; max_plus = 0;
for i = 1:(length(label_first_detec)-(detection_nbr-1))
    if label_first_detec(i+detection_nbr-1) < label_first_detec(i)+images_nbr

```

```

    fish_detection(j) = label_first_detec(i);
    max_plus = label_first_detec(i);
    j=j+1;
else
    if label_first_detec(i) < max_plus + images_nbr
        fish_detection(j) = label_first_detec(i);
        j=j+1;
    end
end
end
% Ajuster la taille du vecteur "fish_detection"
i_last = find(fish_detection,1,'last');
fish_detection = fish_detection(1:i_last);
% Impression du fish_detection (enlever le point virgule)
% fish_detection;
%
% Conclusion: le vecteur fish_detection contient uniquement les labels qui
% sont probablement des poissons, en ayant retiré les bulles isolées.
% Note: il manque les labels des "detection_nbr" dernières détections
% Supprimer les lignes de bulles isolées de la matrice générale input
% Matrice de base: input, avec sa colonne 2 de labels
% Matrice de comparaison : fish_detection
fish_input_vector = zeros(size(label));
for i=1:length(fish_detection)
    find_label = (label == fish_detection(i));
% Renvoie un 1 si le label existe, un zéro si le label n'existe pas
    fish_input_vector = fish_input_vector + find_label;
end
fish_input = input;
for i=length(fish_input_vector):-1:1
    if fish_input_vector(i)==0
        fish_input(i,:)=[];
    end
end
% Conclusion : la matrice "fish_input" ne contient plus les lignes de
% bulles isolées, seulement les poissons et les bulles détectées sur les
% images des poissons.

```

```

%
%% PART 2. CREATION DE LA MATRICE AVEC LES DETECTIONS UNIQUES -
one_fish_input
% Régler les paramètres statistiques de détection d'un poisson
one_nbr_images_analysees = 30;
one_nbr_de_detections_requises = 10;
% Détection lorsqu'il n'y a que un poisson - one_fish_detection
% A partir de "matr_first_detection" (matrice contenant le nombre de
% détections par image), définir les images sur lesquels il n'y a que un
% poisson
% fish_nbr_of_detect - Matrice avec le nombre de détection par image (extrait
% de "matr_first_detection", colonne 12) uniquement pour les images qui sont
% listées dans "find_fish"
fish_nbr_of_detect_vector = zeros(length(matr_first_detection),1);
for i=1:length(fish_detection)
    find_nbr = (matr_first_detection(:,2) == fish_detection(i));
    fish_nbr_of_detect_vector = fish_nbr_of_detect_vector + find_nbr;
end
fish_nbr_of_detect = matr_first_detection(:,12);
for i=length(fish_nbr_of_detect_vector):-1:1
    if fish_nbr_of_detect_vector(i) == 0
        fish_nbr_of_detect(i)=[];
    end
end
% One_fish_detection - On ne garde que les labels lorsque le pourcentage de
% de détection unique est élevé
one_image_nbr = one_nbr_images_analysees;
one_detection_nbr = one_nbr_de_detections_requises;
one_fish_detection = zeros(size(fish_detection)); % Initialisation du vecteur
disp('initialisation boucle while');
m = 1; i=1;
while i<(length(fish_nbr_of_detect)-(one_image_nbr))
    count = 0;
    for j=i:(i+one_image_nbr-1)
        if fish_nbr_of_detect(j) == 1
            count=count+1;
        end
    end
end

```

```

end
if count > one_detection_nbr-1
    one_fish_detection(m) = fish_detection(i);
    m = m+1; i=i+1;
else
    if i~=1 && m~=1 && one_fish_detection(m-1) == fish_detection(i-1)
        for n=1:one_image_nbr-1
            one_fish_detection(m) = fish_detection(i+n);
            m = m+1;
        end
        i=i+one_image_nbr;
    else
        i=i+1;
    end
end
end
% % Ajuster la taille du vecteur "one_fish_detection"
i_last = find(one_fish_detection,1,'last');
one_fish_detection = one_fish_detection(1:i_last);
%
% %% Création de la matrice one_fish_input
% % Matrice qui contient uniquement les données de fish_input dont le label
% % se retrouve dans one_fish_detection, cad supprimer de la matrice
% % fish_input les données où il y a plusieurs poissons.
%
one_fish_input_vector = zeros(size(fish_input(:,2)));
for i=1:length(one_fish_detection)
    find_label = (fish_input(:,2) == one_fish_detection(i)); % Renvoie un 1 si le label
    existe, un zéro si le label n'existe pas
    one_fish_input_vector = one_fish_input_vector + find_label;
end
one_fish_input = fish_input;
for i=length(one_fish_input_vector):-1:1
    if one_fish_input_vector(i)==0
        one_fish_input(i,:)=[];
    end
end
end

```

```

%% Création de la matrice mutli_fish_input
% Matrice qui est l'opposé de one_fish_input, reprend les détections de
% fish_input qui correspondent à des images avec plusieurs poissons.
multi_fish_input = fish_input;
for i=length(one_fish_input_vector):-1:1
    if one_fish_input_vector(i)==1
        multi_fish_input(i,:)=[];
    end
end
%
%
% %% PART 3. NETTOYAGE DE LA MATRICE AVEC DETECTIONS UNIQUES
%
%
%
% %% Régler les paramètres de restriction
upper_limit_area = 500;
limit_ratio_perim_area = 0.5;
limit_velocity = 100*15;
%% Elimination des taches qui sont trop grandes
% On enlève de la matrice "one_fish_input" les taches qui sont trop
% grandes, cad plus grande que la limite définie.
limit = upper_limit_area;
j = 1;
one_fish_input_v2 = zeros(size(one_fish_input));
for i=1:length(one_fish_input)
    if one_fish_input(i,3) < limit
        one_fish_input_v2(j,:) = one_fish_input(i,:);
        j = j+1;
    end
end
%
% %% Ajuster la taille de la matrice "one_fish_input_v2"
i_last = find(one_fish_input_v2(:,1),1,'last');
one_fish_input_v2 = one_fish_input_v2(1:i_last,:);
%% Elimination des taches qui ne respectent pas le ratio perimeter/area
% On enlève de la matrice 'one_fish_input_v2' les taches qui ne respectent

```

```

% pas un ratio perimeter/area correspondant à un poisson.
limit = limit_ratio_perim_area;
j = 1;
one_fish_input_v3 = zeros(size(one_fish_input_v2));
for i=1:length(one_fish_input_v2)
    ratio = one_fish_input_v2(i,6)/one_fish_input_v2(i,3);
    if ratio < limit
        one_fish_input_v3(j,:) = one_fish_input_v2(i,:);
        j = j+1;
    end
end
%Ajuster la taille de la matrice "one_fish_input_v3"
i_last = find(one_fish_input_v3(:,1),1,'last');
one_fish_input_v3 = one_fish_input_v3(1:i_last,:);
% Elimination des taches dont la vitesse est trop grand
% Cad lorsque les taches sont trop éloignées les unes des autres alors que
% les labels se suivent. Vu qu'à priori il n'y a qu'un seul poisson dans le
% bassin, cela signifierait donc que la tache éloignée est une bulle.
label_v3 = one_fish_input_v3(:,2);
X = one_fish_input_v3(:,4);
Y = one_fish_input_v3(:,5);
one_fish_input_v4 = zeros(size(one_fish_input_v3));
one_fish_input_v4(1,:) = one_fish_input_v3(1,:);
limit = limit_velocity;
limit_new_ref = 100;          % Nombre d'images avant de considéré une nouvelle
image de référence
j=2;
for i=2:length(one_fish_input_v3)
    Xnew = one_fish_input_v4(j-1,4);
    Ynew = one_fish_input_v4(j-1,5);
    label_new = one_fish_input_v4(j-1,2);
    time = (label_v3(i)-label_new)/15; %Unité: secondes
    velocity = sqrt((X(i)-Xnew)^2 + (Y(i)-Ynew)^2)/time;
    if label_v3(i)-1 == label_v3(i-1) || label_v3(i) == label_v3(i-1)
        if velocity < limit
            one_fish_input_v4(j,:) = one_fish_input_v3(i,:);
            j=j+1;
        end
    end
end

```

```

    end
else
    label_interval = label_v3(i)-one_fish_input_v4(j-1,2);
    if label_interval < limit_new_ref + 1
        if velocity < limit
            one_fish_input_v4(j,:) = one_fish_input_v3(i,:);
            j = j+1;
        end
    else
        one_fish_input_v4(j,:) = one_fish_input_v3(i,:);
        j = j+1;
    end
end
end
end
% %Ajuster la taille de la matrice "one_fish_input_v4"
% i_last = find(one_fish_input_v4(:,1),1,'last');
% one_fish_input_v4 = one_fish_input_v4(1:i_last,:);
%% Matrice finale
% Création d'une matrice qui reprend "one_fish_input_v4" et
% "multi_fish_input", cad toutes les détections avec le moins de bulles
% possibles. Permettra de créer un graphe de "présence" avec toutes les
% détections de poisson.
final_fish = [one_fish_input_v4;multi_fish_input];
%% Sauvegarde des matrices utiles
save('Matrices_hotu_s0_p3_18-
04_cam3','detection_count','fish_detection','fish_input','multi_fish_input','one_fish_i
nput_v4','final_fish');
%% Fin du code et calcul du temps d'exécution
toc
H.1.2 Construction des graphes de densité de présence et de distribution de vitesse
%% OUTPUT CAM1
% Ce code permet de sortir des graphes et données utiles pour
% l'interprétation des résultats obtenus.
clear all
tic
%% Récupération des matrices calculées par "traitement_cam1"
% Récupérer la sauvegarde

```

---

```

load('Matrices_hotu_s0_p3_18-04_cam3')
% detection_count : matrice avec colonne 1 = label, colonne 2 = nbr de détections de ce
label
% fish_detection : vecteur reprenant les labels avec poisson, sans les bulles isolées
% fish_input : matrice complète, sans les bulles isolées
% multi_fish_input : uniquement les lignes de détections avec plusieurs poissons dans le
bassin
% one_fish_input_v4 : uniquement les détections de poissons isolés, avec élimination
d'un max de bulles
% final_fish : matrice correspondant à "one_fish_input_v4" & "multi_fish_input"
%% Ploter graphe reprennant la position de tous les points qu'on considère être un
poisson
% Coordonées des points représentant des poissons
X_tot_fish = final_fish(:,4);
Y_tot_fish = final_fish(:,5);
% Coordonnées du polygone
%Cam1
%X_poly=[79,645,645,699,699,148,148,181,181,79,79];
%Y_poly=[115,115,171,227,490,490,265,265,234,193,115];
%Cam2
%X_poly=[77,654,654,713,699,147,149,184,188,130,74,77];
%Y_poly=[105,124,193,256,488,475,250,247,221,203,146,105];
%Cam3
X_poly=[86,662,663,731,725,119,112,172,174,100,86];
Y_poly=[29,35,106,168,428,433,179,180,157,130,29];
% X_poly=[577,577,627,627,68,68,107,107,18,18,577]; %graphe 640*480 cam2
% Y_poly=[65,137,198,444,444,192,192,161,130,50,65];
% Maillage et calcul de densité
maillage_x = 200;
maillage_y = 150;
x_max = 800;
y_max = 600;
x_maille = x_max/maillage_x;
y_maille = y_max/maillage_y;

X_poly = X_poly/x_maille;
Y_poly = Y_poly/y_maille;

```

```

density = zeros(maillage_y, maillage_x);
density_log = zeros(maillage_y, maillage_x);

for i = 1:maillage_y
    for j = 1:maillage_x
        find_det = find(X_tot_fish > x_maille*(j-1) & X_tot_fish <= ...
            x_maille*(j) & Y_tot_fish > y_maille*(i-1) & Y_tot_fish <= y_maille*i);
        count_det = length(find_det);
        if count_det == 0
            count_det = NaN;
        end
        density(i,j) = count_det/15;
        % density(i,j) = log10(count_det);
        density_log(i,j) = log10(count_det/15);
        % /15 pour mettre en échelle de temps
    end
end
%Comptage du nbre detections totales sur le graphe
Detection_tot=0;
for i = 1:maillage_y
    for j = 1:maillage_x
        if isnan(density(i,j));
            density(i,j)=0;
        end
        Detection_tot=Detection_tot+(density(i,j)*15);
    end
end
Detection_tot
% Plot du graphe de la densité
figure()
plot(X_poly,Y_poly);
hold on
pcolor(density_log);
shading flat
set(gca,'Xdir','reverse');
set(gca,'xtick',[],'ytick',[]);

```

```

cmin=-1;
cmax=2.64;
caxis([cmin cmax]); % modifier cmax en fonction des valeurs typiques !!!
c=colorbar;
%axes(c);
colorbar;
title('t[s] = 10^y')
print('Density_lot1','-dpng')
%% Calcul des vitesses
% vecteur se base uniquement sur les images avec un seul poisson, cad
% "one_fish_input_v4". Les trop grandes vitesses sont éliminées, car cela
% signifie que ce n'est probablement pas le même poisson.
% Données : one_fish_input_v4
label_one_fish = one_fish_input_v4(:,2);
X_one_fish = one_fish_input_v4(:,4);
Y_one_fish = one_fish_input_v4(:,5);
% Insérer des NaN la où une nouvelle séquence commence
% Les séquences sont définies comme des suites de labels consécutifs
label_one_fish_v2 = zeros(size(label_one_fish));
X_one_fish_v2 = zeros(size(X_one_fish));
Y_one_fish_v2 = zeros(size(Y_one_fish));
label_one_fish_v2(1) = label_one_fish(1);
X_one_fish_v2(1) = X_one_fish(1);
Y_one_fish_v2(1) = Y_one_fish(1);
j = 2; nbr_seq = 0;
for i=2:length(label_one_fish)
    if label_one_fish(i) == label_one_fish(i-1)+1
        label_one_fish_v2(j) = label_one_fish(i);
        X_one_fish_v2(j) = X_one_fish(i);
        Y_one_fish_v2(j) = Y_one_fish(i);
        j = j+1;
    else
        label_one_fish_v2(j:j+1) = [NaN;label_one_fish(i)];
        X_one_fish_v2(j:j+1) = [NaN;X_one_fish(i)];
        Y_one_fish_v2(j:j+1) = [NaN;Y_one_fish(i)];
        j = j+2;
        nbr_seq = nbr_seq+1;
    end
end

```

```

    end
end
% Calcul des vitesses
t = 1/15;    % Temps entre chaque image (15 images/s) - Unité: secondes
long = length(label_one_fish_v2);
velocity = zeros(long-1,1);
for i=1:long-1
    delta_t = (label_one_fish_v2(i+1)-label_one_fish_v2(i))*t;
    delta_x = sqrt((X_one_fish_v2(i+1)-X_one_fish_v2(i))^2+(Y_one_fish_v2(i+1)-
Y_one_fish_v2(i))^2);    % Unité: pixels (vérifier combien de mm par pixels)
    delta_x = delta_x*0.0015; % Conversion de pixels en mètre - 1 pixel = 1,5 mm
    velocity(i) = delta_x/delta_t;
end
% Filtre des vitesses
% Le filtre exclu les vitesses qui different de la médiane de plus de deux
% fois la médiane de la séquence considérée.
find_NaN = find(isnan(velocity));
m = 1;
final_velocity = zeros(size(velocity));
final_X = zeros(size(velocity));
final_Y = zeros(size(velocity));
for i = 2:length(find_NaN)
    init = find_NaN(i-1);
    final = find_NaN(i);
    if init~=final-1
        sequence = final-init;
% Donne la longueur de la séquence de labels consécutifs
        velocity_seq = [velocity(init+1:final-1),X_one_fish_v2(init+...
            1:final-1),Y_one_fish_v2(init+1:final-1)];
        med = median(velocity_seq(:,1));
        ecart_type = std(velocity_seq(:,1));
        for j = 1:length(velocity_seq(:,1))
% Filtre pour éliminer les vitesses trop élevée, càd qui
% s'écarte de plus de 2*écart type par rapport à la moyenne
            if velocity_seq(j,1) >= med - 2*ecart_type && velocity_seq(j,1)...
                <= med + 2*ecart_type
                final_velocity(m) = velocity_seq(j,1);
            end
        end
    end
end

```

```

        final_X(m) = velocity_seq(j,2);
        final_Y(m) = velocity_seq(j,3);
        m = m+1;
    end
end
end
i_last = find(final_velocity,1,'last');
final_velocity = final_velocity(1:i_last);
final_X = final_X(1:i_last);
final_Y = final_Y(1:i_last);
save('GC_s2_lot5_cam2','density');
%% Graphe représentant les vitesses
% Pour chaque élément de la maille, le code calcule la moyenne des vitesses
% présentent dans ce rectangle, et c'est cette moyenne qui est ensuite
% plotée sur le graphe.
% Vecteurs utiles : velocity; X_one_fish; Y_one_fish (ils ont tous la même dimension)
mean_velocity = zeros(maillage_y, maillage_x);
mean_velocity_log = zeros(maillage_y, maillage_x);
for i = 1:maillage_y
    for j = 1:maillage_x
        find_det = find(final_X > x_maille*(j-1) & final_X <= x_maille*(j)...
            & final_Y > y_maille*(i-1) & final_Y <= y_maille*i);
        % find_det me fournit un vecteur avec la localisation des velocity dont on va devoir
        % faire la moyenne
        length_find = length(find_det);
        if length_find == 0
            mean = NaN;
        else
            mean = sum(final_velocity(find_det))/length_find;
        end
        mean_velocity(i,j) = mean;
        mean_velocity_log(i,j) = log10(mean);
    end
end
end
% Plot du graphe de la densité
figure()

```

```
plot(X_poly,Y_poly);
hold on
pcolor(mean_velocity_log);
shading flat
set(gca,'Xdir','reverse');
set(gca,'xtick',[],'ytick',[]);
cmin=-2;cmax=0.5;caxis([cmin cmax]); % modifier cmax en fonction des valeurs
typiques !!!
c=colorbar('YTickLabel',{ '0,01', '', '0,1', '', '1', ''});
%c=colorbar;
%axes(c);
colorbar;
title('v[m/s]')
print('Velocity_lot1','-dpng')
%% Sauvegarde des matrices afin de faire le graphe cumulé
save('GC_hotu_s0_p3_18-04_cam3','mean_velocity','density');
%% Fin du code et calcul du temps d'exécution
toc
```

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique [www.uclouvain.be/epl](http://www.uclouvain.be/epl)

