

Étude comportementale de différentes espèces de poisson dans un modèle réduit de la passe à bassins multi-espèces de Rivière en Meuse belge

Mémoire présenté par
Estelle Courtois, Loïc Van Audenhaege

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

Promoteur(s)
Dr Ir Didier Bousmar, Dr Ir Xavier Rollin

Lecteur(s)
Dr Ir Xavier Draye, Ir Alain Gillet, Ir Bernard de le Court

Année académique 2016-2017

Remerciements

Tout d’abord, nous tenons tout particulièrement à remercier nos deux promoteurs, Mr. Didier Bousmar et Mr. Xavier Rollin, pour leurs nombreux conseils, leurs idées innovatrices, leur aide pratique et leur disponibilité depuis le début de ce projet.

Nous tenions également à adresser nos remerciements à nos différents lecteurs pour l’intérêt qu’ils portent à ce projet. Plus particulièrement, nous remercions Mr. Alain Gillet et Mr. Bernard de le Court pour avoir toujours été présents pour répondre à nos questions. Nous remercions Mr. Xavier Draye de nous avoir permis de suivre sa formation donnée sur *ImageJ*, ainsi que pour ses conseils avisés qui furent d’une grande aide dans la réalisation de ce travail.

Ensuite, nous aimerions remercier les techniciens du Laboratoire de Recherches Hydrauliques de Châtelet, ainsi que le personnel de la pisciculture de Érezée, et plus particulièrement Mr. Yvan Neus. C’est grâce à leur expertise et leur aide que les expériences ont pu être menées à bien. Nous tenions également à remercier toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à l’aboutissement de ce travail.

Enfin, nous remercions nos proches pour leur soutien si précieux, leurs encouragements et leurs conseils de relecture.

Abstract

Dans le cadre de la restauration de la continuité écologique de la Meuse, un modèle réduit d'une passe à poissons a été construit à l'échelle 1 : 5, à la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie, dans le but de proposer des aménagements qui seront appliqués au dispositif de franchissement de Rivière. Faisant suite à une modélisation numérique de l'écoulement et à une expérimentation comportementale avec des salmonidés, cette étude a pour objectif d'évaluer la pertinence expérimentale d'utiliser diverses espèces dans un modèle réduit d'une passe afin de vérifier son caractère multispécifique souvent peu considéré par les critères de dimensionnement. Pour ce faire, diverses espèces mosanes (saumon, chevaine, ablette et chabot) ont été introduites dans le dispositif. Des caméras ont été placées au-dessus de quelques bassins au design standardisé dans le but de collecter des informations visuelles relatives au comportement des poissons dans ces bassins. L'élaboration d'un protocole de traitement d'image a permis de distinguer certaines zones préférentiellement occupées par les poissons, de déterminer certaines trajectoires réalisées par des individus ainsi que de quantifier les vitesses relatives des poissons dans les bassins. La difficulté des petits chabots à se maintenir dans l'écoulement a notamment été mise en avant. Par ailleurs, un système RFID a été disposé tout le long du modèle dans le but de retracer les déplacements des poissons dans la passe. L'objectif est d'évaluer la capacité spécifique de franchissement grâce à des indicateurs relatifs au processus de remontée. Les résultats montrent la capacité à remonter pour les chevesnes et les saumons, l'envisagent pour les ablettes mais la questionnent pour les chabots. En outre, les influences de la photopériode, de la répétition des remontées et de la longueur des poissons sur les franchissements sont aussi étudiées. Pour les chevesnes, des tendances à remonter durant la nuit avec un maximum d'activité après la fin du jour et à réaliser des remontées plus rapides après la première sont observées mais aucun effet marqué de la taille ne se démarque. Finalement, la méthode expérimentale utilisée montre des résultats plus satisfaisants pour les saumons et les chevaines que pour les ablettes et les chabots en raison de divers facteurs biologiques.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte global	1
1.2	Contexte particulier	2
1.3	Objectifs et enjeux	3
2	Caractérisations migratoire et natatoire des poissons	5
2.1	Introduction	5
2.2	Caractéristiques migratoires	6
2.2.1	Définition et discussion du concept de migration	6
2.3	Types de migration en eau douce des zones tempérées	7
2.3.1	La dispersion	8
2.3.2	La migration de reproduction	8
2.3.3	La migration de protection	9
2.3.4	La migration trophique	10
2.3.5	La migration exploratoire, de recolonisation et de post-déplacement	10
2.4	Influences interspécifiques et externes sur la capacité de nage	11
2.4.1	Forces exercées sur un poisson	11
2.4.2	Aspects physiologiques	12
2.4.3	Aspects morphologiques	15
2.4.4	La dynamique de nage	17
2.4.5	Influence de facteurs externes	19
2.4.6	Conclusion	22
2.5	Détermination des capacités de nage	22
2.5.1	Modèle de Wardle-Zhou	22
2.5.2	Modèles déterminés à partir des données expérimentales collectées par Katopodis et Gervais	26
2.5.3	Comparaison des deux modèles	29
2.6	Applications des concepts migratoires et natatoires aux espèces utilisées	32
2.6.1	Le saumon atlantique	32
2.6.2	L'ablette commune	33
2.6.3	Le chevesne	37
2.6.4	Le chabot	39

3 Théories liées au modèle réduit	45
3.1 État de l'art	45
3.1.1 Critères généraux de design d'une passe à poisson	45
3.1.2 Critères de design d'une passe à bassins en fonction des espèces ciblées . .	47
3.1.3 Présentation de l'étude comportementale de salmonidés introduits dans le modèle réduit de la passe de Rivière (Pype, 2015)	49
3.1.4 Présentation d'autres études en modèle réduit	52
3.2 Présentation du modèle réduit	54
3.2.1 Description générale	54
3.2.2 Respect des lois de similitudes	56
3.2.3 Description de l'écoulement	59
4 Matériels et méthodes	63
4.1 Matériels	63
4.1.1 Matériels d'acquisition des données	63
4.1.2 Matériel vivant	66
4.2 Méthodes	73
4.2.1 Bien-être animal	73
4.2.2 Méthodes expérimentales	78
4.2.3 Traitement des données RFID	85
4.2.4 Traitement des images	89
5 Résultats et discussions : franchissement	101
5.1 Caractérisation de la remontée et de ses influences	101
5.1.1 Définitions préliminaires des concepts utilisés	101
5.1.2 Définition des indicateurs	102
5.1.3 Tests statistiques réalisés	104
5.2 Les saumons (<i>Salmo salar</i>)	105
5.2.1 Efficacité des remontées	105
5.2.2 Temps de remontée	108
5.2.3 Remontées partielles	108
5.2.4 Influences de la photopériode, de la longueur du poisson et de la succession des remontées	108
5.3 Les ablettes communes (<i>Alburnus alburnus</i>)	109
5.3.1 Efficacité des remontées	109
5.3.2 Temps de remontée	110
5.3.3 Répartition temporelle des remontées	111
5.3.4 Influence des dimensions morphologiques du poisson	112
5.3.5 Discussion des résultats par une approche éthologique	113
5.4 Les chevesnes (<i>Squalius cephalus</i>)	115
5.4.1 Efficacité des remontées	115

5.4.2	Temps de remontée	117
5.4.3	Répartition temporelle des remontées	119
5.4.4	Remontées partielles	120
5.4.5	Influence de la succession des remontées	120
5.4.6	Influence des dimensions morphologiques du poisson	122
5.4.7	Discussion des résultats par une approche éthologique	123
5.5	Les chabots (<i>Cottus gobio</i>)	124
5.5.1	Efficacité des remontées	124
5.5.2	Discussion des résultats par une approche éthologique	125
5.6	Comparaisons interspécifiques	127
5.6.1	Efficacité des remontées	127
5.6.2	Temps de remontée	127
5.7	Caractérisation de l'attractivité de la passe	130
6	Résultats et discussions : comportement du poisson	133
6.1	Les salmonidés (<i>Salmonidae</i>)	133
6.2	Les ablettes communes (<i>Alburnus alburnus</i>)	134
6.2.1	Zones de présence préférentielle	134
6.2.2	Vitesses	136
6.2.3	Trajectoires empruntées	137
6.2.4	Profondeur de nage au droit de l'échancrure	139
6.3	Les chevaines (<i>Squalius cephalus</i>)	141
6.3.1	Zones de présence préférentielle	141
6.3.2	Vitesses	145
6.3.3	Trajectoires empruntées	148
6.3.4	Profondeur de nage au droit de l'échancrure	150
6.4	Les chabots (<i>Cottus gobio</i>)	151
6.4.1	Zones de présence préférentielle	151
6.4.2	Vitesses	153
6.4.3	Trajectoires empruntées	153
6.4.4	Profondeur de nage au droit de l'échancrure	154
6.5	Comparaisons interspécifiques	154
6.5.1	Zones de présence préférentielle	155
6.5.2	Étude de la vitesse et mise en relation avec les caractéristiques de l'écoulement	156
6.5.3	Trajectoires empruntées	157
6.5.4	Profondeur de nage au droit de l'échancrure	158
7	Conclusions et perspectives	159
7.1	Conclusions	159
7.2	Perspectives	162

7.2.1	Matériel	162
7.2.2	Matériel vivant	162
7.2.3	Méthode	163
8	Références	167
	Annexes	177
A	Annexe se rapportant aux parties bibliographiques (chapitres 2 et 3)	178
A.1	Caractérisations migratoire et natatoire des poissons	179
A.2	Présentation du modèle réduit	181
B	Annexe se rapportant aux matériels et méthodes (chapitre 4)	182
B.1	Matériel vivant	182
B.2	Système caméra	183
B.3	Protocole de marquage par PIT tag, de mesurage et de pesée	185
B.4	Résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques l'eau	186
B.5	Traitement des données RFID	188
B.6	Traitement des images	189
B.6.1	Définitions des ROI	189
B.6.2	Paramètres ImageJ	190
B.6.3	Définition Threshold RenyiEntropy	190
C	Annexe se rapportant aux résultats de franchissement (chapitre 5)	192
D	Annexe se rapportant aux résultats de comportement (chapitre 6)	200
D.1	Les ablettes communes (<i>Alburnus alburnus</i>)	200
D.2	Les chevaines (<i>Squalius cephalus</i>)	202
D.3	Les chabots (<i>Cottus gobio</i>)	204
E	Codes <i>MATLAB</i> traitant les données RFID	205
E.1	Évaluation de franchissabilité	205
E.2	Évaluation de l'efficacité du débit d'attrait	219
F	Code <i>ImageJ</i> traitant les images	224
G	Codes <i>MATLAB</i> traitant les images	228
G.1	Élimination des erreurs de détection	228
G.2	Construction des graphes de densité de présence et de vitesse moyenne	236
G.3	Modélisation d'un poisson le long d'une trajectoire	242

Table des figures

2.1	Schématisation des différentes migrations réalisées par un poisson durant son cycle de vie (Lucas & Baras, 2001)	7
2.2	Schématisation des forces exercées sur un poisson se trouvant dans la colonne d'eau (Sfakiotakis et al., 1999). Les forces présentées sont le poids (<i>weight</i>), la flottabilité (<i>buoyancy</i>), la force de portance (<i>hydrodynamic lift</i>) et la poussée du poisson (<i>thrust</i>).	11
2.3	Figure présentant les quatre types de nage ondulatoire chez les poissons (Lindsey, 1978) (A. nage anguilliforme, B. nage subcarangiforme, C. nage carangiforme, D. nage thunniforme)	17
2.4	Graphique présentant les données expérimentales de vitesses critiques en relation avec la température et permettant de visualiser l'existence d'une température maximisant la nage d'un poisson (Randall & Brauner, 1991)	20
2.5	Effet de la formation de tourbillons dans un écoulement turbulent sur l'efficacité de nage d'un poisson (Liao, 2007)	21
2.6	Effet de la création de tourbillons causés par un banc sur l'efficacité de nage d'un poisson (Liao, 2007)	21
2.7	Graphique mettant en relation la vitesse maximale d'un poisson selon sa longueur et la température du milieu selon l'équation de Wardle-Zhou	24
2.8	Graphique compilant les vitesses adimensionnelles expérimentales collectées selon leur temps adimensionnel et présentant les régressions associées pour les nages anguilliforme et subcarangiforme (Katopodis & Gervais, 1991)	27
2.9	Courbes définies selon les données collectées par Katopodis et Gervais (1991) déterminant la vitesse maximale et la vitesse maximale de croisière selon la longueur du poisson	28
2.10	Comparaison des courbes liant la vitesse maximale et la longueur du poisson selon le modèle Wardle-Zhou et selon la relation définie grâce aux données collectées par Katopodis et Gervais (1991)	30
2.11	Comparaison des courbes liant la vitesse maximale de croisière et la longueur du poisson selon le modèle Wardle-Zhou et selon la relation définie grâce aux données collectées par Katopodis et Gervais (1991)	31
2.12	Aspect général d'un saumon atlantique adulte (<i>Salmo salar</i>) (Dunbar, 2010) . . .	32
2.13	Aspect général d'un saumon atlantique juvénile (<i>Salmo salar</i>) (FAO, 2017) . . .	32
2.14	Aspect général d'une ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>) (Dunbar, 2010) . . .	34

2.15	Aspect général d'un chevesne (<i>Squalius cephalus</i>) (Pêche-en-Vendée, 2014)	37
2.16	Aspect général d'un chabot (<i>Cottus gobio</i>) (Farnham Angling Society, 2010) . . .	40
3.1	Identification des zones de repos des salmonidés dans le modèle réduit de la passe de Rivière, l'amont se trouve à gauche. A gauche : résumé des détections de poissons par images ; à droite : identification graphique des zones. (Pype, 2015)	50
3.2	Illustration des différentes catégories de trajectoires des salmonidés dans la passe de Rivière. L'amont se trouve à gauche. (Pype, 2015)	51
3.3	Enregistrement latéral du passage d'un salmonidé au travers d'une échancrure du modèle réduit de la passe de Rivière. L'amont se trouve à gauche. (Pype, 2015)	52
3.4	Représentations graphiques, issues de la littérature, des zones de présence préférentielle des poissons de différentes espèces au sein de modèles réduits de passes à bassins à fentes verticales. A gauche : zones préférentielles des truites (Wang et al., 2010) ; à droite : zones préférentielles des chevaines (Cornu et al., 2012). . . .	53
3.5	Vue en plan de la géométrie du modèle réduit de la passe de Rivière	55
3.6	Modélisation en deux dimensions (k-epsilon) des vitesses scalaires, exprimée en m/s, de l'écoulement au sein du bassin 4. Valeurs calculée pour le prototype. Les distances sont données en mètres. L'amont se trouve à gauche. (Bagnée & De Greef, 2014)	59
3.7	Mise en évidence des zones de recirculation et des lignes de courant principales dans le bassin 4. Les distances sont données en mètres. L'amont se trouve à gauche. (Bagnée & De Greef, 2014)	60
4.1	Photo illustrant la disposition d'une antenne à la sortie d'une échancrure	64
4.2	Photo d'un PIT tag	64
4.3	Photos illustrant le gain en terme de qualité d'image grâce à l'écrasement de la surface d'eau par une plaque de plexiglass (à gauche, sans plaque ; à droite, avec plaque)	65
4.4	Figure mettant en relation la taille et le poids des saumons utilisés	67
4.5	Figure mettant en relation la taille et le poids des ablettes utilisées	69
4.6	Figure mettant en relation la taille et le poids des chevesnes utilisés	71
4.7	Figure mettant en relation la taille et le poids des chabots utilisés	72
4.8	Figures présentant l'évolution de la température de l'eau du sous-sol du laboratoire en fonction du temps pour trois expérimentations différentes (A, ablette ; B, chevaine ; C, chabot) (en bleu, les données de température collectées ; en rouge, la température moyenne déterminée à partir de ces températures)	75
4.9	Cliché des bacs de stockage. La pompe à air est entourée en rouge	76
4.10	Vues extérieure et intérieure du modèle après la couverture par la bâche et l'installation des projecteurs	77
4.11	Évaluation de franchissabilité : schéma des éléments particuliers du modèle expérimental	78

4.12	Photos du dispositif anti-retour	79
4.13	Évaluation de franchissabilité : disposition des antennes RFID dans le modèle . .	79
4.14	Évaluation de franchissabilité : schématisation des zones filmées verticalement (cadres de couleur) et horizontalement (flèche verte) par les caméras	80
4.15	Évaluation comportementale : schématisation des zones filmées verticalement par les caméras	81
4.16	Efficacité d'attraction par le débit d'attrait : schématisation de la zone filmée verticalement par la caméra	83
4.17	Efficacité d'attraction par le débit d'attrait : disposition des antennes RFID dans le modèle	83
4.18	Figure illustrant le parcours relatif à la position des antennes RFID pour quatre poissons après un traitement de données	86
4.19	Illustration des différentes étapes du traitement d'image. De gauche à droite, de haut en bas : image initiale, image moyenne, résultat de la soustraction et illustration de la ROI, résultat du threshold	91
4.20	Ligne de résultat fournie par ImageJ	92
4.21	Représentation des différents paramètres de Feret et du centroïde	94
4.22	Illustration de l'effet du traitement de données avec <i>MATLAB</i> . L'image de gauche représente la densité de détections "brutes" (AVANT), l'image de droite représente la densité de détection après traitement (APRÈS).	98
4.23	Modélisation graphique de poissons	99
5.1	Diagramme circulaire présentant la proportion de saumons regroupés selon le nombre de remontées effectuées	106
5.2	Cliché d'un saumon juvénile restant sur le fond du modèle pour se stabiliser . . .	107
5.3	Figure présentant une courbe cumulative des remontées selon le temps d'expéri- mentation et un histogramme cumulatif des remontées par période 10 minutes . .	111
5.4	Figure de la régression linéaire associée aux observations de temps de remontées selon la taille de l'ablette remontée	112
5.5	Cliché d'un banc d'ablettes formé dans le modèle réduit	113
5.6	Diagramme circulaire présentant la proportion de chevesnes regroupés selon le nombre de remontées effectuées	116
5.7	Histogramme de densité des durées de remontée et courbe cumulative de ces données pour tous les chevesnes	117
5.8	Diagramme circulaire des chevesnes classés par intervalles de durée de remontée .	118
5.9	Figure des remontées des chevesnes cumulées pour une courbe cumulative et par pas de temps de 30 minutes selon le temps	119
5.10	Visualisation de l'effet des successions des remontées par les temps de remontées pour les chevesnes	121
5.11	Cliché illustrant le phénomène d'entassement des chabots	125

5.12	Diagramme circulaire montrant les proportions de chevesnes selon le nombre d'entrées réalisées dans le modèle	131
6.1	Représentation graphique des zones de présence préférentielle des ablettes	135
6.2	Modélisation en deux dimensions (k-epsilon) des vitesses scalaires, exprimée en m/s, de l'écoulement au sein du bassin 4. Valeurs calculées pour le prototype. Les distances sont données en mètres. (Bagnée & De Greef, 2014)	136
6.3	Représentation graphique des vitesses scalaires absolues moyennes des ablettes .	137
6.4	Modélisation des ablettes dans différentes positions le long de 3 trajectoires différentes	138
6.5	Superposition d'images des ablettes dans différentes positions le long de 3 trajectoires différentes	139
6.6	Densité de présence des ablettes, vue de côté. A gauche : détections dans l'entièreté du bassin ; à droite : isolement des détections proches de l'échancrure	140
6.7	Illustration de trois trajectoires juste après le franchissement de l'échancrure, à trois moments distincts	141
6.8	Représentations graphiques des zones de présence préférentielle des six lots de chevaines dans le bassin 6	142
6.9	Représentation graphique des zones de présence préférentielle des chevaines dans le bassin 6, somme des six lots	143
6.10	Représentation graphique des zones de présence préférentielle des chevaines dans le bassin 5, somme des six lots	145
6.11	Représentation graphique des vitesses scalaires absolues moyennes des chevaines pour les 6 lots dans le bassin 6	146
6.12	Moyennes des vitesses des six lots de chevaines dans le bassin 6	147
6.13	Moyennes des vitesses des quatre premiers lots de chevaines dans le bassin 5 . . .	148
6.14	Trajectoires de chevaines traversant le bassin	149
6.15	Trajectoires de chevaines entamant le franchissement de l'échancrure	150
6.16	Densité de présence des chevaines au droit de l'échancrure	150
6.17	Représentation graphique des zones de présence préférentielle des chabots	152
6.18	Modélisation de petits chabots le long de quatre trajectoires différentes	153
6.19	Illustration des zones de présences préférentielles pour chacune des espèces étudiées dans le modèle réduit de la passe à bassin de Rivière. De gauche à droite, de haut en bas : (a) salmonidés (Pype, 2015), (b) ablettes communes, (c) chevaines et (d) chabots.	155
A.1	Comparaison des courbes simulées de vitesse maximale selon la longueur du poisson définies sur base des données collectées par Katopodis et Gervais (1991) et par Wolter et Arlinghaus (2003)	179

A.2	Comparaison des courbes simulées de vitesse maximale de croisière selon la longueur du poisson définies sur base des données collectées par Katopodis et Gervais (1991) et par Wolter et Arlinghaus (2003)	180
A.3	Plan de la situation finale du modèle réduit (échelle 1/5) de la passe à poisson de Rivière construit au Laboratoire de Recherches Hydraulique à Châtelet, Belgique (Zorzan, 2016)	181
B.1	Illustration de la disposition des caméras le long du modèle réduit	184
B.2	Figures présentant l'évolution de la température de l'eau du sous-sol du laboratoire en fonction du temps pour deux périodes différentes de l'année (A, du 21/11/16 au 29/12/16; B, du 21/02/16 au 31/03/17)	187
B.3	Périodes des phases remontées des chevesnes en fonction du temps expérimental .	188
C.1	Figure de la répartition temporelle des remontées des saumons cumulées par pas de temps de 30 minutes et par une courbe cumulative selon le temps	193
C.2	Visualisation de l'effet des successions des remontées en considérant les résultats de temps de remontées pour les saumons	193
C.3	Figure de la régression linéaire associée aux observations de temps de remontées selon la taille du saumon remonté	194
C.4	Diagrammes circulaires de la proportion de chevesnes selon le nombre de remontées réalisées pour chaque lot	196
C.5	Régression linéaire entre le temps de remontée et la taille pour chaque numéro de remontée	198
C.6	Régression linéaire entre le temps de remontée et le facteur de condition pour chaque numéro de remontée	199
D.1	Densité des présences (temps cumulé de présence) extraits des tests 1 (gauche) et 2 (droite) des ablettes, exprimé en seconde	200
D.2	Moyennes des vitesses extraites des tests 1 (gauche) et 2 (droite) des ablettes, exprimées en m/s	201
D.3	Densité de présence de chaque lot de chevaines pris séparément, dans le bassin 5, exprimé en secondes	202
D.4	Moyennes de vitesses de chaque lot de chevaines pris séparément, dans le bassin 5, exprimé en m/s	203
D.5	Densité de présence de chaque lot de chabot pris séparément, exprimé en seconde	204

Liste des tableaux

2.1	Tableau exemplatif de la définition de la classe d'âge et du groupe d'âge	16
2.2	Synthèse des temps d'endurance et du type musculaire sollicité pour chaque activité de nage selon Katopodis et Gervais (2012)	18
2.3	Vitesses maximale et maximale de croisière déterminées par le modèle de Wolter-Arlinghaus pour un saumon atlantique de 75 cm	33
2.4	Caractéristiques écologiques des ablettes communes	34
2.5	Intervalles des vitesses maximale et maximale de croisière déterminés grâce aux données empiriques collectées par Katopodis et Gervais pour une ablette commune de 15 cm	35
2.6	Caractéristiques écologiques des chevesnes	38
2.7	Intervalles des vitesses maximale et maximale de croisière déterminés grâce aux données empiriques collectées par Katopodis et Gervais pour un chevesne de 45 cm	38
2.8	Caractéristiques écologiques des chabots	41
3.1	Extrait du tableau récapitulatif des groupes d'espèces (Baudoin et al., 2014) . . .	48
3.2	Valeurs guide pour le dimensionnement de passes à bassins à jet de surface (Baudoin et al., 2014). Toutes les valeurs sont exprimées en mètres.	48
3.3	Valeurs cibles pour la conception de la passe à poisson de Rivière (sur la Meuse belge) respectant les critères d'acceptabilité piscicole recommandés par la Direction des Études Techniques (Zorzan, 2016)	55
3.4	Rapports d'échelle et dimensions principales caractéristiques de la passe à poisson de Rivière (en Meuse belge) (Zorzan, 2016)	57
3.5	Vitesses scalaires caractéristiques de l'écoulement découlant de la modélisation numérique de l'écoulement de la future passe à poisson à fentes verticales de Rivière (Meuse belge) et de son modèle réduit à échelle 1/5 (Châtelet, Belgique)	61
4.1	Tableau des vitesses maximales et maximales de croisière modélisées pour les saumons utilisés	68
4.2	Tableau des vitesses maximales et maximales de croisière modélisées pour les ablettes utilisées	69
4.3	Classes d'âge des ablettes selon leur taille	70
4.4	Tableau des vitesses maximales et maximales de croisière modélisées pour les chevesnes utilisés	71

4.5	Tableau des vitesses maximales et maximales de croisière modélisées pour les chabots utilisés	73
4.6	Classes d'âge des chabots selon leur taille	73
4.7	Rivières et localités de lâchage des espèces utilisées dans le cadre de la présente étude	74
4.8	Évaluation spécifique de la franchissabilité : caractéristiques méthodologiques pour chaque espèce	80
4.9	Évaluation comportementale des chabots : nombre d'individus par classe de longueur	82
4.10	Évaluation spécifique comportementale : synthèse des caractéristiques méthodologiques pour chaque espèce utilisée	82
4.11	Tableau permettant de comparer les tailles des poissons utilisés envisagées par la loi d'échelle et les longueurs d'individus couramment rencontrés dans la nature .	84
4.12	Résumé du traitement d'images avec ImageJ	91
4.13	Résumé du script <i>MATLAB</i> servant à éliminer les erreurs de détection	96
5.1	Tableau du nombre de remontées réalisées selon le nombre de saumons les ayant achevées	105
5.2	Tableau des résultats des indicateurs de remontées pour les saumons	106
5.3	Tableau présentant les résultats collectés par Pype (2015) pour des saumons atlantiques juvéniles	107
5.4	Tableau des résultats des indicateurs de remontées pour les ablettes communes .	110
5.5	Tableau présentant les résultats de régression et des statistiques réalisées	112
5.6	Tableau des résultats des remontées réalisées en paire ou plus pour les ablettes .	113
5.7	Tableau du nombre de remontées réalisées selon le nombre de chevesnes les ayant achevées	116
5.8	Tableau des résultats des indicateurs des remontées des chevesnes	116
5.9	Tableau présentant les résultats de régression et les statistiques réalisées pour expliquer la relation durée de remontée-longueur	122
5.10	Tableau présentant les résultats de régression et les statistiques réalisées pour expliquer la relation durée de remontée-facteur de condition	123
5.11	Tableau des résultats des remontées réalisées en paire ou plus pour les chevesnes	124
5.12	Synthèse des indicateurs de taux de franchissement et de fréquence moyenne de franchissement pour chaque espèce dans le but d'une comparaison interspécifique	127
5.13	Tableau synthétique des temps de remontée pour chaque espèce expérimentée . .	128
5.14	Synthèse des conclusions spécifiques déterminées sur base des temps de remontée dans le cadre de la détermination de la capacité des poissons à franchir ou, au moins, à rester dans le modèle	129
5.15	Tableau présentant les résultats d'entrées dans le modèle et des longueurs des lots dans le but d'une comparaison entre les chevesnes et les salmonidés.	132

6.1	Tableau récapitulatif des vitesses de croisière maximale des lots utilisés d’ablettes, de chevaines et de chabots. Inspiré des tableaux 4.2, 4.4 et 4.5.	157
B.1	Tableau de comparaison des coefficients paramétrisant les relations taille-poids pour des données de la littérature et les données de chaque lot	182
B.2	Caractéristiques des caméras utilisées	183
B.3	Tableau indiquant la disposition exacte de caméras accrochées aux barres métalliques prévues à cet effet le long du modèle réduit de la passe de Rivière	183
B.4	Résultats de l’analyse de l’eau du laboratoire de Châtelet	186
B.5	Tableau reprenant la valeur de chaque paramètre défini dans le programme ImageJ, pour chaque lot d’image traité	190
C.1	Temps des remontées totales pour les saumons	192
C.2	Tableau reprenant la quantité d’individu ayant réalisé une certaine quantité de remontées selon chaque lot expérimental pour les chevesnes	194
C.3	Résultats détaillés des indicateurs de remontées pour les 6 lots de chevesnes . . .	197
C.4	Taux de remontées partielles détaillés pour les 6 lots de chevesnes	197
C.5	Détails des résultats statistiques pour un seuil de 0,05 pour déterminer l’influence de la succession des remontées pour les chevesnes	197

CHAPITRE 1

Introduction

co-écrit par Estelle Courtois et Loïc Van Audenhaege

1.1 Contexte global

Peu après le début de la révolution industrielle belge, les premiers aménagements pour la navigation prennent place au niveau du bassin versant mosan dans les années 1840. Conjugée à la diminution de la qualité physico-chimique et hydromorphologique des cours d'eau, la fragmentation des environnements aquatiques exerce une pression non négligeable sur les populations de poissons. Tout obstacle peut en effet entraîner des conséquences directes sur les populations de poissons (blocage de la migration reproductive (Paquer & Philippart, 2006), isolement génétique, faible résilience des populations aux catastrophes anthropiques et environnementales (Fausch et al., 2002), mortalité causée par les turbines (Rytwinski et al., 2017)). Le cas dramatique du saumon mosan reste un des exemples les plus illustratifs. Ce dernier disparaît entre 1925 et 1930 suite à l'édification de barrages à vannes et à une exploitation halieutique trop importante (Philippart, 2005). De même, une diminution significative des populations de cyprinidés est observée dans les cours d'eau européens (Lucas & Baras, 2001).

Étant donné toutes ces répercussions sur la faune, une directive cadre sur l'eau (DCE) (2000/60/CE) est établie en 2000. Celle-ci a notamment pour but de restaurer la qualité physico-chimique des écosystèmes aquatiques. De même, en 1996, le Benelux édicte une Décision M (96) qui prévoyait, pour 2010, le rétablissement dans les réseaux hydrographiques de Belgique et des

Pays-Bas de la libre circulation des poissons, et plus particulièrement des espèces amphihalines¹ (Ovidio & Philippart, 2010). Les autorités belges se sont donc mobilisées dans le but de restaurer la continuité écologique de ces cours d'eau en construisant des dispositifs de franchissement ainsi qu'en rénovant ceux déjà construits.

Jusqu'à maintenant, l'étude de la conception des passes à poissons se concentrait essentiellement sur les salmonidés (Roscoe & Hinch, 2010), étant donné leur valeur économique (Larinier, 2001) et leur fragilité face à la fragmentation écologique (Gouskov et al., 2016). Par conséquent, les critères de dimensionnement des passes sont généralement définis par rapport au comportement et à la capacité de nage des salmonidés (Larinier, 1987). L'efficacité attendue des dispositifs de franchissement est alors dramatiquement impactée pour d'autres espèces (Noonan, 2011). Néanmoins, pour assurer la continuité écologique des cours d'eau pour l'entière des espèces mosanes, il est primordial de réviser les critères d'aménagement des passes pour les espèces qui n'étaient alors pas considérées.

1.2 Contexte particulier

Dans ce contexte de restauration de la continuité écologique, plusieurs passes ont été déclarées inefficaces dont, entre autres, celle de Rivière, en Meuse belge. Sa modernisation a la particularité de devoir s'inscrire dans le chenal de l'échelle actuelle à cause du manque d'espace disponible. La géométrie des bassins aval s'éloignant des géométries standards, les acteurs de terrain ont été contraints de commander une étude sur modèle réduit pour choisir les aménagements optimaux à réaliser.

Un modèle réduit à échelle 1 : 5 de la passe à poisson de Rivière a dès lors été construit au Laboratoire de Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie situé à Châtelet. Par rapport à l'échelle initiale, les bassins ont dû être agrandis pour les rendre accessibles au poissons de plus grand gabarit. Le caractère multi-spécifique et l'attractivité de la passe sont aussi deux facteurs d'importance majeure dont il a fallu tenir compte.

Finalement, étant donné l'opportunité liée à l'existence d'un modèle réduit complet d'une passe, il a été décidé d'y introduire des poissons afin de faire des études comportementales. Un premier mémoire réalisé par Jean-Charles Pype pendant l'année académique 2014-2015 visait à étudier le comportement des salmonidés. La présente étude se focalise sur différentes espèces de poissons mosans dans ce type d'infrastructure : les saumons, les ablettes, les chevaines et les chabots. Ce domaine d'étude est encore peu développé mais son avantage économique lui confère une grande pertinence.

1. Les poissons migrateurs amphihalins se déplacent entre les eaux douces et la mer pendant leur cycle biologique (Irstea, 2014).

1.3 Objectifs et enjeux

L'enjeu global du domaine de recherche dans lequel s'insère notre étude est de pouvoir prédire le comportement des poissons dans un dispositif de franchissement en fonction de ses caractéristiques particulières (écoulement, environnement extérieur, etc.). Cela permet d'évaluer l'efficacité d'un ouvrage et d'améliorer son design afin de le rendre empruntable par un maximum d'espèces ciblées.

Dans ce contexte, l'objectif global propre à notre travail est d'étudier le comportement des poissons dans un modèle réduit d'une passe à bassins. Notre recherche s'organise dans la continuité de l'étude réalisée par Pype (2015) en y apportant une dimension multi-spécifique. Pour ce faire, des saumons atlantiques, des ablettes communes, des chevaines ainsi que des chabots sont utilisés pour différentes expérimentations.

Les objectifs partiels s'inscrivant dans cet objectif global sont exposés ci-dessous dans un ordre similaire à l'organisation de ce document.

Premièrement, les caractéristiques migratoires et natatoires des poissons peuvent être appréhendées grâce à une revue bibliographique. Cela permet entre autres de trouver des outils simulant les vitesses de nage et tenant compte de la variabilité multi-spécifique. En plus de cela, il est aussi intéressant de se pencher sur les critères de design d'une passe à bassins adaptée à différentes espèces.

Ensuite, la question de la pertinence de l'introduction de matériel vivant dans un modèle réduit peut être posée. Il est donc nécessaire de valider l'application de la loi d'échelle et de déceler les limitations de ce type d'étude.

Dans ce contexte expérimental récent, il est souhaitable de développer une méthodologie appropriée aux espèces utilisées, généralisable et reproductible. Un protocole d'expérimentation et d'acquisition de données, ainsi que des techniques de traitement de données devront donc être développés.

Un des objectifs finaux de l'étude est d'évaluer la capacité des poissons à remonter la passe et de mettre en évidence certains facteurs qui pourraient influencer ces résultats de franchissement (photopériode, taille du poisson, etc.). Par ailleurs, il est aussi intéressant de comprendre le comportement des poissons par rapport à l'écoulement régnant dans les bassins. Cela permettra de vérifier si la passe est adaptée ou non aux espèces étudiées. Notons toutefois que, compte tenu des nombreux biais expérimentaux que nous tenterons de prendre en considération, le but

de l'interprétation des résultats est uniquement de dégager certaines tendances.

Finalement, de nombreux auteurs mettent en avant la nécessité d'une collaboration entre les domaines de la biologie et de l'éthologie avec l'ingénierie civile. Cela justifie et permet d'évaluer l'intérêt de la réalisation de ce travail par notre binôme respectivement spécialisé dans ces deux domaines scientifiques.

Caractérisations migratoire et natatoire des poissons

écrit par Loïc Van Audenhaege

2.1 Introduction

Avant de se plonger dans la présente étude, il est nécessaire de préciser et de délimiter la notion de « migration » chez les poissons grâce à la littérature traitant de ce domaine de recherche. L'intérêt est de pouvoir comprendre les enjeux relatifs à la restauration d'une continuité écologique en Meuse. Pour ce faire, les différents types et objectifs des migrations vont être expliqués. L'intérêt pour le lecteur est de mieux comprendre les raisons et les caractéristiques migratoires des poissons de nos régions.

Ensuite, comprendre les multiples facteurs déterminant l'aptitude des poissons à franchir les obstacles à la montaison est une nécessité tant sur le terrain que dans le cas de cette étude. Le présent chapitre présente donc ces différents facteurs, leurs impacts et l'intérêt de leur caractérisation à transposer dans un contexte d'approche intégrée du problème de la franchissabilité à la montaison des ouvrages par les poissons. L'objectif de cette section est de pouvoir mettre en relation ces informations à des cas spécifiques que nous allons étudier plus loin dans ce travail dans le but d'optimiser nos protocoles expérimentaux ainsi que de pouvoir développer des outils, des indicateurs permettant de mieux comprendre nos résultats.

Par la suite sont réalisées une caractérisation et une évaluation de l'état des connaissances concernant ces différents facteurs par rapport aux différentes espèces utilisées pour la partie expérimentale de cette étude. En effet, la dimension spécifique oblige à considérer séparément l'impact de chaque composante intervenant dans l'aptitude de nage ainsi que des caractéristiques migratoires de chaque espèce.

2.2 Caractéristiques migratoires

2.2.1 Définition et discussion du concept de migration

Cette section est quasiment entièrement basée sur les informations compilées par Lucas et Baras (2001) dans le document intitulé *Migrations of Freshwater Fishes*.

Avant toute chose, il est nécessaire de définir le concept de migration. Ce dernier peut être vu comme :

une stratégie à valeur adaptative impliquant un mouvement d'une partie ou de toute une population à un moment donné généralement, mais n'impliquant pas nécessairement une prédictibilité et une synchronisation dans le temps étant donné que la variabilité interindividuelle est une composante clef des populations. Les mouvements sont réalisés entre des sites discrets existants dans une réalité multidimensionnelle de facteurs biotiques et abiotiques. (Lucas & Baras, 2001, p.13)

Il existe trois schémas de migration :

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

Au sein même de la diadromie, il existe trois schémas de migration :

- L'anadromie, pour laquelle le biome dans lequel l'alimentation et la croissance sont réalisées (la mer) est différent du biome où se déroule la reproduction (l'eau douce) (ex. le saumon atlantique (*Salmo salar*), l'esturgeon atlantique (*Acipenser sturio*)).
- La catadromie, pour laquelle le biome dans lequel l'alimentation et la croissance sont réalisées (l'eau douce) est différent du biome où se déroule la reproduction (la mer) (ex. l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*)).
- L'amphidromie, pour laquelle l'habitat principal est le même que celui où se passe la reproduction (généralement l'eau douce). Cela n'empêche pas une alimentation et une croissance, bien que sur une moins longue durée, des premiers stades de développement dans un biome différent (l'eau de mer) de celui où le migrateur vit la majeure partie de sa vie.

Ces trois dernières définitions sont très restrictives et reflètent plutôt les aspects migratoires liés au cycle de vie du poisson que des migrations adaptatives. Prendre en compte ces dernières complexifie la catégorisation des migrations.

Par ailleurs, nous nous focaliserons sur les phénomènes migratoires réalisés dans les eaux douces tempérées.

En raison de leur importance économique et du caractère emblématique des espèces océanodromes et diadromes, les migrations ont souvent été abordées selon des critères de distances effectuées et de changement de salinité alors que la réalité est bien plus complexe. La caracté-

sation des habitats vers lesquels s'effectue la migration doit être définie par la prise en compte de facteurs biotiques et abiotiques supplémentaires (température, oxygène, vitesse de l'eau, etc.). Il est important de garder à l'esprit que les cours d'eau possèdent un potentiel important au niveau de la diversification des habitats et, bien souvent, cela se remarque sur de courtes distances. C'est pourquoi certains poissons potamodromes effectuent des migrations de quelques centaines de mètres. Bien que la distance parcourue soit moins spectaculaire que pour beaucoup d'espèces océanodromes et diadromes, pour beaucoup de poissons d'eau douce, les migrations permettent bien souvent d'assurer la survie de l'individu et la pérennité de l'espèce. Ce dernier aspect a bien trop souvent été négligé et les populations de poissons potamodromes ont vu leur nombre chuter, notamment à cause de la fragmentation des habitats (Lucas & Baras, 2001).

2.3 Types de migration en eau douce des zones tempérées

Il existe différents types de migrations. Nous nous focaliserons sur ceux généralement accomplis en eau douce dans les milieux tempérés. La nécessité de réaliser ces migrations dépend de nombreux facteurs comme le stade de développement du poisson, l'espèce considérée et les caractéristiques de l'habitat permettant de répondre aux exigences épisodiques et cycliques du poisson. La figure ci-dessous résume l'interaction existant entre ces migrations durant la vie « générique » d'un poisson.

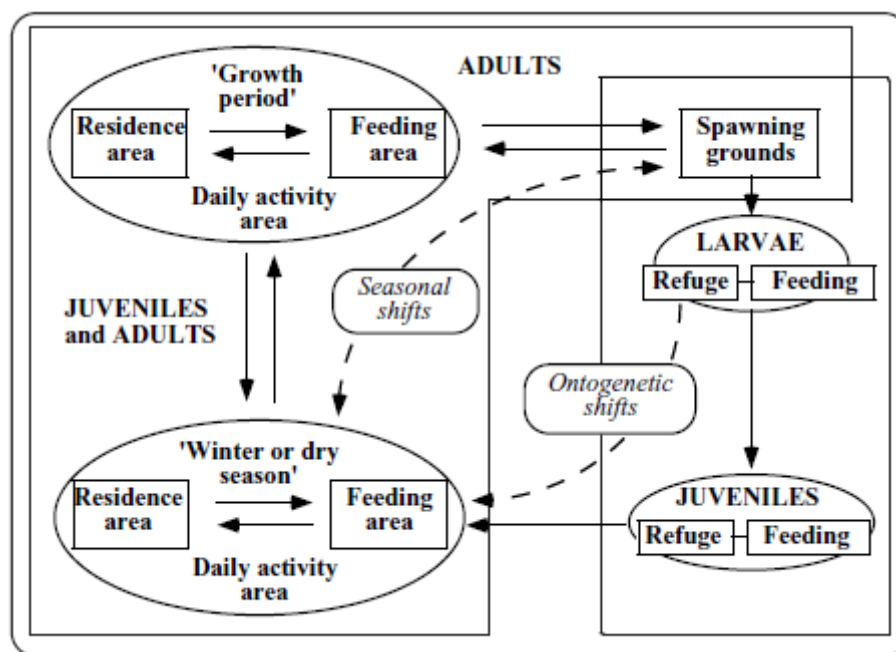


FIGURE 2.1 – Schématisation des différentes migrations réalisées par un poisson durant son cycle de vie (Lucas & Baras, 2001)

Comme nous allons le détailler dans les sections suivantes, il existe chez les poissons des migrations ayant des objectifs bien précis. Cependant, il arrive qu'une migration puisse satisfaire

plusieurs besoins à la fois, ce qui complique la distinction rigoureuse de chaque migration observée sur le terrain. Par exemple, les zones de résidence et d'alimentation peuvent parfois être confondues. C'est le cas de zones où protection contre les prédateurs et alimentation vont de pair. De plus, la figure 2.1 peut rendre compte de migrations selon l'axe longitudinal (amont-aval), mais aussi latéralement et verticalement au sein même de la rivière. Par exemple, une migration circadienne¹ dans la colonne d'eau peut avoir lieu pour se protéger des périodes de chasse des prédateurs ou pour suivre la migration verticale du phytoplancton. Cependant, étant donné le contexte de l'étude réalisée, nous nous focaliserons sur les migrations longitudinales.

2.3.1 La dispersion

La dispersion est un phénomène de migration passive par laquelle les larves ou les œufs sont emportés unidirectionnellement par le courant vers l'aval. Une barrière dans ce type de migration peut conduire à :

- un retard ou un blocage à l'accès à certains habitats qui sont des étapes obligatoires pour les larves. Cela résulte en une augmentation de la mortalité des larves.
- une diminution de la colonisation de nouveaux habitats de reproduction et une difficulté au repeuplement d'habitats dépeuplés.

Pour la plupart des espèces de salmonidés et de cyprinidés de nos régions, la plupart des œufs sont accrochés à divers substrats minéraux ou végétaux, ou bien sont déposés dans le fond de cours d'eau à faible courant. Pour les cyprinidés, les larves possèdent une faible capacité locomotrice. Le maintien de celles-ci dans les lieux propices à leur développement se fait essentiellement dans des zones à faible courant (couches limites, zones inondables, etc.). A contrario, les alevins des salmonidés possèdent une capacité locomotrice plus développée et sont alors capables de mouvements actifs.

2.3.2 La migration de reproduction

Pour assurer la pérennité de l'espèce, le poisson doit pouvoir atteindre des habitats spécifiques où le dépôt des œufs et parfois même la croissance des larves sont optimaux.

Bien qu'il existe des variations quant au moment d'initiation de la migration reproductrice pour certaines espèces, cette dernière est généralement initiée de manière concertée pour permettre la rencontre par le rassemblement d'autres individus (de 1 à des milliers). Par conséquent, la reproduction s'effectue donc sur une fenêtre temporelle assez courte et la migration associée est généralement celle qui est la plus visible dans la nature.

Bien que certaines espèces de poissons d'eau douce migrent vers l'aval, la plupart des poissons de nos régions (et même ailleurs dans le monde) réalisent plutôt des migrations vers l'amont pour se reproduire. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette tendance à la montaison :

- Pour se reproduire, beaucoup d'espèces des familles des petromyzontidés, salmonidés, cyprinidés nécessitent des substrats grossiers qu'ils ne peuvent trouver en aval où les

1. Le rythme circadien est l'étude d'une période de 24 heures pendant lesquelles un certain nombre de mécanismes biologiques et physiologiques se répètent (Sante-Medecine, 2014).

sédiments fins s'accumulent davantage du fait de l'affaiblissement progressif de la pente des cours d'eau.

- À la sortie de l'hiver, les poissons vivent dans des habitats les préservant des impacts de l'hiver (bassins profonds à courant lent, lac, etc.) mais qui ne sont pas adaptés à la reproduction. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser une montaison pour trouver un lieu approprié à la reproduction.
- Remonter un cours d'eau permet d'atténuer les effets de dispersion des larves et du déplacement passif des individus juvéniles qui peut se produire lors de fortes crues.
- Frayer en amont d'habitats adaptés au développement et à la protection permet d'augmenter la proportion des larves dérivant dans ces zones.

2.3.3 La migration de protection

La rivière est un milieu dans lequel des variables d'état relatives à la qualité physico-chimique et à l'écoulement peuvent varier de manière épisodique ou périodique avec une durée à très court ou moyen terme, comme durant les périodes de crues et de sécheresse ou lorsque les températures chutent en hiver. Les origines de ces variations peuvent être naturelles ou anthropiques comme dans le cas de lâchers d'eau de barrage ou de pollutions humaines. Notons que, outre des variables d'état propres à la rivière, la présence de prédateurs peut aussi induire des migrations verticales ou horizontales ou un changement comportemental dans le rythme circadien.

Le degré de sensibilité aux altérations de ces variables d'état varie selon les espèces. Certains poissons plus tolérants adoptent en effet une stratégie de survie à ces variations tandis que d'autres doivent réaliser des migrations dans des zones leur permettant d'optimiser la sauvegarde d'énergie et la survie.

Dans la présente étude, nous nous focaliserons sur les migrations saisonnières. Néanmoins, il ne faut pas sous-estimer la nécessité de permettre la migration de la faune, notamment en cas d'événements ponctuels tels que les pollutions anthropiques accidentelles pour lesquelles les poissons n'ont souvent aucune autre alternative que la migration en amont de la source de pollution ou dans les affluents préservés.

En régions tempérées, les zones peu profondes et riches en nourriture durant l'été deviennent souvent sujettes à de forts courants pauvres en aliments en hiver. En raison d'une diminution considérable de la température, le métabolisme, la digestion et la capacité de nage sont drastiquement réduits. Il est donc nécessaire pour le poisson de migrer vers des zones plus profondes et plus calmes. Cela peut se faire vers les eaux lenticques² en aval, dans des bras morts, à des confluences ou dans des bassins comportant ces caractéristiques. Ces mouvements ne se réalisent pas de manière aussi « concertée » que lors des migrations de reproduction. La nécessité de les accomplir ne les rend pas toujours obligatoires. Cependant, des regroupements de poissons sont souvent observés dans ces habitats particuliers.

2. Habitat à courant lent, profondeur moyenne à grande, substrat constitué de matériaux fins (fin gravier, sable, vase) (Philippart, 2007).

En outre, durant des événements de crue, certains poissons tels que des espèces de cyprinidés, trouvent refuge dans les zones inondées.

En conclusion, la migration de protection contribue à la résilience des populations de poissons, mais n'est rendue possible que grâce à la continuité écologique des habitats.

2.3.4 La migration trophique

Dans les cours d'eau, la production en biomasse n'est pas répartie de manière uniforme dans le temps et l'espace. De plus, la compétition pour une ressource trophique peut aussi varier selon ces deux dimensions.

Pour la plupart des espèces de poissons du bassin hydrographique mosan, des déplacements sont réalisés afin de trouver des lieux où la productivité en biomasse lui permet d'optimiser sa croissance.

De plus, les périodes de migrations trophiques sont très importantes car, dans nos régions, elles ont lieu généralement à la fin de la migration de reproduction (juin) et se terminent vers le début de l'automne. Elles sont donc aussi déterminantes dans la constitution des réserves qui permettront à l'individu de survivre à l'hiver et d'être prêt à réaliser une saison de reproduction supplémentaire.

En règle générale, ces mouvements concernent un grand nombre d'espèces (salmonidés, cyprinidés, percidés). La distance et la direction de ces migrations peuvent varier selon la distribution de la biomasse du cours d'eau. En outre, il a déjà été mis en évidence que certaines populations de poissons ne réalisaient pas de migration trophique, car confondant l'habitat de reproduction et celui de l'alimentation. Ces migrations sont donc plus difficiles à appréhender que dans le cas d'une migration de reproduction étant donné les multiples facteurs intervenant dans l'initiation d'une migration trophique.

Pour les prédateurs, la réalisation d'une migration trophique dépend de la probabilité de croiser des proies en se déplaçant et de la biomasse présente ou arrivant dans l'habitat d'été du prédateur. Certaines de ces migrations suivent immédiatement l'initiation des migrations de leurs proies. Il est donc plus difficile de comprendre ces migrations pour les prédateurs car elles se basent sur des caractéristiques opportunistes plus souples que pour les migrations de leurs proies.

2.3.5 La migration exploratoire, de recolonisation et de post-déplacement

En été, les crues aux courants très rapides ne laissent pas toujours la possibilité au poisson de trouver une zone où se protéger. Il en résulte souvent une dérive temporaire vers l'aval, généralement suivie d'une remontée dans les zones amont d'origine. Ce type de comportement peut être qualifié de «homing». Bien que ce concept éthologique ait été démontré pour la reproduction des salmonidés, de nombreuses études ont mis en évidence ce comportement en délocalisant d'autres poissons tels que le chabot (*Cottus gobio*) (Ovidio & Philippart, 2007) ou certains cyprinidés

(Lucas & Baras, 2001).

Par ailleurs, bien que très difficiles à mettre en évidence, les migrations exploratoires sont bien réelles chez les poissons. Leur but est de fuir une trop forte compétition et de coloniser des zones récemment connectées ou précédemment dépeuplées.

2.4 Influences interspécifiques et externes sur la capacité de nage

Cette section présente les différentes composantes à prendre en compte dans le cadre de l'évaluation intégrée de l'aptitude d'une espèce à franchir une passe à poissons lors de la montaison. En outre, l'impact de ces composantes y est discuté.

Pour le lecteur, l'intérêt de cette section est de comprendre concrètement ce qui détermine la nage d'un poisson. Le but est d'identifier certains indicateurs permettant de prédire l'aptitude d'un poisson à franchir une passe, ce qui sera fort utile dans le cadre de cette étude.

2.4.1 Forces exercées sur un poisson

Avant de se plonger dans l'évaluation des facteurs qui influencent les capacités de nage des poissons, il est nécessaire de bien comprendre les forces agissant sur un poisson se trouvant dans une colonne d'eau en mouvement.

L'eau est un fluide incompressible. Par conséquent, un mouvement initié par le poisson est transmis au fluide par différentes forces. Pour expliquer cela, la figure 2.2 schématise les forces qui agissent sur un poisson en train de nager.

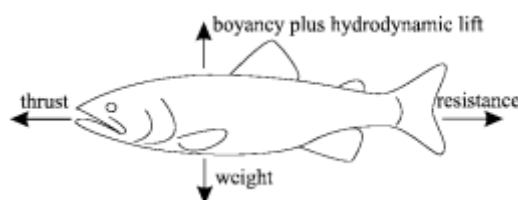


FIGURE 2.2 – Schématisation des forces exercées sur un poisson se trouvant dans la colonne d'eau (Sfakiotakis et al., 1999). Les forces présentées sont le poids (*weight*), la flottabilité (*buoyancy*), la force de portance (*hydrodynamic lift*) et la poussée du poisson (*thrust*).

Au niveau de la composante verticale, le poids (*weight*) induit une coulée du poisson. Pour tout corps plongé dans l'eau, la poussée d'Archimède est une force verticale dirigée vers le haut. Celle-ci est influencée par la flottabilité (*buoyancy*), elle-même influencée par la densité du poisson. Si la poussée d'Archimède ne contrecarre pas pleinement la coulée induite par le poids, il est nécessaire qu'une force de portance (*hydrodynamic lift*) soit générée par le battement de nageoires spécifiques. La force de portance agit essentiellement sur la stabilisation du poisson et non sur sa nage.

Concernant la composante horizontale, lorsqu'il y a déplacement du poisson, la poussée (*thrust*)

est générée par ses nageoires et l'ondulation de son corps.

Dès qu'il y a déplacement ou présence de lignes de courant, une force de frottement est créée. Cette dernière, la force de traînée, regroupe différents phénomènes générant une résistance au passage du poisson. Ces derniers sont listés ci-dessous (Sfakiotakis et al., 1999) :

- Une traînée de friction générée par l'effet de viscosité entre le fluide et la surface du poisson.
- Une traînée de forme induite par la déformation du courant le long d'un corps solide. La forme du corps possède donc une influence hydrodynamique en lien avec cette composante de la traînée.
- La traînée induite équivalente à la perte d'énergie générée par la formation de vortex locaux lors du battement des nageoires. La traînée induite est donc celle qui intervient uniquement dans le cas du mouvement du poisson.

Pour se maintenir à une position donnée sur l'axe horizontal, le poisson doit donc produire une force de poussée au moins égale aux forces de résistance.

2.4.2 Aspects physiologiques

Comprendre la physiologie d'une espèce est important pour comprendre la nage et pour la lier aux caractéristiques du comportement spécifique. Ces aspects intrinsèques influencent très fortement certaines composantes dont la compréhension est cruciale pour évaluer l'aptitude d'une espèce à remonter une passe.

Flottabilité

Le facteur de coulée (f_C , [-]) d'un animal aquatique est défini comme suit (Lowndes, 1942).

$$f_C = 1000 \times \frac{\rho_{\text{poisson}}}{\rho_{\text{eau du milieu}}} \quad (2.4.1)$$

où ρ_{poisson} est la densité du poisson considéré [-] et $\rho_{\text{eau du milieu}}$ est la densité de l'eau du milieu où vit le poisson considéré [-].

L'équation 2.4.1. peut être interprétée comme suit :

- Si $f_C < 1000$, alors le poisson tend à remonter et à flotter (flottabilité positive).
- Si $f_C > 1000$, alors le poisson tend à couler (flottabilité négative).
- Si $f_C = 1000$, alors le poisson tend à se stabiliser dans la colonne d'eau (flottabilité neutre).

En conclusion, le facteur de coulée rend compte de la capacité du poisson à se maintenir dans la colonne d'eau sans intervention d'une portance créée par la présence de nageoires.

Par conséquent, en raison de leur densité généralement plus élevée que l'eau, la plupart des poissons osseux devraient couler ($[1030 < f_C < 1090]$), sauf en cas de maintien de vitesses très élevées qui ne sont permises que par une musculature très développée (par exemple pour les

thons) et qui permettent alors de générer une force de portance suffisante. Ce type de poissons n'existe guère dans le bassin versant de la Meuse.

Pour des masses plus réduites et des vitesses de nage plus lentes, l'intérêt énergétique des organes de flottaison a été démontré (Peldster, 1997). Ces derniers peuvent exister sous différentes formes chez les poissons mais la plupart des poissons de Wallonie possèdent une vessie natatoire. Seuls les lamproies, les gobies et les chabots n'en ont pas dans ces régions (Blanchart, 1866). Cet organe a pour but de remplacer une part du volume du poisson par du gaz afin d'en diminuer considérablement sa densité totale (Khapoor & Bhavna Khanna, 2004) et donc de diminuer le facteur de coulée du poisson dans une gamme de valeurs comprises entre 990 et 1010 selon la densité d'eau qui est spécifique à l'habitat du poisson (Alexander, 1966). La vessie natatoire affecte plusieurs aspects dans la dynamique du mouvement du poisson dans l'eau :

- La vessie natatoire permet la stabilisation immobile à une profondeur donnée dans la colonne d'eau sans autres coûts énergétiques que ceux demandés pour maintenir la pression gazeuse dans la vessie.
- Cet organe permet de réduire considérablement les coûts de nage horizontale contrairement aux poissons ayant une flottabilité négative et nécessitant alors un effort de nage à composante partielle verticale (Alexander, 1966).

A contrario, les poissons osseux, chez qui la vessie natatoire a disparu ou a été réduite significativement, montrent généralement une stratégie de vie benthique. Dans les forts courants, les forces de friction induites permettent alors de maintenir efficacement en position un poisson à flottabilité négative. Cette solution s'avère alors énergétiquement plus économique que dans le cas d'un poisson devant nager perpétuellement pour maintenir une position sur le repère horizontal qu'est le fond (Alexander, 1965).

Chez les poissons mosans possédant une vessie natatoire, il existe différents types de vessies natatoires selon la famille. Par exemple, les cyprinidés, les salmonidés et les ésocidés (regroupés sous le nom des Physostomes) ont cet organe relié au tube digestif par un canal pneumatique. Les percidés voient quant à eux ce canal pneumatique disparaître après leur état larvaire (Blanchard, 1866).

Par ailleurs, aucune étude sur l'influence du type de vessie natatoire sur la capacité de nage n'a été réalisée à ce jour. Cette dernière possède néanmoins une influence non négligeable sur l'orientation corporelle des poissons (Alexander, 1966). En effet, la position de la vessie natatoire définit l'emplacement du centre de gravité de l'animal. Par conséquent, la position et l'agencement de la vessie natatoire influencent tous deux la cinématique de mouvement du poisson.

Musculature

La musculature d'un poisson représente 50 à 70 % du poids d'un poisson (Guillaume & al., 1999) et se décompose en deux types de muscles.

Premièrement, les muscles rouges sont des organes de contraction lente nécessitant des condi-

tions aérobies. Ces derniers sont donc sollicités durant des exercices de nage à long terme comme l'**activité de croisière**. Grâce à l'oxydation complète du glycogène et des lipides présents en forte teneur dans les muscles rouges, l'activité de croisière peut alors être maintenue durant une durée indéterminée. La contraction des muscles rouges nécessite donc un apport en oxygène obligatoire et renouvelé pour alimenter la chaîne respiratoire. Ces muscles sont fortement vascularisés, ce qui leur donne cette couleur.

Deuxièmement, les muscles blancs sont des organes spécialisés dans la contraction anaérobie et rapide grâce à la décomposition du glycogène musculaire en acide lactique (Bone, 1966). Ces muscles sont plutôt sollicités pour une **activité de sprint**, limitante en oxygène et s'étalant sur une vingtaine de secondes (Katopodis & Gervais, 2011). L'apparition de signes de fatigue est due à l'épuisement du glycogène dans les muscles et à l'accumulation de l'acide lactique produit par la décomposition anaérobie du glycogène. Remarquons que les muscles rouges ne représentent qu'une faible proportion de la musculature totale d'un point de vue pondéral. En effet, la majorité des muscles sont blancs.

Remarquons la présence de muscles roses comme chez la carpe (*Cyprinus carpio*) (Johnston, 2001). Ce type musculaire est considéré comme l'intermédiaire des muscles rouges et blancs (Lucas & Baras, 2001).

Par ailleurs, notons que le stade intermédiaire entre l'activité de sprint et l'activité de croisière est l'**activité soutenue**. Cette dernière fait intervenir les deux types de muscles précédemment cités. Katopodis et Gervais (2011) la définissent comme ne pouvant être maintenue plus de 30 minutes.

Parallèlement à ces concepts d'activités de nage, au plus la stratégie du poisson se concentre sur une nage perpétuelle et rapide, au plus la proportion des muscles rouges augmente (Lucas & Baras, 2001). Ce phénomène est remarqué pour les poissons pélagiques qui nécessitent une capacité de nage de croisière importante (Johnston, 1981). Pour des individus benthiques, et surtout pour les prédateurs de fond, une proportion plus importante de muscles blancs est alors logiquement observée (Johnston, 1981). Ainsi, au sein même d'un habitat, selon les stratégies comportementales adoptées, les espèces de poissons peuvent posséder différentes compositions musculaires. Par exemple, les salmonidés possèdent généralement 15 à 20 % de muscles rouges (Lucas & Baras, 2001) et adoptent une stratégie de nage endurante et perpétuelle (Groot, 2010). Les cottidés et les esocidés en possèdent seulement 3 à 5 % (Lucas & Baras, 2001) car visant une stratégie caractérisée par des accélérations ponctuelles (Groot, 2010).

En conclusion, la proportion en muscles blancs et rouges indique la capacité d'endurance et la puissance développée selon les trois types de nage (de croisière, de sprint ou soutenue). La prise en compte de l'état des réserves en substrats énergétiques (lipides neutres, glycogène) ainsi que la concentration en mitochondries dans les muscles rouges permet d'améliorer la justesse de l'estimation des capacités de nage.

2.4.3 Aspects morphologiques

Approche hydrodynamique

Il existe une grande variabilité du potentiel hydrodynamique des espèces. La morphologie du corps génère la traînée induite qui a tendance à ralentir un poisson en progression contre des lignes de courant ou à rendre plus difficile son maintien en une position donnée de la colonne d'eau.

Sagnes & Statzner (2009) ont démontré la présence de différences hydrodynamiques importantes entre les individus benthiques et pélagiques résultant de différences morphologiques. De même, une différence entre les profils hydrodynamiques d'espèces pélagiques est partiellement expliquée par l'habitat préférentiel des poissons. Par exemple, un habitat lotique³ est généralement préféré par des individus possédant un profil plus hydrodynamique que celui des espèces adaptées à des conditions lenticues.

Néanmoins, le profil hydrodynamique d'un poisson ne donne aucune information concernant la puissance de nage et ne peut donc être un indicateur performant de l'aptitude du poisson à remonter des lignes de courant à une vitesse donnée. Il peut cependant être considéré comme un indicateur secondaire.

Cependant, l'hydrodynamisme est un excellent exemple de la complexité de prédiction induite par la variabilité qui peut exister au sein des espèces de poissons.

Dimensions spécifiques

Il est nécessaire de bien comprendre que la taille des poissons est une composante importante dans la détermination de la capacité de nage. Au plus le poisson est grand, au plus il pourra atteindre des vitesses de sprint élevées et aura une endurance à une vitesse donnée plus importante comparativement à des poissons plus petits de la même espèce.

Bien qu'un poisson plus grand génère des forces de ralentissement plus importantes dans les lignes de courant, ses capacités de nage sont accrues pour plusieurs raisons :

- Le temps de contraction des cellules musculaires est diminué avec la taille (Zhou, 1982) ce qui augmente la vitesse maximale par l'augmentation de la fréquence maximale d'ondulation corporelle.
- La puissance musculaire dégagée est plus importante que chez un poisson de petite taille, ce qui augmente la vitesse maximale.
- Le coût énergétique de la nage par unité de masse diminue avec l'augmentation de la masse (indirectement la taille), car le volume d'un poisson augmente plus que la surface de contact qui induit la traînée dans les lignes de courant (Ohlberger et al., 2006). Cela augmente donc l'endurance du poisson.

La faune aquatique wallonne possède une large gamme de tailles selon les espèces et leur stade

3. Habitat à courant rapide, profondeur faible à moyenne, substrat constitué de matériaux grossiers (blocs, cailloux) (Philippart, 2007).

de développement. Par exemple, en Meuse, l'épinoche (*Gasterosteus aculeatus*) atteint communément une taille de 6 cm (FishBase, 2010) tandis que la perche (*Perca fluviatilis*) atteint communément une taille de 25 cm (FishBase, 2010) voire 50 cm pour de grands adultes (Rollin, 2017, comm. pers.). Cette diversité complexifie fortement l'appréhension des capacités spécifiques de nage car celles-ci sont fortement dépendantes de la taille, comme expliqué ci-dessus.

Le poids d'une espèce (P , [g]) peut être lié à la taille (L , [cm]) par plusieurs relations empiriques existantes. Dans ce document, nous utiliserons la relation ci-dessous.

$$P = a \times L^n \quad (2.4.2)$$

où a est un coefficient dépendant de sa densité et des proportions du poisson (Freon, n.d.) et n est un facteur rendant compte des variations de densité et de l'allométrie (Freon, n.d.).

Il y a allométrie si la croissance pondérale du poisson est plus ($n > 3$) ou moins ($n < 3$) proportionnelle au cube de sa croissance en longueur. Si ces deux croissances sont parallèles, il y a isométrie ($n = 3$) (Freon, n.d.).

En conséquence, les paramètres définis sont propres à chaque espèce et à chaque individu pour une même espèce. Ceux-ci sont déterminés par une régression linéaire ($\log P = \log a + n \cdot \log L$) réalisée sur un échantillon représentatif de mesures de poids et de taille.

Néanmoins, en plus de la diversité spécifique, la diversité de tailles au sein même d'une population spécifique est à prendre en compte. Celle-ci est directement dépendante de l'âge du poisson qui influence directement son comportement et ses migrations. En outre, remarquons qu'il existe une certaine variabilité saisonnière au niveau des fréquences de taille des populations spécifiques (Prchalova & Slavik, 2006). Cette variabilité est expliquée par le recrutement annuel des individus juvéniles.

Pour caractériser ce facteur, il est nécessaire de connaître l'âge d'un poisson. Dans le cas de poissons sauvages, il est nécessaire d'utiliser la méthode suivante.

Un groupe d'âge correspond au nombre d'années calendaires après la naissance tandis qu'une classe d'âge correspond au nombre d'années depuis la naissance (Panfili et al., 2002). Le tableau 2.1 résume le fonctionnement de la définition de ces deux concepts pour les deux premières années de vie d'un individu.

TABLE 2.1 – Tableau exemplatif de la définition de la classe d'âge et du groupe d'âge

Individus âgés de	Classe d'âge	Groupe d'âge
0 à 12 mois	I	0+
12 à 24 mois	II	1+

En ayant préalablement délimité les classes de taille, il est possible de déduire approximati-

vement l'âge d'un individu sauvage sur base de sa taille. Notons que cette délimitation doit prendre en compte la variabilité des tailles tout au long de l'année pour une seule classe d'âge, ainsi qu'un possible dimorphisme sexuel.

2.4.4 La dynamique de nage

Cinématique de nage

Avant tout, les types de nage des poissons peuvent être divisés en deux catégories (Sfakiotakis et al., 1999).

Premièrement, la nage peut être réalisée uniquement par une nageoire (pectorale ou médiane) ou une paire de nageoires. Deuxièmement, la nage peut être réalisée à l'aide de l'ondulation de la nageoire caudale et/ou de l'ondulation du corps.

Seul ce dernier mécanisme sera considéré dans cette section, car les autres mécanismes n'interviennent pas ou très peu dans la faune mosane. Notons que cette nage est ondulatoire étant donné la création d'une onde sur la portion corporelle mouvante du poisson. Cette même catégorie peut elle-même être divisée en quatre sous-catégories présentées à la figure 2.3.

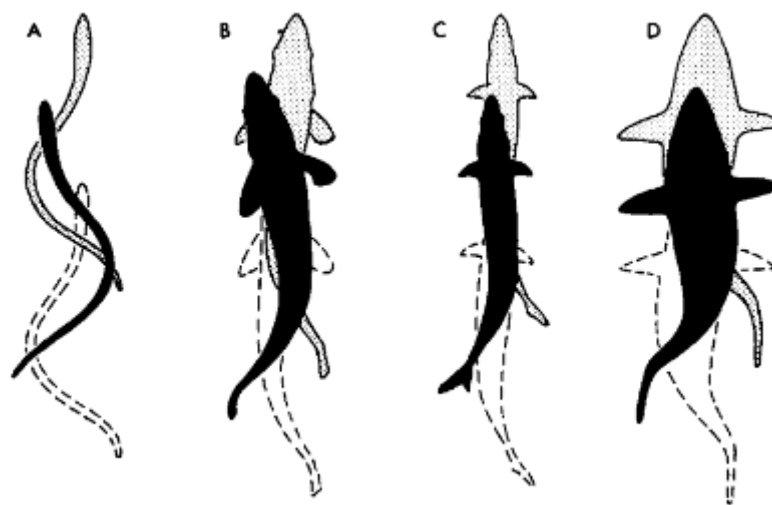


FIGURE 2.3 – Figure présentant les quatre types de nage ondulatoire chez les poissons (Lindsey, 1978) (A. nage anguilliforme, B. nage subcarangiforme, C. nage carangiforme, D. nage thunniforme)

La nage A est la nage anguilliforme. Avec cette dernière, la majorité ou l'entièreté du corps participe à la création de l'onde (ex. l'anguille). Ce type de nage serait le moins performant. La traînée est en effet maximisée à cause de l'ondulation qui possède alors une amplitude constante sur l'entièreté du corps du poisson. Il a été montré que la nage anguilliforme est moins endurante que pour les autres types de nage (Katopodis & Gervais, 1991), mais que les performances de sprint sont semblables.

La nage B est la nage subcarangiforme. Comme la nage anguilliforme, celle-ci fait intervenir l'entièreté du corps dans la création de l'onde corporelle. Néanmoins, l'amplitude de l'ondula-

tion n'est pas aussi importante à la partie antérieure qu'à la partie postérieure du poisson (ex. la truite). Notons que l'amplitude de l'onde ne varie pas selon la vitesse de nage du poisson (excepté à des vitesses très faibles) (Lindsey, 1978).

La nage C est la nage carangiforme. Dans ce cas, seule la partie postérieure intervient dans la création de l'ondulation corporelle. Cette dernière n'intervient que sur le dernier tiers postérieur du corps du poisson.

Finalement, la nage D est la nage thunniforme (ex. le thon). Celle-ci est réalisée par le battement d'une nageoire caudale puissante et rigide.

Vitesse de nage et endurance

Pour rappel, il existe trois catégories d'activité de nage. Leurs caractéristiques sont synthétisées dans le tableau 2.2.

TABLE 2.2 – Synthèse des temps d'endurance et du type musculaire sollicité pour chaque activité de nage selon Katopodis et Gervais (2012)

Activité de nage	Temps d'endurance avant les signes de fatigue	Type de muscles sollicités
Activité de sprint	<20 secondes	Blanc
Activité soutenue	20 secondes à 30 minutes	Mixte
Activité de croisière	Indéfiniment	Rouge

Sur base de cette théorie, il est possible de mettre en évidence différentes vitesses couramment utilisées dans la littérature (Lucas & Baras, 2001).

- La **vitesse maximale** ou absolue (U_{max}) rend compte de la vitesse maximale que peut atteindre un poisson durant l'activité de sprint. Les vitesses de courant dans la passe ne peuvent la dépasser sinon cette dernière sera un obstacle pour le poisson. Le temps d'endurance est le plus faible (<20 secondes).
- La **vitesse maximale soutenue** (U_{ms}) représente la vitesse à partir de laquelle l'endurance est réduite à moins d'une minute.
- La **vitesse maximale de croisière** (U_{mc}) est la vitesse maximale pour laquelle un poisson peut maintenir une activité de croisière. Celle-ci peut être interprétée comme la vitesse à laquelle l'entièreté des muscles rouges sont sollicités pour la nage (Randall & Brauner, 1991). Par conséquent, si la vitesse de nage dépasse la vitesse maximale de croisière, les muscles blancs sont sollicités, mais ils ne permettent pas une nage sans une fatigue à court terme. En résumé, la vitesse critique fait la transition entre l'activité de croisière et l'activité soutenue. Dans une passe, il est nécessaire que les vitesses de courant ne la dépassent pas partout dans un bassin. Sinon, le poisson doit maintenir une activité de nage soutenue et, si le temps mis pour remonter la passe dépasse son temps d'endurance en activité soutenue, il ne peut remonter la passe. En outre, ne pas dépasser cette vitesse critique en certaines zones est primordial pour créer des endroits où le poisson pourra retrouver ses capacités en convertissant l'acide lactique accumulé

dans ses muscles blancs après une activité de nage au minimum soutenue.

- La **vitesse optimale** (U_{opt}) est la vitesse pour laquelle le coût énergétique de déplacement est le plus faible.

Classiquement, ces vitesses sont mesurées en laboratoire grâce à un tunnel de nage. Les vitesses sont généralement présentées en BL/s (BL = body length). Cela permet de standardiser les valeurs de vitesse qui peuvent alors être comparables entre chaque expérimentation.

Remarquons l'existence de la **vitesse critique** (U_{crit}) à partir de laquelle un poisson montre des signes de fatigue après une augmentation progressive de la vitesse du courant grâce aux conditions hydrauliques maîtrisées grâce à un dispositif expérimental appelé « tunnel de nage ». Cette vitesse ne porte pas beaucoup d'informations physiologiques, mais est largement utilisée dans la littérature (Lucas & Baras, 2001).

2.4.5 Influence de facteurs externes

Un poisson est un organisme vivant très sensible au milieu environnant qui influence tant son métabolisme que son comportement. Il existe donc une multitude de facteurs externes influençant considérablement la capacité de nage du poisson.

Comme démontré précédemment, ces vitesses dépendent de caractéristiques inhérentes au poisson comme sa musculature, la quantité de substrat nécessaire à la respiration, sa taille, sa morphologie, la présence d'une vessie natatoire, la cinématique de nage et bien d'autres comme les caractéristiques des nageoires, etc. Étant donné ce grand nombre de facteurs d'influence et la diversité des espèces piscicoles, la nage est un phénomène complexe qui est difficile à prédire et à théoriser.

En outre, la capacité de nage dépend de nombreux autres paramètres tels que ceux ayant trait au milieu environnant. Les principaux facteurs sont expliqués ci-dessous.

La température

Un poisson est un animal poïkilotherme, c'est-à-dire que la température de son corps s'équilibre avec la température de son milieu. Les observations expérimentales montrent que si la température du milieu baisse, la contractilité du muscle est diminuée. Il en résulte une baisse de la puissance dégagée par les muscles (Randall & Brauner, 1991). Cela implique donc que si la température diminue, la vitesse maximale diminue aussi (Johnston & Ball, 1996).

Pour la vitesse maximale soutenue, l'effet est explicable par le fait que la puissance totale des muscles rouges diminue avec la température. Cependant, une vitesse est atteinte selon une certaine puissance allouée. Par conséquent, le début de la sollicitation des muscles blancs se fera pour une vitesse plus faible, ce qui indique une diminution de l'endurance du poisson.

Différentes études ont montré que la courbe de la vitesse selon la température prend la forme d'une cloche (Taylor et al., 1996, Johnston & Ball, 1996) avec une température optimisant la vitesse comme le montre la figure 2.4.

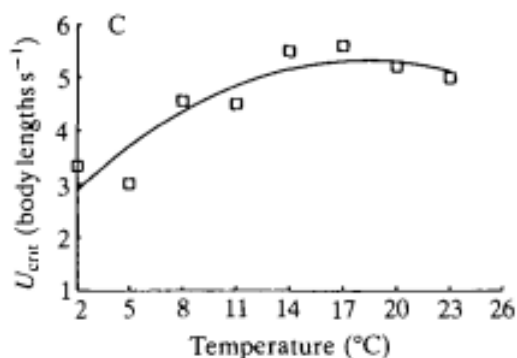


FIGURE 2.4 – Graphique présentant les données expérimentales de vitesses critiques en relation avec la température et permettant de visualiser l'existence d'une température maximisant la nage d'un poisson (Randall & Brauner, 1991)

L'oxygène dissous

L'impact de l'oxygène sur les performances de nage est surtout étudié en quantifiant sa consommation. Logiquement, au plus vite le poisson nage, au plus d'oxygène est consommé, car la réaction de respiration est amplifiée avant la sollicitation des muscles blancs.

Néanmoins, le caractère limitant de l'oxygène dissous dans l'eau est très difficile à appréhender car dépendant de nombreux facteurs physiologiques et métaboliques comme, entre autres, l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène, la capacité de diffusion de l'oxygène dans les tissus ainsi que de nombreux facteurs extérieurs comme la température. Remarquons qu'en conditions d'hypoxie, la vitesse maximale soutenue des truites est considérablement réduite (Bushnell et al., 1984). En considérant la diversité des habitats mosans, Philippart (1989) a déterminé la valeur minimale des concentrations optimales en oxygène à 9,2 mg/L.

Nature de l'écoulement

Les écoulements laminaires sont absents des passes à poissons. Cela n'empêche, l'impact de la turbulence sur la nage du poisson est encore peu documenté et pris en compte.

Certaines études semblent montrer une consommation en oxygène et une fréquence de battement de la nageoire caudale plus importante en écoulement turbulent (Liao & Cotel, 2013). Un écoulement turbulent provoque la déstabilisation du corps du poisson (Tritico & Cotel, 2010) et la présence de courants locaux plus rapides l'obligeant à « slalomer ». Cela semble indiquer une perte d'efficacité nette par rapport à une trajectoire normalement rectiligne et stable réalisée en écoulement laminaire (Liao, 2007).

Cependant, en écoulement turbulent, Liao (2007) souligne aussi la présence d'effets positifs permettant de réduire la consommation d'énergie allouée à la nage observée (Taguchi & Liao, 2011). Par exemple, le poisson peut exploiter l'énergie des tourbillons pour la transformer en

une poussée passive. Pour ce faire, les ondulations corporelles du poisson seront utilisées, non plus pour générer une poussée comme en écoulement laminaire, mais pour orienter son corps de manière à transformer passivement en force de poussée une force de recirculation générée par un tourbillon (Figure 2.5). Il en résulterait un gain net d'énergie qui se traduit par une endurance plus élevée qu'en écoulement laminaire. Cela vient alors contredire certaines théories affirmant que le poisson posséderait une endurance plus faible en écoulement turbulent.



FIGURE 2.5 – Effet de la formation de tourbillons dans un écoulement turbulent sur l'efficacité de nage d'un poisson (Liao, 2007)

La réponse semble varier selon les capacités spécifiques à se stabiliser et à profiter de tourbillons créés en conditions d'écoulement turbulent. En outre, l'intensité de la turbulence et la présence d'obstacles perturbant l'écoulement peuvent influencer considérablement l'efficacité de la nage. Néanmoins, il semble difficile de quantifier l'effet de ces différents facteurs sur la quantité d'énergie allouée à la nage en s'aidant uniquement de la littérature à ce sujet.

Finalement, rester en banc diminuerait aussi l'effort de nage de par la création de tourbillons par le mouvement des premiers poissons faisant face au courant, au profit des poissons légèrement en arrière (Liao, 2007). La figure 2.6 illustre cet effet de « peloton », bien connu dans les sports de course.

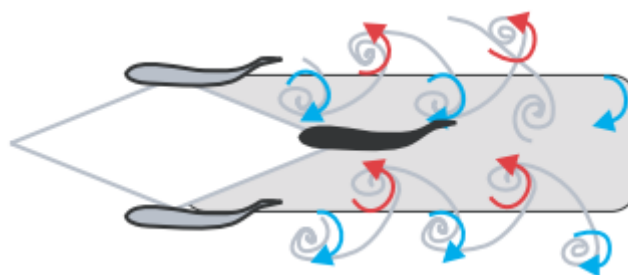


FIGURE 2.6 – Effet de la création de tourbillons causés par un banc sur l'efficacité de nage d'un poisson (Liao, 2007)

Ce phénomène devrait résulter en une augmentation globale de l'endurance pour une vitesse donnée. Cependant, nous ne possédons pas des informations nécessaires pour déterminer l'influence de la nage en banc sur l'économie d'énergie d'un individu.

2.4.6 Conclusion

Les capacités de nage sont très difficiles à appréhender car elles sont influencées par de nombreuses composantes inhérentes au poisson considéré et au milieu environnant. Ces dernières sont listées ci-dessous :

- La cinématique de nage
- La disposition des nageoires, leur forme (l'influence des nageoires n'est pas abordée dans ce document) (Sfakiotakis et al., 1999)
- La taille
- La proportion de muscles blancs et rouges
- Les réserves énergétiques disponibles dans les muscles
- La morphologie, qui influence la trainée par exemple
- L'anatomie, comme la présence ou non d'une vessie natatoire
- Des facteurs physico-chimiques de l'eau du milieu
- Des facteurs liés à l'écoulement dans le milieu
- Des facteurs comportementaux

Étant donné ces nombreux facteurs, il semble nécessaire de prédire la capacité de nage spécifique en ayant recours à des modèles. Dans le cadre de l'élaboration de modèles de prédiction, la généralisation de modèles déterminés à partir de données empiriques paraît la plus pertinente.

2.5 Détermination des capacités de nage

Pour déterminer la capacité d'un poisson à franchir une passe, il est nécessaire de calculer les vitesses maximale et maximale de croisière spécifiques. Classiquement, ces données sont généralement calculées pour une certaine espèce grâce à un tunnel de nage.

Néanmoins, il n'existe pas toujours de données expérimentales permettant de déterminer ces vitesses.

Par conséquent, extrapoler les résultats déterminés pour d'autres espèces est nécessaire. De nombreux modèles permettant de réaliser cela avec plus ou moins d'incertitude existent.

Nous allons en présenter quelques-uns et les comparer. Ils seront utiles pour avoir une idée des vitesses des espèces présentées dans la suite de cette section.

2.5.1 Modèle de Wardle-Zhou

La vitesse d'un poisson (V , [m/s]) est considérée comme la distance parcourue pour une fréquence unitaire du battement corporel de nage du poisson :

$$V = A \times f \quad (2.5.1)$$

où A est la distance parcourue par le poisson [m] et f est la fréquence d'ondulation corporelle qui correspond à une impulsion donnée par le poisson [s^{-1}].

Wardle (1975) a observé que la distance parcourue représentait en moyenne 0,7 fois sa longueur pour chaque battement ($[0,5 : 1]$ BL (body length)⁴). Cette tendance moyenne a été confirmée par Videler en 1993. En considérant alors que la vitesse maximale est atteinte pour des contractions musculaires séparées d'un temps minimum, l'équation de la vitesse maximale peut être obtenue. Pour information, cette équation a été déterminée grâce à quelques saumons et à trois espèces marines dont une espèce benthique.

$$V = \frac{0,7.L}{2.t} \quad (2.5.2)$$

où L est la longueur totale du poisson [m] et t est le temps écoulé entre deux contractions [s].

Le temps minimal séparant deux contractions musculaires (t, [s]) a été modélisé par Zhou sous la forme d'une relation empirique (1982). Cette variable dépend de la température (T, [°C]) ainsi que de la longueur du poisson (L, [m]). Cette relation a été déterminée pour des poissons marins (maquereaux, morues, colins).

$$t = 0,17.L^{0,4288} + 0,0028.\ln(T) - 0,0425.L^{0,4288} \times \ln(T) - 0,0077 \quad (2.5.3)$$

Est obtenu alors, en combinant la formule de Wardle (équation 2.5.2) et celle de Zhou (équation 2.5.3), une expression de la vitesse maximale. Cette expression dépend finalement de la longueur du poisson et de la température du milieu. La relation est dessinée sur la figure 2.7 en considérant des températures réalistes retrouvées en Meuse.

Les vitesses présentées dans la figure 2.7 sont celles des vitesses maximales car c'est un intervalle de temps minimal entre deux contractions qui est considéré. Ces vitesses sont donc celles que l'écoulement dans la passe ne peut dépasser en aucun point. Le passage par l'échancrure d'une passe est l'endroit critique pour lequel le poisson devra fournir un effort maximum car les lignes de courant sont toutes concentrées en ce point et la vitesse y est maximale (Bagnée & De Greef, 2014).

Bien que Wardle ait utilisé des espèces marines, les courbes prédictives de ce graphe pourraient être appliquées aux poissons d'eau douce. Néanmoins, il n'est pas possible que la vitesse de nage augmente perpétuellement avec la température. Comme expliqué précédemment, il existe une température correspondant à une capacité optimale de nage pour chaque espèce. Tudorache et al. (2008) ont montré expérimentalement avec des truites (*Salmo trutta fario*) que la vitesse de nage maximale atteint un plafond (15 °C pour la truite) avant de redescendre. La température induisant la plus grande vitesse varie selon les températures de l'habitat naturel de l'espèce. Par conséquent, ce modèle doit être considéré dans des gammes de température cohérentes avec

4. Un body length par seconde est une unité rapportant la vitesse d'un poisson à sa longueur. Par exemple, un poisson de 0,5 m nageant à 1 m/s, possède une vitesse de 2 BL/s.

Vitesse maximale d'un poisson selon la température ambiante et sa taille déterminée à partir de la formule de Wardle-Zhou

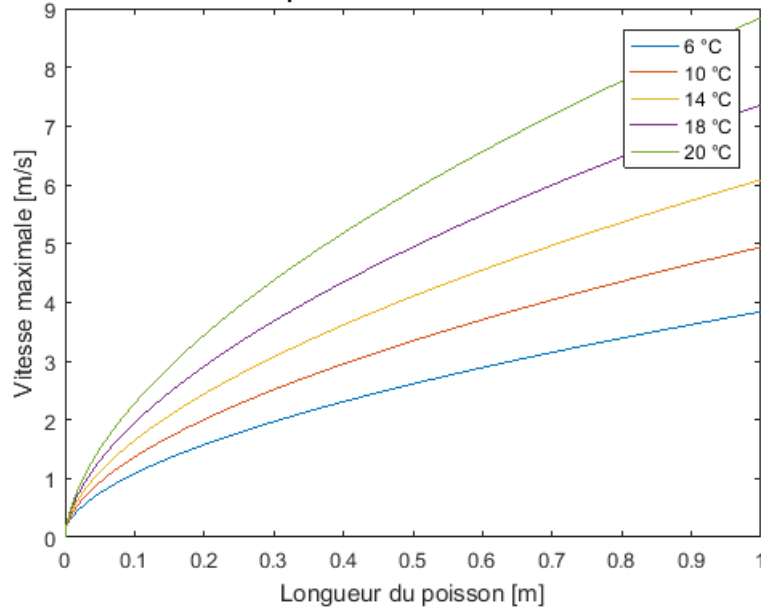


FIGURE 2.7 – Graphique mettant en relation la vitesse maximale d'un poisson selon sa longueur et la température du milieu selon l'équation de Wardle-Zhou

l'habitat du poisson.

La vitesse maximale nous donne un repère pour une vitesse de courant à ne pas dépasser dans la passe. Cependant, il n'est pas possible qu'un poisson remonte une passe à cette vitesse. Il est donc nécessaire d'introduire une certaine notion d'endurance. Par conséquent, la composante musculaire doit intervenir dans les modèles.

Le temps maximal d'endurance (t_{me} , [s]) peut être déterminé en divisant la quantité totale d'énergie contenue dans les muscles du poisson (E , [J]) par la puissance qui sera fournie par son muscle blanc. Cette dernière est en fait la différence entre la puissance totale fournie (P_C , [W]) et la puissance des muscles rouges (P_R , [W]).

$$t_{me} = \frac{E}{(P_C - P_R)} \quad (2.5.4)$$

Déterminer les composantes permettant de calculer le temps d'endurance t_{me} est donc nécessaire.

En considérant la loi de Shearer (Beach, 1984), le lien mathématique entre la taille et le poids d'un saumon est donné par l'équation 2.5.5.

$$M = 10,836.L^{2,964} \quad (2.5.5)$$

où M est la masse du poisson [kg] et L est la longueur du poisson [m].

En considérant une masse musculaire (majoritairement du muscle blanc) représentant 50 % de la masse totale, une concentration en glycogène considérée à 10 g/kg de muscle et une glycolyse anaérobie pouvant fournir 558 kJ/g de glycogène, une concentration énergétique de 2790 kJ/kg de poisson est obtenue. Notons que la masse musculaire peut atteindre 70 % chez certains poissons (Guillaume et al., 1999), que la concentration en glycogène peut descendre à 3 g/kg de muscle (Zhou, 1982) et que le rendement de la glycolyse est maximal. Les hypothèses faites sur certains facteurs semblent donc peu fiables.

Le potentiel énergétique total (E , [J]) pouvant être déployé par la musculature du poisson équivaut alors à :

$$E = 2790.10,836.L^{2,964} \quad (2.5.6)$$

La puissance nécessaire (P_C , [W]) pour atteindre une vitesse U dans l'eau est calculée par une relation empirique mise au point par Zhou (1982) pour des écoulements turbulents.

$$P_C = 0,9751 \times e^{-0,00533 \times T} \times U^{2,8} \times L^{-1,15} \quad (2.5.7)$$

où T est la température du muscle du poisson [°C] et U est la vitesse de nage du poisson [m/s].

La puissance développée par le muscle rouge (P_R , [W]) a été déterminée empiriquement par Brett (1965) pour des salmonidés.

$$P_R = 4,44.10,836.L^{2,964} \quad (2.5.8)$$

Dans le cas d'une passe à poissons, il est nécessaire de déterminer la vitesse à laquelle le temps d'endurance t_{me} peut être maintenu indéfiniment et ne faisant donc pas intervenir les muscles blancs. Cette vitesse est la vitesse maximale de croisière (U_{mc} , [m/s]).

Zhou (1982) a pu déterminer une équation empirique déterminant cette vitesse en écoulement turbulent.

$$U_{mc} = 1,0091 \times e^{0,009104.T} \times L^{0,4107} \times P_R^{0,3571} \quad (2.5.9)$$

Remarquons que cette équation a été calibrée sur base d'expérimentations majoritairement réalisées sur des salmonidés.

Par conséquent, il aurait été possible de prendre en compte plus de variabilité interspécifique sur plusieurs facteurs. Par exemple la loi liant la masse et la taille d'un poisson, la proportion des muscles rouges et le taux de réserve en glycogène peuvent être adaptés selon l'espèce considérée (Lucas & Baras, 2001). En outre, un rendement maximal sans effet physiologique négatif de la réaction de transformation en acide lactique du glycogène est considéré par hypothèse, ce qui diminue considérablement la justesse du modèle.

2.5.2 Modèles déterminés à partir des données expérimentales collectées par Katopodis et Gervais

Katopodis et Gervais (1991) ont mis au point un procédé permettant de compiler les données rapportées dans la littérature en leur donnant une cohérence malgré la grande variabilité inter-études observée. L'intérêt de leur méthode est qu'elle permet la comparaison des données expérimentales mondiales et la mise en évidence de certaines tendances par un développement mathématique excluant les variables expérimentales. Cette démarche permet la compilation des données et leur comparaison. L'intérêt est de pouvoir quantifier certains paramètres mathématiques qui seraient très pratiques à réutiliser dans un contexte plus général.

Avant tout, il est nécessaire de présenter le développement mathématique des variables utilisées par Katopodis et Gervais. L'intérêt de ces transformations est de rendre adimensionnelles les variables d'intérêt afin de pouvoir rendre comparables les données compilées.

Comme mentionné précédemment, la vitesse d'un poisson (U , m/s) peut être standardisée en $[BL/s]$ selon la longueur (L , [m]) du poisson. Cette grandeur reste cependant dimensionnelle et la vitesse adimensionnelle (U_* ou F_f sur la figure 2.8) peut alors être déterminée comme suit :

$$U_* = \frac{U}{\sqrt{g \times L}} \quad (2.5.10)$$

où g est l'accélération gravitaire ($9,81 \text{ m/s}^2$).

De même, le temps d'endurance (t) peut être rendu adimensionnel (t_*) grâce à la manipulation suivante :

$$t_* = t \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (2.5.11)$$

Ces deux variables rendues adimensionnelles, il est possible de tracer les courbes d'endurance du poisson comme le montre la figure 2.8.

Le temps d'endurance adimensionnel considéré ici correspond à un intervalle de temps entre 1 seconde et 30 minutes parallèlement à la définition des différentes activités de nage. De plus, les données collectées ont été mesurées avec des poissons d'eau douce nord-américains d'au moins 38 mm jusqu'à 60 cm, ce qui permet d'affirmer que les données présentées sont assez générales. D'autre part, le type de nage montre bien une influence sur l'endurance. Les poissons ayant une nage subcarangiforme possèdent une endurance en conditions de nage soutenue plus importante par rapport aux anguilliformes (Katopodis & Gervais, 1991).

En inversant le développement permettant de supprimer les dimensions des variables expérimentales et en appliquant ce procédé mathématique sur les régressions déterminées par Katopodis et Gervais (1991) (Figure 2.8), il est possible de réinjecter les unités nécessaires à l'utilisation de ce modèle dans notre cas d'étude. Grâce à cette manipulation, déterminer la

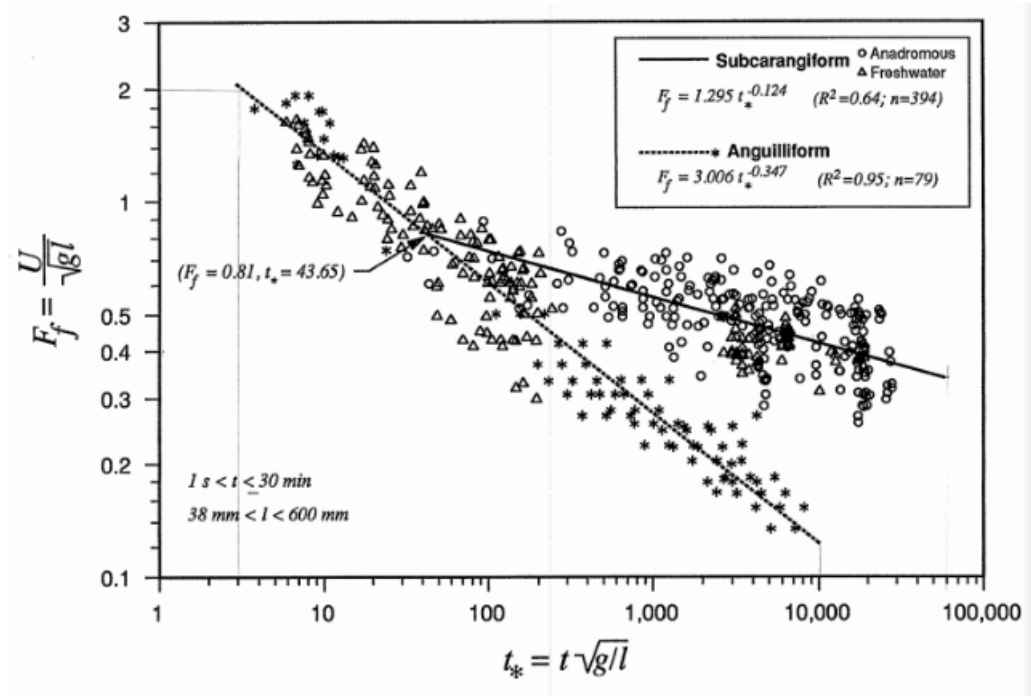


FIGURE 2.8 – Graphique compilant les vitesses adimensionnelles expérimentales collectées selon leur temps adimensionnel et présentant les régressions associées pour les nages anguilliforme et subcarangiforme (Katopodis & Gervais, 1991)

vitesse maximale et maximale de croisière pour un poisson d'une taille donnée devient possible.

Premièrement, pour la nage maximale, l'équation de la droite pour un poisson réalisant une nage subcarangiforme est :

$$U_* = 3,006.t_*^{-0,347} \quad (2.5.12)$$

Cette régression a été réalisée sur la partie du graphe correspondant à des temps d'endurance relatifs à des activités de nage de sprint. En injectant cette expression dans l'équation 2.5.2, est obtenu :

$$U = 3,006.t_*^{-0,347}\sqrt{g \times L} \quad (2.5.13)$$

Ensuite, en injectant l'équation 1.5.11 déterminant le temps d'endurance adimensionnel, est obtenue l'équation finale de la vitesse du poisson :

$$U = 3,006. \left(t\sqrt{\frac{g}{L}} \right)^{-0,347} \sqrt{g \times L} \quad (2.5.14)$$

$$U = 3,006.t^{-0,347} \times g^{0,3265} \times L^{0,6735}$$

En considérant un temps d'endurance d'une seconde et g à $9,81 \text{ m/s}^2$, il est possible de déterminer l'expression de la vitesse maximale du poisson selon sa longueur :

$$U_{max} = 6,3353.L^{0,6735} \quad (2.5.15)$$

Deuxièmement, dans le but de déterminer la vitesse maximale de nage de croisière, l'équation de la droite pour un poisson réalisant une nage subcarangiforme est :

$$U_* = 1,295.t_*^{-0,124} \quad (2.5.16)$$

Cette régression a été réalisée sur la partie du graphe 2.8 correspondant à des temps d'endurance relatifs à des activités de nage soutenue. En injectant cette expression dans l'équation 1.5.10, est obtenu :

$$U = 1,295.t_*^{-0,124} \times \sqrt{g \times L} \quad (2.5.17)$$

Ensuite, en injectant l'équation 1.5.11 déterminant le temps d'endurance adimensionnel, est obtenue l'équation finale de la vitesse du poisson :

$$U = 1,295. \left(t \sqrt{\frac{g}{L}} \right)^{-0,124} \sqrt{g \times L} \quad (2.5.18)$$

$$U = 1,295.t^{-0,124} \times g^{0,438} \times L^{0,562}$$

En considérant un temps d'endurance de trente minutes (1800 secondes), il est possible de déterminer la vitesse maximale de croisière du poisson selon sa longueur :

$$U_{mc} = 1,3898.L^{0,562} \quad (2.5.19)$$

Les deux courbes empiriques déterminant les vitesses maximale et maximale de croisière selon les équations 2.5.15 et 2.5.19 sont représentées sur la figure 2.9.

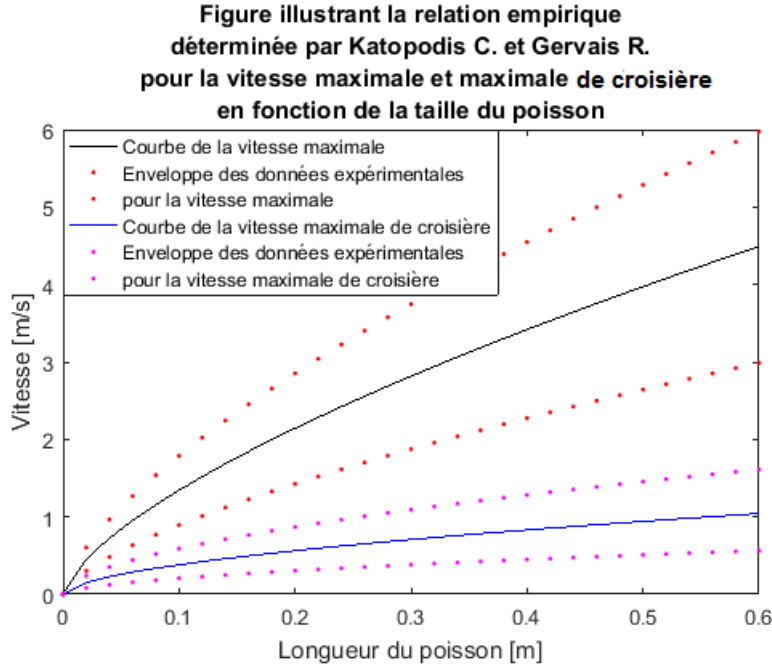


FIGURE 2.9 – Courbes définies selon les données collectées par Katopodis et Gervais (1991) déterminant la vitesse maximale et la vitesse maximale de croisière selon la longueur du poisson

Sur la figure 2.9, les courbes simulées semblent cohérentes car la vitesse maximale de croisière ne dépasse jamais la vitesse maximale. Pour comprendre l'évolution de ces courbes (Figure 2.9), l'interprétation sera basée sur l'évolution des différents types musculaires et des réserves énergétiques.

De plus, la différence entre les deux vitesses est très faible pour de petites tailles et croît avec la longueur. Cet effet de la longueur pourrait être lié à une croissance allométrique positive ($n > 3$) des muscles blancs avec la longueur. Parallèlement à ce constat, l'augmentation de la vitesse maximale de croisière par unité de masse tend à diminuer avec l'accroissement de la longueur. Cela pourrait s'expliquer par un développement des muscles rouges induisant une augmentation marginale de l'endurance, de moins en moins importante avec le développement. De même, la constitution des réserves énergétiques au cours du développement pourrait ne plus avoir une augmentation marginale aussi conséquente sur l'endurance que dans le cas de poissons de petite taille.

Remarquons que ces relations empiriques ont été obtenues à des températures qui n'altèrent pas les vitesses de nage des poissons. En outre, ce modèle ne permet pas de discerner l'effet de la température.

Les intervalles tracés permettent aussi de dire que les courbes doivent être considérées comme des courbes moyennes. Dans le cas de la prise en compte de la dimension multispécifique dans les passes à poissons, il faut considérer l'entière de l'intervalle délimité par les enveloppes.

2.5.3 Comparaison des deux modèles

Cette section compare les deux modèles développés ci-dessus. Le modèle Wardle-Zhou est basé sur des résultats physiologiques empiriques desquels dérive un développement mathématique rigoureux. Le modèle de Katopodis et Gervais, quant à lui, provient d'une compilation de données expérimentales empiriques où seules les activités de nage sont mesurées. Aucune donnée physiologique n'a contribué à l'élaboration de ce modèle.

Pour la vitesse maximale, les courbes de la figure 2.10 ont été tracées à l'aide de l'équation du modèle de Wardle-Zhou (température de 8°C) et à l'aide de l'équation 2.5.15 pour la relation basée sur les données collectées en 1991 par Katopodis et Gervais.

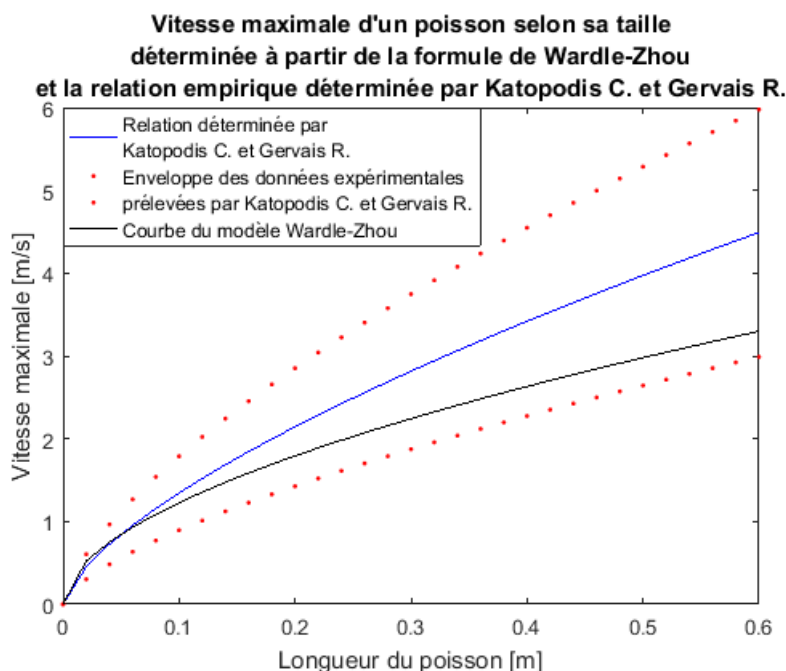


FIGURE 2.10 – Comparaison des courbes liant la vitesse maximale et la longueur du poisson selon le modèle Wardle-Zhou et selon la relation définie grâce aux données collectées par Katopodis et Gervais (1991)

L'allure générale des deux courbes semble être la même. Au plus la longueur du poisson augmente, au plus l'écart entre les deux courbes se fait ressentir.

De plus, il est en pratique plus difficile de mesurer les vitesses maximales de nage pour des poissons de grande taille que pour des poissons de petite taille. La variabilité augmente donc bel et bien avec la taille. Cela est montré par l'augmentation des écarts des intervalles des données expérimentales avec la taille.

Bien que le modèle de Wardle-Zhou semble acceptable à 8 °C, ce dernier est déterministe. Par conséquent, le modèle mis au point à partir des données de Katopodis et Gervais sera utilisé par la suite car les intervalles des données expérimentales permettent de considérer un intervalle de valeurs de vitesse et, par cela, de prendre en compte une certaine variabilité interspécifique.

Finalement, les modèles expérimentaux Katopodis-Gervais et Wolter-Arlinghaus présentés en annexe figure A.1 semblent assez bien correspondre. Ces deux études étant indépendantes l'une de l'autre, cela montre que les techniques actuelles permettent d'assez bien modéliser les vitesses maximales d'un poisson selon sa longueur.

Quant à la vitesse maximale de croisière, les courbes de la figure 2.11 ont été tracées à l'aide de l'équation 2.5.9 pour le modèle de Wardle-Zhou (température de 8°C) et à l'aide de l'équation 2.5.19 pour la relation de Katopodis-Gervais.

La comparaison des deux modèles tend à montrer une estimation des vitesses maximales de croisière plus grande pour le modèle de Wardle-Zhou pour des tailles supérieures à 0,3 m. Néanmoins, il est intéressant de comparer les allures des deux courbes avec celle déterminée expéri-

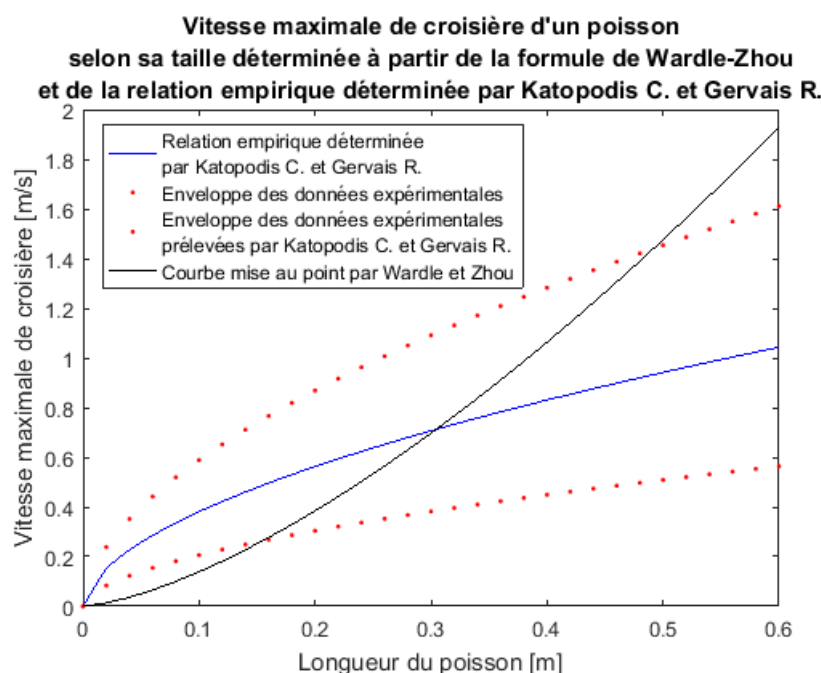


FIGURE 2.11 – Comparaison des courbes liant la vitesse maximale de croisière et la longueur du poisson selon le modèle Wardle-Zhou et selon la relation définie grâce aux données collectées par Katopodis et Gervais (1991)

mentalement par Wolter et Arlinghaus (2003) et présentée en annexe page 180, figure A.2. Le comportement de la courbe de Wardle-Zhou ne semble alors pas correspondre aux données de Katopodis et Gervais (1991) et de Wolter et Arlinghaus (2003). Certains mécanismes non pris en compte dans le développement mathématique du modèle pourraient expliquer cette différence. Pour les vitesses maximales de croisière, la relation empirique Wolter-Arlinghaus semble donner des vitesses plus élevées que celle de Katopodis-Gervais selon la figure A.2 en annexe page 180. Cependant, la relation de Wolter-Arlinghaus présente une vitesse critique, ce qui n'est pas exactement le même concept que la vitesse maximale de croisière trouvée grâce aux données collectées par Katopodis et Gervais. La vitesse critique ne considère pas un temps d'endurance de 30 minutes. Pour rappel, la vitesse critique est définie page 19.

Il ne faut cependant pas négliger les avantages du modèle de Wardle-Zhou. Par exemple, il prend en compte les effets de la température, du mode d'écoulement, de la relation poids-longueur, de la proportion de muscles blancs et rouges et de l'importance des réserves énergétiques des poissons qui peuvent être déterminés de façon fiable selon le mode de vie du poisson.

L'intérêt pratique du modèle basé sur des données mesurées est qu'un intervalle de vitesses peut être considéré, contrairement au modèle déterministe de Wardle-Zhou. La relation empirique de Katopodis-Gervais semble donc plus adaptée dans un contexte d'étude de la variabilité interspécifique.

2.6 Applications des concepts migratoires et natatoires aux espèces utilisées

2.6.1 Le saumon atlantique

La figure ci-dessous présente la morphologie type d'un saumon atlantique (*Salmo salar* (L., 1758)).

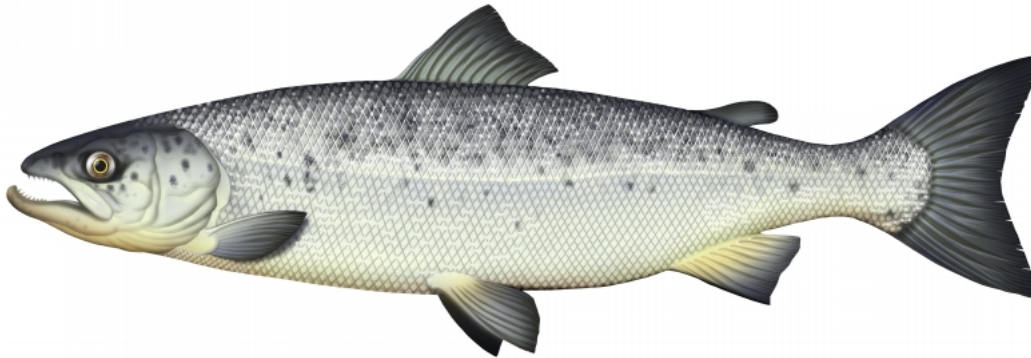


FIGURE 2.12 – Aspect général d'un saumon atlantique adulte (*Salmo salar*) (Dunbar, 2010)

Les saumons utilisés dans la présente étude sont des individus juvéniles dont la morphologie peut être apparentée au poisson dessiné à la figure 2.13.

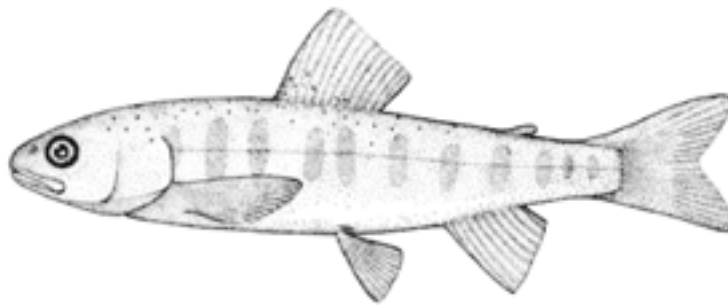


FIGURE 2.13 – Aspect général d'un saumon atlantique juvénile (*Salmo salar*) (FAO, 2017)

Caractéristiques musculaires et natatoires

Il est largement reconnu que les salmonidés possèdent une proportion en muscles rouges plus importante que pour beaucoup de poissons (15 à 20 %) (Lucas & Baras, 2001).

Les saumons atlantiques ont une vessie natatoire double connectée à l'œsophage (Sottiaux, 2007).

Un saumon atlantique moyen mesure 75 cm. Comme la limite de taille pour le modèle empirique de Katopodis et Gervais est de 60 cm, nous allons considérer les régressions ($U=a.L^b$) déterminées par Wolter et Arlinghaus (2003) à partir de données empiriques.

TABLE 2.3 – Vitesses maximale et maximale de croisière déterminées par le modèle de Wolter-Arlinghaus pour un saumon atlantique de 75 cm

Vitesse maximale [m/s] $U_{max} = 0,028.L^{0,79}$	Vitesse maximale de croisière [m/s] $U_{mc} = 0,019.L^{0,75}$
5,23	2,72

Remontées dans les passes et migrations en Meuse

Le saumon atlantique est un poisson anadrome qui a disparu du bassin mosan vers 1935. Grâce aux efforts de réintroduction et de restauration de la continuité écologique de la région wallonne et des Pays-Bas, de plus en plus de saumons adultes sont capturés depuis quelques années dans les passes à poissons de la Meuse. Les cas de montaison observés en Meuse sont uniquement ceux liés à la migration de reproduction. La reproduction a lieu en eau douce entre octobre et janvier dans des frayères d'affluents de la Meuse où les courants sont rapides, froids et oxygénés (Paquier & Philippart, 2006).

Les migrations en Meuse ont lieu d'avril à juin et de septembre à décembre. Durant ces remontées, les saumons ne s'alimentent pas et très peu survivent ou sont capable de retourner en mer après la reproduction. Seule une migration de reproduction peut être considérée pour ce stade de développement.

Les remontées en Meuse sont donc bien une réalité. Considérer cette espèce comme migratrice s'impose.

Quant aux juvéniles, les tacons⁵ vivent en eau douce pendant un à deux ans dans certains affluents de la Meuse (Ourthe, Amblève, etc.) et s'y alimentent avant de smoltifier⁶ et de gagner la mer.

2.6.2 L'ablette commune

Description générale

La figure 2.14 présente la morphologie type d'une ablette commune (*Alburnus alburnus* (L., 1758)).

Le tableau 2.4 présente les caractéristiques morphologiques, comportementales majeures des ablettes communes. Comme tous les cyprinidés, l'ablette commune possède une double vessie natatoire qui est connectée à l'œsophage.

Étant un petit poisson et un consommateur secondaire dans le réseau trophique, l'ablette est soumise à la pression des prédateurs. La grégarité lui confère donc une certaine assurance à la protection.

5. Jeune saumon de deux à trois ans, qui n'a pas encore sa livrée argentée et qui vit en eau douce avant de descendre vers la mer (Genevois, 1958, cité par CNRTL)

6. Série de changements physiques et physiologiques contrôlés par des hormones permettant aux salmonidés anadromes (les smolts) de migrer de l'eau douce à l'eau de mer (Vetofish, 2017).

FIGURE 2.14 – Aspect général d’une ablette commune (*Alburnus alburnus*) (Dunbar, 2010)

TABLE 2.4 – Caractéristiques écologiques des ablettes communes

Famille	Cyprinidés
Régime alimentaire	Zooplanctonophage, insectivore, opportuniste (Freyhof & Kottelat, 2008)
Comportement	Grégaire
Domaine de vie	Zone pélagique (voire épipélagique)
UICN UICN français UICN belge	Préoccupation mineure Préoccupation mineure Préoccupation mineure (Rollin, 2017, comm. pers.)
Habitat préférentiel	Limnophile à tendance rhéophile (Rollin, 2017, comm. pers.), vitesses de courant lentes voire nulles, pente de 0 - 0,5 % (Philippart, 1989).
Maturité	2 à 3 ans (FishBase, 2007)
Taille courante	15 cm (Baudoin et al., 2014)
Vessie natatoire	Double, connectée à l’œsophage (Sottiaux, 2007)
Période et substrat de reproduction	Fin mars à début juin, graviers, sables et herbiers (Baudoin et al., 2014)
Présence en Meuse ?	Oui (possibilité de reproduction en Meuse (Pollux et al., 2006))

Caractéristiques musculaires et natatoires

Au niveau musculaire, il n’existe quasiment pas de données concernant la musculature de l’ablette commune. Lucas & Baras (2001) mentionnent néanmoins le fait qu’il est fort envisageable que ce poisson très pélagique nécessite une contraction musculaire répétée sur le long terme. Par conséquent, l’ablette devrait posséder des muscles rouges permettant une vitesse de nage maximale de croisière assez élevée.

L’ablette commune possède un mode de nage dit “subcarangiforme” (FishBase, 2007). Cela pourrait permettre d’envisager l’application de la relation mise au point à partir de la compilation des données de nage (Katopodis & Gervais, 1991) pour déterminer les vitesses caractéristiques. Le recours aux courbes simulées est motivé par le fait que, à ce jour, peu d’études ont été réalisées dans le but de déterminer les caractéristiques de nage des ablettes communes. La seule valeur trouvée dans la littérature a été déterminée par Regnard en 1893 (cité par Brainbridge, 1957). Ce dernier a déterminé la vitesse maximale pour une ablette commune de 1 g comme étant de 10 longueurs par seconde, soit 50 cm/s. Néanmoins, comme le protocole expérimental n’a pu être retrouvé et que cette mesure est ponctuelle, cette donnée est sujette à caution. En outre, dans un rapport présenté à la section 3.1.2, l’ONEMA (Office National de l’Eau et des Milieux Aquatiques (français)) a séparé les différentes espèces retrouvées dans les cours d’eau français sur la base de critères de capacité de nage (Baudoin et al., 2014). Les ablettes ont été conservées dans le même groupe que les barbeaux, les carassins, les gardons, les rotengles, etc. La vitesse de nage maximale pour ce groupe est de l’ordre de 1,5 à 3 m/s. Dans ce même document, l’ablette commune n’est pas considérée comme une espèce sauteuse.

Au-delà des capacités de nage, selon Sagnes et Statzner (2009), l’ablette commune possède une morphologie fusiforme assez hydrodynamique comparativement aux autres espèces présentes dans les cours d’eau de France. Ce profil permet de réduire considérablement la force de traînée qui ralentit le poisson. Par conséquent, l’ablette possède une morphologie assez bien adaptée aux courants forts.

En conclusion, bien que préférant des environnements à courants lents, l’ablette semble avoir une capacité de nage et une morphologie hydrodynamique adaptée à des courants rapides où elle doit maintenir une activité de nage permanente. Par conséquent, les vitesses maximale et maximale de croisière considérées d’individus de taille commune sont estimées entre la courbe moyenne et la limite supérieure de l’intervalle du modèle mis au point grâce à la relation de Katopodis et Gervais.

TABLE 2.5 – Intervalles des vitesses maximale et maximale de croisière déterminés grâce aux données empiriques collectées par Katopodis et Gervais pour une ablette commune de 15 cm

Vitesse maximale [m/s]	Vitesse maximale de croisière [m/s]
[1,77 : 2,35]	[0,48 : 0,74]

Remontées dans les passes et migrations en Meuse

Tout d’abord, il est intéressant de vérifier dans la littérature si les ablettes sont couramment retrouvées dans les passes à poissons. Malgré leur petite taille, les ablettes sont souvent retrouvées dans les passes à poissons en France (Baudoin et al., 2014) en Pologne (Kotusz & Witkowski, 2006), en République tchèque (Prchalova et al., 2013) et dans les passes à poissons en

Meuse (Tailfer, Waulsort, Lixhe, etc.) (Philippart et al., 2014). Pour information, il semblerait que les ablettes se servent des couches limites des écoulements (près du matériau de fond) pour pouvoir remonter les obstacles normalement infranchissables pour elles (en raison de leur petite taille induisant une faible capacité de nage) (Baudoin et al., 2014).

En outre, il peut être instructif de comprendre la « motivation » qui pousse ces poissons à franchir les passes.

Premièrement, il semblerait que les ablettes, au même titre que la plupart des cyprinidés, empruntent les passes essentiellement entre avril et mai, puis, dans une moindre mesure, jusqu'en juin approximativement (Kotusz & Witkowski, 2006, Philippart et al., 2014, Prchalova et al., 2006). Ces périodes correspondent à la période de reproduction comme cela est montré au tableau 2.4. Dans le cas de l'ablette, ces poissons se déplacent afin de trouver un lieu propice à la reproduction (Witkowski, 2006). Par comparaison avec les résultats observés dans la Meuse, la migration des cyprins débiterait lorsque la température atteint 8-12 °C (Kotusz & Witkowski, 2006). L'ablette se reproduit alors à une température d'environ 15 °C (Philippart, 1989). La température n'est sûrement pas le seul facteur initiant les migrations de printemps (augmentation de la photopériode, variation du débit du cours d'eau, etc.), mais reste un facteur déterminant (Witkowski & Kotusz, 2006, Slavík et al., 2009, Prchalova et al., 2006).

Dans certains cas, l'ablette commune pourrait entreprendre une autre migration de reproduction durant l'été (Epler et al., 2004, Kotusz & Witkowski, 2006). Néanmoins, cette dernière n'est pas observée en Meuse au niveau des passes qui ont fait l'objet de relevés.

Par ailleurs, d'importantes migrations de fin d'été et automnales ont été observées chez les ablettes grâce à leur piégeage dans les passes étudiées (Philippart et al., 2014, Kotusz & Witkowski, 2006, Epler et al., 2004). Ces dernières s'étalent de fin août à novembre selon la zone étudiée. Ces migrations d'automne permettraient aux poissons de se protéger des prédateurs, de trouver des zones d'alimentation en août et de chercher des endroits où passer l'hiver. Une plus grande partie des poissons empruntant les passes durant la migration d'automne concernerait des individus jeunes et immatures (Borchering et al., 2002, Prchalova et al., 2006).

Durant l'hiver, très peu de passages ont été observés pour les ablettes et même les cyprins en général.

Grâce à ces nombreuses campagnes de piégeage sur le terrain, l'ablette commune semble donc bien effectuer des migrations saisonnières. Il semblerait que les ablettes réalisent généralement les remontées en banc (Gillet, Ovidio, Rollin, 2017, comm. pers.). En raison de leur forte présence dans les passes en Meuse, il semble qu'il y ait une réelle nécessité pour ces poissons à réaliser de tels passages.

2.6.3 Le chevesne

Description générale

L'image ci-dessous illustre la morphologie type d'un chevesne (ou chevaine) (*Squalius cephalus* (L., 1758)).

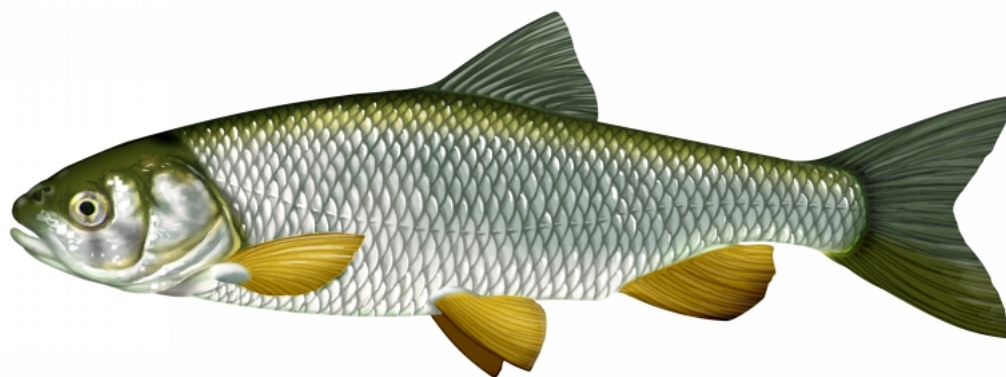


FIGURE 2.15 – Aspect général d'un chevesne (*Squalius cephalus*) (Pêche-en-Vendée, 2014)

Le tableau 2.6 présente les caractéristiques morphologiques, comportementales majeures des chevesnes. Par rapport aux ablettes, la différence écologique se marque surtout au niveau des habitats préférentiels. Le chevesne préfère des habitats beaucoup moins eutrophes et plus rhéophiles que l'ablette qui possède un attrait pour les habitats limnophiles.

En outre, le chevesne a un comportement plus fouisseur du substrat que l'ablette qui aura plus tendance à vivre à la surface de l'eau pour se nourrir de plancton et autres particules dérivant dans la colonne d'eau.

Comme tous les cyprinidés, le chevesne possède une double vessie natatoire qui est connectée à l'œsophage.

Caractéristiques musculaires et natatoires

Il existe très peu de données concernant la vitesse de nage des chevesnes.

Étant donné leur habitat à courant rapide, les chevesnes devraient posséder une vitesse maximale de croisière importante. Aucune information n'a pu être déterminée quant à la composition musculaire des chevesnes.

Les chevesnes possèdent une morphologie assez fusiforme. Selon Sagnes et Statzner (2009), le profil du chevesne est assez hydrodynamique comparativement aux autres espèces des cours d'eau de France. Le coefficient de traînée calculé dans leur étude se rapproche très fortement de celui-atteint par les ablettes.

TABLE 2.6 – Caractéristiques écologiques des chevesnes

Famille	Cyprinidés
Régime alimentaire	Omnivore (très varié) (DGARNE, 2010), espèce opportuniste
Comportement	Grégaire au stade juvénile, solitaire à l'âge adulte
Domaine de vie	Zone pélagique
UICN UICN français UICN belge	Préoccupation mineure Préoccupation mineure Vulnérable (Rollin, 2017, comm. pers.)
Habitat préférentiel	Rhéophile à tendance limnophile (Rollin, 2017, comm. pers.), oxyphile (Philippart, 2007), Pentes : 0 - 1 % (Philippart, 1989)
Maturité	Très variable : ♀ 4 à 6 ans, ♂ 2 à 4 ans (Freyhof, 2014, Mann, 1976)
Taille courante	45 cm (Baudoin et al., 2014)
Vessie natatoire	Double, connectée à l'œsophage (Sottiaux, 2007)
Période et substrat de reproduction	Début avril à fin juin, graviers et herbiers (Baudoin et al., 2014)
Présence en Meuse ?	Oui

Pour toutes ces raisons, nous considérons que les vitesses pertinentes déterminables à partir du modèle seront délimitées par la tendance moyenne et la limite supérieure de l'intervalle expérimental. Pour un individu de taille commune (45 cm) est obtenu :

TABLE 2.7 – Intervalles des vitesses maximale et maximale de croisière déterminés grâce aux données empiriques collectées par Katopodis et Gervais pour un chevesne de 45 cm

Vitesse maximale [m/s]	Vitesse maximale de croisière [m/s]
[3,7 : 4,92]	[0,89 : 1,37]

Remontées dans les passes et migrations en Meuse

A nouveau, il est important de vérifier si ces poissons empruntent les passes de manière significative. Selon la synthèse des données européennes de Lucas et Baras (2001) et les données récoltées dans les passes à poissons de Meuse par Ovidio et Philippart (2014), le chevesne est une espèce remontant fréquemment les passes à poisson, y compris en Meuse.

A nouveau, la période de printemps semble être une période privilégiée (Lucas & Baras, 2001, Kotusz & Witowski, 2006, Prchalova & Slavik, 2006, Philippart & Ovidio, 2014, Koç et al., 2014). Cette période coïncide avec la période de reproduction comme le montre le tableau 2.6. Les pics de migration s'établissent quand la température de l'eau atteint 10 °C (Prchalova & Slavik, 2006, Philippart & Ovidio, 2014, Prignon et al., 1998). Durant ces migrations à but reproductif, les chevesnes adultes (principalement) auraient tendance à réaliser ces mouvements de nuit (Lucas & Baras, 2001, Kotusz & Witkowski, 2006). Dans certaines rivières, les migrations de reproduction des chevesnes s'étalent jusqu'en septembre, ce qui pourrait indiquer une extension locale de la période de reproduction (Lucas & Baras, 2001).

Bien évidemment, il faut garder à l'esprit que pour beaucoup de cyprinidés européens rhéophiles, ces migrations ne sont pas toujours une obligation. Souvent, ces poissons fraient et passent l'hiver dans une même zone si celle-ci le permet (Lucas & Baras, 2001).

La migration automnale est aussi observée chez le chevesne (Lucas & Baras, 2001, Prchalova & Slavik, 2006), mais peut varier d'intensité selon le cours d'eau étudié (Philippart & Ovidio, 2014, Kotusz et al., 2006). Néanmoins, selon Lucas et Baras (2001), les chevesnes migrent souvent durant cette période dans le but de trouver un refuge hivernal.

Durant l'hiver, quasiment aucune montaison n'est observée dans les passes à poisson.

Tout comme l'ablette commune, les migrations des chevesnes montrent bien qu'une continuité écologique est très certainement nécessaire pour permettre à cette espèce de se reproduire, se nourrir, trouver des zones de refuge en hiver ou pour éviter des prédateurs au stade juvénile. Par exemple, dans la rivière allemande de la Spree, Fredrich et al. (2003) ont montré que des chevesnes sont capables de comportement de homing jusqu'à une distance de 13 km, ce qui montre leur aptitude à franchir de grandes distances et la nécessité de maintenir une continuité écologique.

Finalement, remarquons que les chevesnes remontent les passes en banc. Cependant, la densité de ces bancs est plus faible que pour les ablettes et les gardons (Gillet, 2017, comm. pers.).

2.6.4 Le chabot

Description générale

L'image 2.16 illustre la morphologie type d'un chabot (*Cottus gobio* (L., 1758)). La taxonomie de *Cottus gobio* a été revue récemment. Huit espèces ont été différenciées à partir d'une seule (Freyhof et al., 2005). Deux d'entre elles vivent en Belgique, *Cottus rhenanus* dans le bassin de la Meuse et *Cottus perifretum* dans le bassin de l'Escaut (Ovidio & Philippart, 2007). Cependant, dans ce travail, les chabots seront considérés comme une seule et même espèce *Cot-*

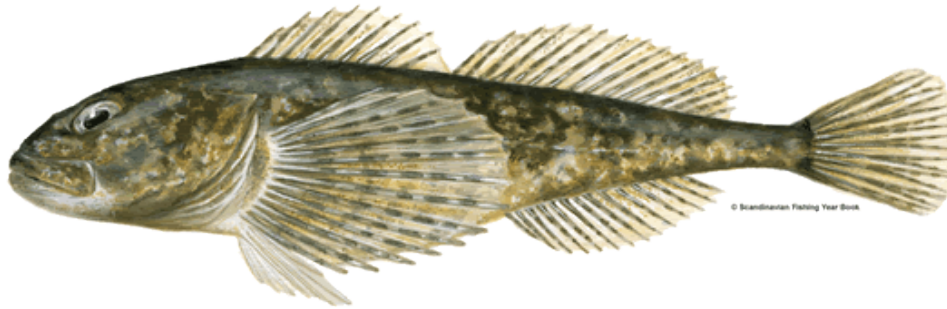


FIGURE 2.16 – Aspect général d'un chabot (*Cottus gobio*) (Farnham Angling Society, 2010)

tus gobio car il ne paraît pas pertinent de faire une distinction entre ces deux espèces dans la présente étude. En effet, les différences de capacité de nage et comportementales ne devraient pas être importantes entre les deux espèces.

Le tableau 2.8 présente les caractéristiques morphologiques, comportementales majeures des chabots. Le chabot est très peu étudié au niveau des passes. En Belgique, la circulation des chabots au travers de passes à poissons n'a jamais été observée que dans des rivières rhéophiles. Dans ce cas, le but était d'évaluer la nécessité de restaurer des éléments de l'habitat hydraulique de cours d'eau non navigables (Ovidio & Philippart, 2007). Cela provient sans doute de son absence de vessie natatoire et de son comportement benthique et très statique (mimétisme) qui limitent fortement sa capacité de nage par rapport à un individu de même taille d'une autre espèce.

Caractéristiques musculaires et natatoires

Très peu de données existent quant à la capacité de nage des chabots. En effet, il est expérimentalement difficile d'utiliser des chabots dans des tunnels de nage à cause de leur stationnarité benthique. Les vitesses déterminées sont peu représentatives de la réalité de terrain étant donné que les chabots ne nagent que très rarement dans la colonne d'eau (Sagnes & Statzner, 2009).

Johnston et al. (1995) considèrent que le chabot possède une très grande proportion de muscles glycolytiques (blancs). Cela indiquerait une puissance de nage importante pour des activités soudaines mais pas continues. Il semble donc difficile d'envisager une remontée en une traite d'une passe grâce à une nage continue de l'animal. De même, ce type de nage est très répandu chez les prédateurs. Par exemple, le chabot a besoin d'une puissance importante en muscles anaérobies pour avoir une chance de fondre sur une proie passant à proximité de l'animal camouflé ou de son repaire. De plus, le chabot se déplace généralement par saltation sur le fond. Grâce à un vif battement de la nageoire caudale et des grandes nageoires pectorales, il parcourt une certaine distance à la fin de laquelle il regagne généralement le fond.

TABLE 2.8 – Caractéristiques écologiques des chabots

Famille	Cottidés
Régime alimentaire	Insectes aquatiques, petits crustacés (gammare) Occasionnellement : oeufs, poissons pour les gros individus (Wirz & Gründler, 2014), cannibalisme
Comportement	Solitaire et territorial, Mimétique (Tomlinson & Perrow, 2000), Chasseur nocturne (Tomlinson & Perrow, 2000), Activité réduite en présence de lumière (Smyly, 1956).
Domaine de vie	Zone benthique
UICN UICN français UICN belge	Préoccupation mineure Données insuffisantes Vulnérable (Rollin, 2017, comm. pers.)
Habitat préférentiel	Rhéophile (Tomlinson & Perrow, 2000), Oxyphile (Philippart, 2007), Réside dans des cavités formées par des pierres et autres éléments de protection, Pente de 0 - 2 % (Philippart, 1989).
Maturité	2 à 4 ans (Wirz & Gründler, 2014)
Taille courante	10 cm (Baudoin et al., 2014)
Vessie natatoire	Aucune (Sottiaux, 2007)
Période et substrat de reproduction	Plusieurs fois entre février et juin (Tomlinson & Perrow, 2000) sur des substrats pierreux
Présence en Meuse ?	Oui (Rollin, Gillet, 2017, comm. pers.) présence par des dévalaisons depuis les affluents, dans des parties non canalisées où il subsiste du substrat grossier (Ovidio, 2017, comm. pers.)

Parallèlement, la morphologie du chabot semble être une des moins hydrodynamiques des espèces de nos rivières (Sagnes & Statzner, 2009) bien qu'appréciant des cours d'eau aux courants très rapides. Par exemple, sa large tête peut représenter 25 % de la taille totale du corps. Sa morphologie semble donc mieux adaptée à des conditions benthiques et à une certaine stationnarité qu'à une nage permanente dans ces courants (Tomlinson & Perrow, 2000). En effet, le chabot ne possède pas de vessie natatoire, ce qui le contraint à rester sur le fond du cours d'eau et à dépenser plus d'énergie pour se stabiliser dans la colonne que pour des poissons à vessie natatoire. En outre, le chabot utilise ses grandes nageoires pectorales pour s'agripper aux substrats de fond et mieux résister à des écoulements rapides (Webb, 1994).

En raison de la faible proportion en muscles rouges que devrait posséder le chabot, l'intervalle délimité par la tendance moyenne et la borne inférieure du modèle de Katopodis et Gervais est considéré dans la présente étude. La vitesse maximale de croisière devrait se situer entre $[0,20 : 0,38]$ m/s.

La vitesse maximale d'un chabot de 7,4 cm a été quantifiée à 1,12 m/s à 10 °C et à 0,90 m/s à 15 °C (Tudorache, 2008). En considérant ces données, la baisse de sa vitesse maximale avec l'augmentation de température permet de supposer que les températures de la zone d'habitat du chabot sont généralement assez fraîches. En comparaison, le modèle basé sur les données récoltées par Katopodis et Gervais (1991) évalue la vitesse maximale du chabot à 1,34 m/s avec un de $[0,89 : 1,79]$ m/s.

N'ayant pas inclus des prédateurs benthiques possédant une activité de sprint importante, ce cas de figure est un cas limite du modèle. L'utilisation de ce modèle dans ce contexte n'est donc pas fiable. D'autre part, aucune information n'a été trouvée concernant le type de nage des chabots durant une activité de sprint ou soutenue à court terme. Selon nos observations, il est fort probable que la nage soit subcarangiforme mais notre expertise n'est pas suffisante pour confirmer cette hypothèse.

Remontées dans les passes et migrations en Meuse

Très peu d'intérêt a jusqu'ici été porté aux migrations des chabots dans les passes à poissons étant donné sa réputation d'espèce sédentaire et le fait que la biomasse de cette espèce ne soit pas importante dans les grands cours d'eau lenticques. Néanmoins, il est nécessaire de caractériser la capacité de franchissement au niveau d'obstacles dans les cours d'eau rhéophiles (Bourguignon, 2016).

Les chabots profitent généralement des vitesses plus faibles au fond de la passe (Baudoin et al., 2014) ainsi que de la présence d'obstacles permettant de créer des zones de repos et augmentant la rugosité du fond de la passe (Knaepkens et al., 2005). Par conséquent, un écoulement supercritique pourrait diminuer la capacité du chabot à remonter librement une passe.

Une population de chabots peut être divisée en un groupe assez statique et un groupe assez mobile (Knaepkens et al., 2004, 2005). Les chabots ne peuvent être considérés comme une espèce migratrice (Ovidio & Philippart, 2007). Néanmoins, des observations réalisées en Flandre et en Wallonie montrent que les distances parcourues par les chabots sont assez importantes et peuvent atteindre jusqu'à 200 mètres (Ovidio & Philippart, 2007). Ces déplacements peuvent être réalisés dans le cadre de la recherche d'un lieu de protection, de la recherche d'un lieu de ponte adapté pour les mâles ou dans le cadre du choix du partenaire et du lieu de ponte pour la

femelle. Parallèlement aux objectifs migratoires, les mouvements des chabots semblent parfois plus importants durant la période de reproduction (Knaepkens et al., 2004) si l’habitat étudié ne présente pas assez de sites de reproduction (Knaepkens et al., 2005).

Par conséquent, étudier le comportement des chabots en passe à poissons peut être très instructif d’un point de vue comportemental et dans le cadre de la mise au point d’un protocole expérimental pour les espèces benthiques. La nécessité de mieux comprendre les mécanismes de remontée dans les passes est renforcé par le fait qu’il est fort probable que le chabot remonte certaines passes de Meuse et de ses affluents (Ovidio, Gillet, 2017, comm. pers.). Les capturer dans les passes reste compliqué car les techniques de piégeage ne sont pas prévues pour des poissons benthiques (Gillet, 2017, comm. pers.). Ce dernier constat pourrait donc laisser penser que le chabot remonte les passes uniquement par le fond de celles-ci. La présence d’un substrat devrait donc faciliter leur remontée (Baudoin et al., 2014, Ovidio, 2017, comm. pers.).

Théories liées au modèle réduit

écrit par Estelle Courtois

3.1 État de l'art

Le but de cette section est de recenser les théories et études existantes en matière de design d'une passe à poissons multispécifique. Cela permettra de situer ce travail dans la littérature. La première partie traitera des recommandations générales pour le design d'une passe. La deuxième partie se penchera en particulier sur un protocole de dimensionnement français. Finalement, plusieurs études semblables à ce travail seront présentées afin d'avoir une base de comparaison pour nos résultats.

3.1.1 Critères généraux de design d'une passe à poisson

L'objectif des dispositifs de franchissement est de rétablir la libre circulation de la faune piscicole le long des cours d'eau. La meilleure solution d'un point de vue écologique, selon Cowx et Welcomme (1998) et Wang et al. (2010), reste de supprimer les ouvrages obstacles à la migration des poissons afin de rétablir la continuité du cours d'eau et de retrouver un habitat naturel. Cela est cependant incompatible avec l'activité humaine. Par conséquent, la technologie, le design et l'évaluation des passes à poisson ont dû être développés en parallèle à la construction des ouvrages liés au développement économique (barrages de navigation et de prise d'eau) segmentant les cours d'eau.

Une multitude de critères visant à aider les concepteurs à établir le design d'une passe à poisson efficace sont disponibles dans la littérature. Les critères présentés par Cowx et Welcomme

(cité par Lucas & Baras, 2008) résument assez bien ce qui se trouve dans les documents de références, ils forment donc la base du résumé qui suit. Néanmoins, ils ont été complétés par les recommandations d'autres auteurs, notamment Aigoui et Dufour (2008), Larinier et al. (1994), Katopodis (1992) et McLeod et Nemenyi (1940).

Les critères principaux de design d'une passe à poisson efficace sont résumés comme suit :

- Il faut fournir un **passage confortable (sans stress ni blessures) à tous les individus** des espèces concernées, y compris les moins athlétiques, sur l'entièreté de la passe. Pour ce faire, il est nécessaire de prévoir des zones de repos à intervalle régulier, de contrôler la vitesse de l'écoulement afin qu'elle reste inférieure aux capacités de nage des poissons et d'éviter les changements de direction brutaux de l'écoulement, ainsi qu'une projection du jet principal sur les parois latérales.
- La passe doit être **fonctionnelle tout au long de l'année**, sous différents régimes hydrauliques, pour des températures et des niveaux d'oxygène variés.
- La capacité d'accueil de la passe doit être suffisante pour **satisfaire les besoins en période de migrations** liées à la reproduction. Cela implique une bonne connaissance des populations de poisson et de leur comportement migratoire.
- Il convient de **positionner l'entrée de la passe de sorte qu'elle soit perceptible par les individus**. Le débit sortant de la passe doit être suffisant pour ne pas être masqué par des écoulements provenant des turbines ou des ouvrages évacuateurs, ni par des zones de recirculation. L'attrait vers l'entrée de la passe sert aussi à éloigner les poissons des impasses et des zones de danger.
- La **sortie en amont de la passe se positionne assez loin des déversoirs et turbines** afin d'éviter que les individus ayant réussi la montaison ne se fassent emporter vers l'aval ou ne se blessent.
- La conception doit **limiter les coûts de construction et de maintenance** en limitant les interférences dues aux sédiments et aux débris. Il convient d'éviter au maximum les interventions d'entretien et de réglage.

Bien que tous les critères cités précédemment aient une grande importance, ce travail se penchera quasi exclusivement sur le premier point : l'interaction explicite entre les capacités de nage de différentes espèces et les vitesses de l'écoulement. La suite de l'état de l'art se concentre donc uniquement sur cette thématique.

Une parenthèse sera tout de même faite lors des expérimentations pour aborder la problématique de l'attrait de la passe, une question qui suscite encore beaucoup d'interrogations. Effectivement, il est difficile de définir des règles précises pour assurer une attraction suffisante au niveau de l'entrée de la passe. Cela est étroitement lié à la configuration aval du barrage (sortie de turbine, pertuis, etc.) et du cours d'eau concerné (débit, largeur, etc.), ainsi qu'au comportement de chaque espèce (Katopodis, 1992). Chaque solution est donc propre à sa situation particulière, ce qui rend l'étude de l'attrait complexe.

3.1.2 Critères de design d'une passe à bassins en fonction des espèces ciblées

Après la récolte de données relatives au projet, une des premières étapes dans le processus de design d'une passe est le choix du type de passe. Lorsque l'ouvrage est destiné à accueillir plusieurs espèces, la passe à bassins successifs est généralement la meilleure solution (Larinier et al., 1994). C'est d'ailleurs ce type de passe qui a été choisi dans le cadre du projet de rénovation de la passe de Rivière. Le principe consiste à diviser le dénivelé total en chutes partielles formant une série de bassins. Lorsqu'elle est équipée de fentes verticales avec un écoulement à jet de surface, la passe à bassins successifs n'est que peu sélective et permet à un large spectre d'espèces de l'emprunter. Effectivement, le poisson peut alors franchir la passe en nageant à sa profondeur de prédilection, sans besoin de sauter. Ce type d'ouvrage convient donc aussi bien aux espèces pélagiques (pleines eaux) qu'aux espèces benthiques (de fond) (Aigoui & Dufour, 2008). De plus, il est particulièrement adapté aux sites présentant de grandes fluctuations des niveaux d'eau amont ou aval (Larinier et al., 1994). Nous nous concentrerons sur ce type de passe par la suite.

Après avoir choisi le type de passe qui sera installé, le concepteur doit déterminer les dimensions de celle-ci. Une règle générale est de dimensionner la passe pour l'espèce la plus exigeante (en terme de chutes entre bassins, de vitesses, des puissances volumiques dissipées, etc.) (Larinier et al., 1994). Dans la littérature, un bon nombre d'auteurs proposent des recommandations générales de dimensionnement. Aigoui et Dufour (2008) et Larinier (1983) préconisent par exemple de limiter la puissance dissipée, qui est un indicateur du niveau d'agitation de l'eau, à 150 W/m^3 pour les passes destinées aux espèces possédant une capacité de nage réduite. La longueur et la largeur des bassins sont déterminées grâce à la taille du plus grand migrateur. Celles-ci sont souvent décrites comme étant liées à la largeur de l'échancrure. Aigoui et Dufour (2008) et (Kaptopodis, 1992) proposent une longueur de bassin entre 8 et 10 fois la largeur de l'échancrure b , tandis que Larinier (1983) conseille de rester dans une fourchette plus large, de 7 à 12 fois b . Même si certains auteurs sont plus restrictifs que d'autres, la majorité s'accorde à dire que la valeur de b doit être comprise entre 0,15 et 0,6 m.

Ces critères de dimensionnement donnent une idée globale du design du projet, mais ne font pas le lien explicite avec les exigences spécifiques de chaque espèce de poisson ciblée. Seul un protocole français propose un regroupement des recommandations détaillées pour chaque espèce ou chaque groupement d'espèces. Les informations fournies dans la suite de cette section sont tirées du document rédigé par Baudoin et al. (2014) ayant pour objectif de faire un diagnostic préalable du fonctionnement de la passe.

Le principe général de ce protocole d'Informations sur la Continuité Écologique (ICE) est de diagnostiquer la franchissabilité d'un obstacle par la faune piscicole en montaison, tout en évitant au maximum d'avoir recours à l'expertise. Pour ce faire, les auteurs confrontent la typologie et la géométrie des obstacles et des conditions hydrauliques avec les capacités physiques de déplacement des espèces de poissons présentes dans le cours d'eau.

La première étape consiste à regrouper les espèces de poissons en fonction de leur capacité de nage. Pour ne pas multiplier les catégories uniquement onze groupes d'espèces ont été définis. Seuls les groupements contenant les espèces qui nous intéressent dans la suite du travail sont repris dans le tableau 3.1

TABLE 3.1 – Extrait du tableau récapitulatif des groupes d'espèces (Baudoin et al., 2014)

Groupe ICE	Espèces
1	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) Truite de mer ou de rivière (<i>Salmo trutta</i>)
7a	Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>)
9a	Ablette commune (<i>Alburnus alburnus</i>)
9b	Chabot (<i>Cottus sp</i>)

Le tableau 3.2 suivant présente quant à lui les valeurs guide pour définir si le dispositif choisi est fonctionnel, c'est-à-dire adapté aux espèces ciblées. À nouveau, sont présentées dans ce tableau uniquement les données liées aux espèces que nous étudierons dans la suite de ce travail.

TABLE 3.2 – Valeurs guide pour le dimensionnement de passes à bassins à jet de surface (Baudoin et al., 2014). Toutes les valeurs sont exprimées en mètres.

Groupe ICE	Chute maximale	Chute préconisée	Largeur min d'échancrure	Profondeur min de bassin	Longueur min de bassin
1	0,35	0,30	0,30	1,00	2,50
7a	0,30	0,25	0,25	0,75	2,00
9a	0,25	0,20	0,25	0,75	2,00
9b	0,20	0,15	0,15	0,50	1,25

Les valeurs reprises dans le tableau 3.2 serviront par la suite à prédire si le projet de passe de Rivière est adapté ou non aux espèces étudiées dans ce travail. Les résultats des expériences valideront ou remettront en question ces critères.

3.1.3 Présentation de l’étude comportementale de salmonidés introduits dans le modèle réduit de la passe de Rivière (Pype, 2015)

L’étude principale sur laquelle nous nous sommes basés pour établir entre autres le protocole de nos expériences et le traitement de nos données est le mémoire réalisée par Jean-Charles Pype lors de l’année académique 2014-2015 et intitulé *Passes à poissons - Étude comportementale expérimentale en modèle réduit*. Notre travail est d’ailleurs une extension à cette étude réalisée exclusivement avec des salmonidés. Le mémoire de Pype s’inscrit donc aussi dans le contexte global de la restauration de la continuité écologique de la Meuse, encadré par le projet Meuse Saumon 2000. Plusieurs espèces de salmonidés (le saumon atlantique, la truite arc-en-ciel et la truite fario) ont été introduites dans le modèle réduit de la passe de Rivière afin d’analyser leur comportement. Des caméras ont filmé leurs mouvements et les poissons ont été munis de PIT tags afin de pouvoir les détecter grâce au système RFID. Cela a permis d’obtenir des résultats concernant le taux de franchissement de la passe et le comportement des individus dans les bassins (trajectoires et zones de repos). Ces résultats vont être présentés point par point dans cette section.

Caractérisation de la remontée

Trois phénomènes ont été étudiés lors des remontées des salmonidés. En premier lieu, l’influence de la photopériode a été caractérisée en recensant le nombre de remontées par heure et en illustrant parallèlement le jour (lumière du laboratoire allumée) et la nuit (lumière du laboratoire éteinte). Les poissons ont franchi la dernière échancrure de la passe tout au long des 24 heures. Toutefois, une tendance peut être mise en avant. Un pic de détections a été enregistré au moment de la transition entre la lumière et l’obscurité. Pype explique ce phénomène par le caractère crépusculaire des salmonidés juvéniles.

En deuxième lieu, la durée des remontées a été étudiée. Le but étant de détecter un éventuel phénomène d’apprentissage. Il a été conclu que l’ordre de grandeur du temps nécessaire au franchissement complet de la passe était identique pour toutes les remontées, même si la durée de la première remontée était en moyenne supérieure aux deux suivantes. Cependant, les données n’étaient pas suffisantes pour pouvoir affirmer avec certitude un comportement d’apprentissage chez les salmonidés.

Finalement, le troisième paramètre d’influence qui a été analysé est la taille du poisson. La question était de savoir si cela avait une influence sur la durée de remontée. Les poissons ayant une longueur inférieure à la valeur pivot de 120 mm ont mis en moyenne deux fois plus de temps à franchir la passe et ont été moins nombreux à tenter une remontée que leurs compagnons de plus grande taille. Ce résultat met en évidence la prépondérance des capacités de nage du poisson (qui, pour rappel, sont liées à sa taille) dans l’efficacité du franchissement.

Zones de présence préférentielle

Les résultats présentés dans la suite de cette section sont en grande partie tirés d'expériences réalisées avec un lot de 65 truites arc-en-ciel, de longueur comprise entre 80 et 100 mm. Le travail de Pype a permis d'élaborer un premier protocole de test. Cependant, il ne disposait pas du matériel adéquat d'acquisition d'images, ce qui a pour conséquence que les résultats sont uniquement des tendances sans aucune quantification.

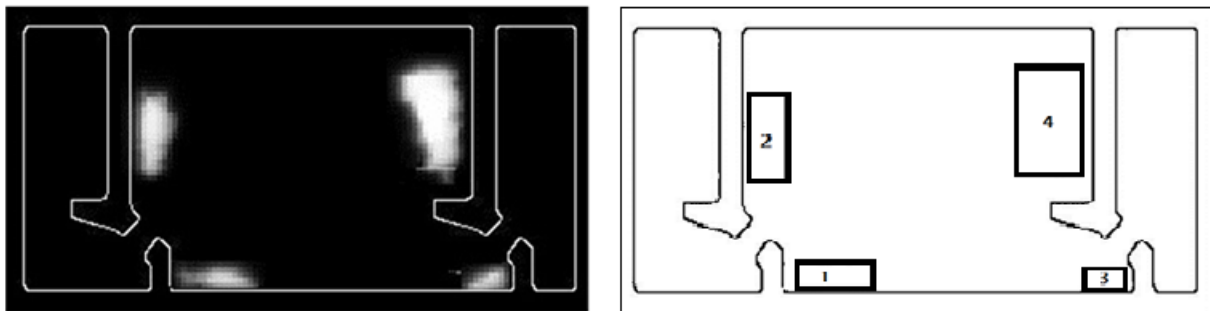


FIGURE 3.1 – Identification des zones de repos des salmonidés dans le modèle réduit de la passe de Rivière, l'amont se trouve à gauche. À gauche : résumé des détections de poissons par images ; à droite : identification graphique des zones. (Pype, 2015)

Comme souvent dans la littérature, Pype utilise le terme “zones de repos” dans son travail pour définir les zones de présence préférentielle des poissons. Ces zones sont définies comme étant les régions du bassin où les poissons ont tendance à rester pour récupérer leur potentiel musculaire en vue d'une montaison. Nous avons décidé d'exprimer ce concept avec le terme "zones de présence préférentielle", afin de ne pas induire le lecteur en erreur. Effectivement, comme nous le verrons plus tard dans le chapitre 6 présentant les résultats de ce travail, certaines espèces de poissons (le chabot par exemple) n'ont pas l'occasion de se reposer lorsque l'écoulement est trop puissant par rapport à leur capacité de nage.

L'image de gauche de la figure 3.1 a été construite en cumulant l'ensemble des positions enregistrées des poissons, mais en supprimant les zones de faible présence. Les parties blanches représentent donc l'étendue des zones de repos. L'image de droite définit schématiquement la géométrie et l'emplacement de ces zones.

Les salmonidés semblent utiliser préférentiellement quatre zones. Toutefois, la limitation de l'expérience à un seul lot et le manque de quantification des présences remettent en question la précision de ces résultats. Une deuxième remarque peut être faite par rapport à la dimension des zones. Une grande surface ne signifie pas une présence plus importante.

Étude de la vitesse et mise en relation avec les caractéristiques de l’écoulement

La qualité des images et du post-traitement des données de l’étude réalisée avec les salmonidés n’ont pas permis de collecter des informations nécessaires au calcul des vitesses de nage des poissons au sein de la passe.

Trajectoires empruntées

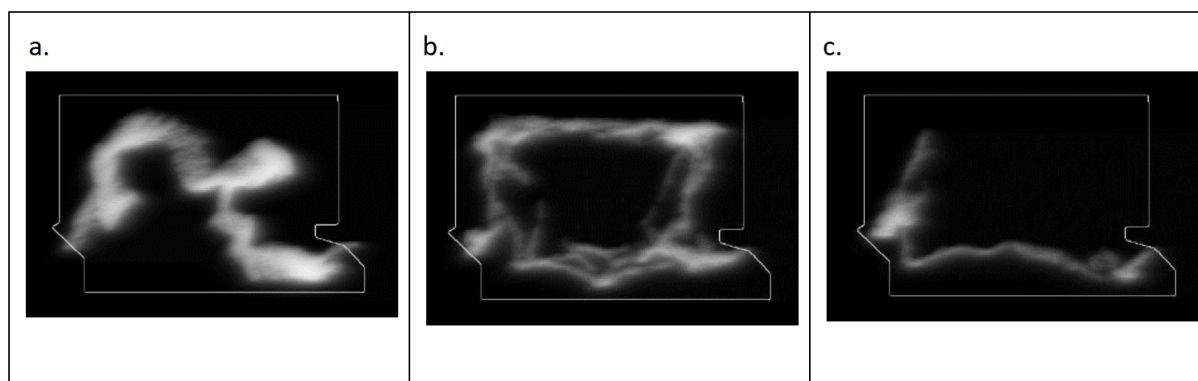


FIGURE 3.2 – Illustration des différentes catégories de trajectoires des salmonidés dans la passe de Rivière. L’amont se trouve à gauche. (Pype, 2015)

L’auteur de ce précédent mémoire a identifié trois catégories de trajectoires empruntées par les salmonidés. Ces différents cas de figure sont illustrés, dans l’ordre, par la figure 3.2. Les traces blanches représentent les positions successives des poissons. Une trace plus claire correspond à une période de présence plus longue, tandis qu’une trace foncée correspond à un passage rapide. Les catégories de trajectoire sont définies comme suit :

- Trajectoire (a) guidée par le jet principal : cette trajectoire nécessite de contrer des vitesses importantes et est donc associée à des poissons avec des capacités de nage élevées. Ce résultat a d’ailleurs été observé avec un autre lot de poissons, un lot de 75 truites fario de plus grande taille que les truites arc-en-ciel utilisées pour toutes les autres expériences.
- Trajectoire (b) lorsque le poisson tarde à trouver la sortie du bassin : le poisson tourne alors en rond et semble avoir du mal à détecter le jet principal pour trouver la sortie du bassin.
- Trajectoire (c) évitant les courants rapides : le poisson longe les parois du bassin pour arriver en amont du bassin. Une fois arrivé près de l’échancrure, il rejoint le jet principal et est subitement confronté à des vitesses élevées. C’est pourquoi il stagnera souvent un instant devant l’échancrure avant de la franchir.

Profondeur de nage au droit de l'échancrure

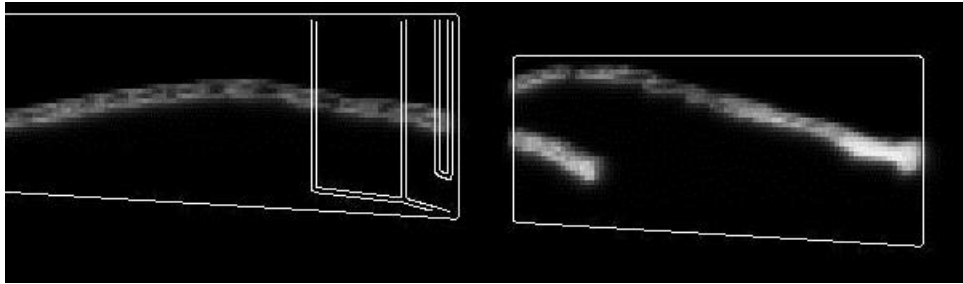


FIGURE 3.3 – Enregistrement latéral du passage d'un salmonidé au travers d'une échancrure du modèle réduit de la passe de Rivière. L'amont se trouve à gauche. (Pype, 2015)

La figure 3.3 présente une trajectoire typique d'un salmonidé à travers l'échancrure. Dans les zones de fort courant, le poisson tente de s'éloigner en changeant de hauteur dans la colonne d'eau. Le poisson, peut-être un peu déstabilisé, semble chercher la meilleure hauteur, qui lui permettra de franchir la passe le plus facilement possible. Il sera toutefois forcé de revenir dans le courant principal lorsqu'il se lance dans la traversée de l'échancrure. Il ne s'agit cependant que d'une seule illustration de trajectoire. Il est donc difficile d'en ressortir des tendances générales.

3.1.4 Présentation d'autres études en modèle réduit

Il n'est pas évident de trouver dans la littérature des documents traitant d'expériences réalisées avec des poissons en modèle réduit de passe à poisson. Pour cause, peu d'études de ce genre ont été réalisées jusqu'à présent. Dans cette section nous allons toutefois en présenter quelques unes qui nous semblent pertinentes dans le contexte de ce travail.

La première que nous mentionnerons est l'étude réalisée par Wang, David et Larinier dont les résultats ont été publiés en 2010. Ils ont travaillé avec un modèle réduit d'une échelle à poisson à échancrures verticales, composée de 5 bassins avec une longueur $L = 0,75$ m et une profondeur $H = 0,55$ m. Les expériences qu'ils ont réalisées visaient dans un premier temps à caractériser la turbulence de l'écoulement en fonction de variations géométriques de la passe (largeur B et inclinaison s). Pour une géométrie fixe ($B = 0,67$ m et $s = 10\%$), ils ont ensuite introduit un lot de truites juvéniles (ayant une longueur comprise entre 80 et 120 mm) afin d'analyser leur comportement au sein du modèle réduit. Le déplacement des poissons a été filmé dans le troisième bassin de la passe.

Une deuxième étude introduisant un lot de chevaines (ayant une longueur comprise entre 97 et 159 mm) dans un modèle réduit de passe à poissons a été réalisée par Cornu et al. (2012) à l'Université de Poitiers (France). Il s'agissait également d'une passe à échancrure verticale composée de 5 bassins et construite à échelle 1 : 4. Les dimensions générales sont plus ou moins comparables à celles de la première étude ($L = 0,75$ m, $H = 0,55$ m, $B = 0,5$ m et $s = 7,5\%$).

Les poissons ont aussi été filmés de façon continue dans le troisième bassin.

Les résultats découlant de ces deux travaux sont illustrés à la figure 3.4. L'image de gauche représente les zones les plus empruntées par les truites (Wang et al., 2010), tandis que l'image de droite représente celles des chevaines (Cornu et al., 2012).

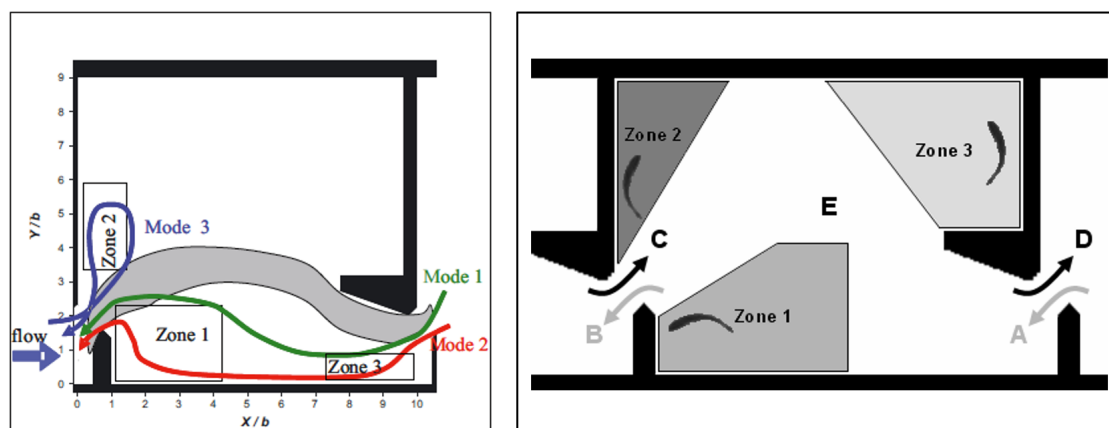


FIGURE 3.4 – Représentations graphiques, issues de la littérature, des zones de présence préférentielle des poissons de différentes espèces au sein de modèles réduits de passes à bassins à fentes verticales. À gauche : zones préférentielles des truites (Wang et al., 2010) ; à droite : zones préférentielles des chevaines (Cornu et al., 2012).

En comparant ces zones entre-elles et avec les résultats obtenus par Pype (2015) (figure 3.1), nous voyons plusieurs tendances. Les zones d'immobilité prolongée des poissons se situent toutes hors de la trajectoire du jet principal, là où les vitesses de l'eau sont plus faibles. Il est aussi notable que les zones mises en avant par chacune des études ne coïncident pas parfaitement. Par exemple, la zone 4 pour les salmonidés étudiés par Pype est située au même endroit que la zone 3 pour les chevaines (Cornu et al., 2012), mais cette zone est inexistante sur le schéma présenté par Wang et al. correspondant, pour rappel, à un lot de truites. Ces différences peuvent s'expliquer de deux façons. Premièrement, les différents auteurs ont travaillé avec des espèces différentes et des tailles de poisson différentes. Cependant, notons que Pype et Wang et al. ont tous deux utilisés des salmonidés ayant des longueurs assez similaires, or, leurs résultats ne sont pas identiques. Deuxièmement, les modèles réduits avaient des dimensions variées. Cela a pour effet que la forme et les vitesses de l'écoulement ne sont pas identiques pour chaque expérience. Nous pouvons donc conclure que les zones de présences préférentielles sont fortement influencées par la géométrie des bassins.

3.2 Présentation du modèle réduit

3.2.1 Description générale

Dans l'introduction de ce mémoire et la mise en contexte, nous avons vu les raisons de la construction du modèle réduit de la future passe à poisson du barrage de Rivière. Dans cette section, nous allons nous pencher plus en détail sur les caractéristiques spécifiques de cette maquette qui a été construite dans le Laboratoire de Recherches Hydrauliques de Châtelet.

Afin de répondre au mieux aux exigences d'une passe se voulant attractive et adaptée aux différentes espèces de poissons susceptibles de l'emprunter, le nouvel aménagement sera une passe à bassins successifs. Cela consiste à diviser le dénivelé total (qui est de 2,05 m, entre les niveaux de flottaison normaux amont 84,32 m DGN et aval 82,27 m DGN) en chutes partielles afin de former un "escalier hydraulique" praticable par les poissons, avec des hauteurs de chutes diminuées et une dissipation de l'énergie de l'écoulement. Il convient donc d'adapter les caractéristiques des chutes situées entre bassins aux capacités de nage des espèces cibles (Aigoui & Dufour, 2008). La géométrie globale de la passe est imposée par l'espace disponible qui est restreint. Effectivement, le nouvel aménagement doit être installé dans le chenal de l'échelle à remplacer. Seules deux légères extensions en profondeur et vers l'aval sont acceptables. La longueur totale de la passe est de 50 m, tandis qu'un bassin aux dimensions standard a une longueur de 5 m, une largeur de 3 m et une hauteur d'eau moyenne de 1 m. Ces dimensions permettent de respecter les critères d'acceptabilité piscicole recommandés par la Direction des Études Techniques en fonction des espèces cibles. Ces critères sont présentés dans le tableau 3.3 pour le prototype et pour le modèle. Il est important de souligner que les critères de vitesses maximales ne concernent pas les échancrures de seuil, mais uniquement les bassins (Zorzan, 2016).

Rappelons que Baudoin et al. (2014) ont proposé des critères permettant de juger si la passe est adaptée ou non aux espèces ciblées par cette étude. Ils sont résumés dans le tableau 3.2 sous forme de limites de dimensions. Par exemple, pour qu'un salmonidé puisse emprunter la passe, il est nécessaire que les bassins aient une longueur minimale de 2,5 m et une profondeur minimale de 1 m, ce qui est le cas de la future passe de Rivière. Pour que les ablettes et les chabots y aient accès aussi, la chute entre bassin doit être de 20 cm. Cette valeur de chute est préconisée pour les ablettes, tandis qu'elle est requise pour le franchissement des chabots. Or, le critère piscicole retenu pour la passe à poisson de Rivière propose une chute entre bassins de 30 cm, supérieure à la limite fixée par Baudoin et al. (2014). Il est donc possible que les ablettes et les chabots ne soient pas capables de remonter l'échelle à poisson.

Penchons-nous à présent sur le modèle réduit qui a été construit pour une échelle géométrique de 1/5. Le schéma de la vue en plan (figure 3.5) montre la géométrie globale du modèle. Ce dernier est constitué des principaux éléments suivants : six bassins (sur le schéma, de 1. à 6.) dont uniquement les trois derniers ont une géométrie standard, puis un bassin aval (0.).

TABLE 3.3 – Valeurs cibles pour la conception de la passe à poisson de Rivière (sur la Meuse belge) respectant les critères d’acceptabilité piscicole recommandés par la Direction des Études Techniques (Zorzan, 2016)

Critère	Prototype	Modèle
Débit total Q_t	$> 2,50 \text{ m}^3/\text{s}$	$> 0,045 \text{ m}^3/\text{s}$
Chute ΔH_e au droit du seuil à l’entrée	$\leq 20 \dots 25 \text{ cm}$	$\leq 4 \dots 5 \text{ cm}$
Débit dans la passe Q_p	$\sim 0,50 \text{ m}^3/\text{s}$	$\sim 0,008 \text{ m}^3/\text{s}$
Chute ΔH_b entre bassin	$\leq 30 \text{ cm}$	$\leq 6 \text{ cm}$
Puissance dissipée p	$< 130 \text{ W/m}^3$	58 W/m^3
Vitesse de pointe maximale V_{max}	$\leq 1 \text{ m/s}$	$0,45 \text{ m/s}$
Vitesse moyenne maximale V_{moy}	$\leq 0,25 \dots 0,30 \text{ m/s}$	$\leq 0,13 \text{ m/s}$

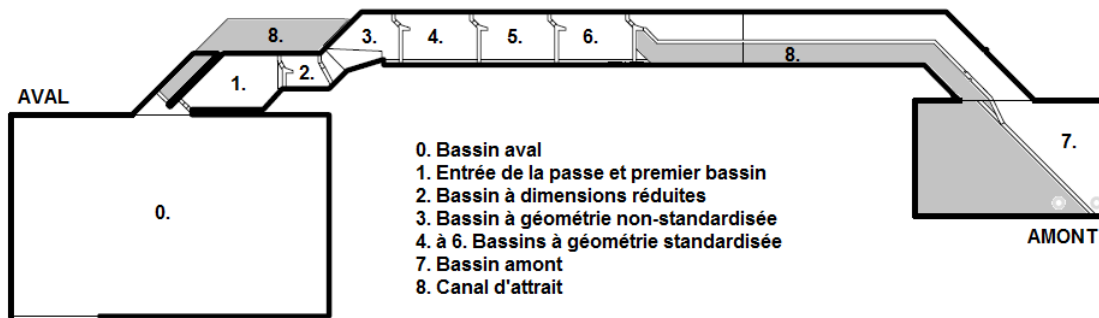


FIGURE 3.5 – Vue en plan de la géométrie du modèle réduit de la passe de Rivière

et un bassin amont (7.), représentant respectivement les biefs aval et amont de la Meuse. Notons que le canal d’attrait (8.) se situe en partie sous les bassins. L’annexe A.3 contient un plan plus détaillé avec les dimensions exactes du modèle de la version définitive construite à Châtelet.

Précisons cependant que le deuxième bassin de la passe en partant de l’aval (2.) sera en réalité de dimension plus grande sur le prototype prochainement aménagé à Rivière. Les modifications de la partie aval de la passe qui sont survenues lors de la conception du modèle ont eu pour conséquence d’allonger légèrement la passe du côté aval. La modification de la maçonnerie étant un travail coûteux, les concepteurs ont préféré réduire artificiellement la taille du second bassin. Cela modifie évidemment l’écoulement au sein du modèle réduit et peut par conséquent avoir un impact important sur la franchissabilité de ce bassin.

3.2.2 Respect des lois de similitudes

Modèle réduit

Construire un modèle réduit facilite la prise de mesures et la détermination des modifications à apporter. Il est toutefois nécessaire de s'assurer que les résultats obtenus sur le modèle sont transposables au prototype. Les règles de similitudes entre les deux écoulements doivent par conséquent être respectées.

Pour comprendre la loi d'échelle, il faut remonter aux bases de la mécanique des fluides, en commençant par les équations différentielles de Navier-Stokes qui gouvernent les écoulements. L'équation de la quantité de mouvement exprimée de façon adimensionnelle peut s'écrire de la façon suivante (Reggio, 2014) :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\mathbf{Eu} \vec{\nabla} p + \frac{1}{\mathbf{Fr}^2} + \frac{1}{\mathbf{Re}} \nabla^2 \vec{V} \quad (3.2.1)$$

où les termes écrits en gras sont des nombres sans dimension, chacun lié aux forces principales agissant sur le fluide. Le nombre d'Euler (**Eu**) est lié à la pression, le nombre de Froude (**Fr**) est lié à la force de pesanteur et celui de Reynolds (**Re**) est lié à la viscosité du fluide, c'est-à-dire au frottement.

Respecter la similitude dynamique entre les écoulements implique que les forces appliquées aux points homologues du modèle réduit et du prototype soient de direction et de sens identiques. De même, le rapport des normes des deux vecteurs de force doit être constant. En théorie, cela se traduit par une égalité entre le modèle et le prototype pour chaque nombre adimensionnel présenté dans l'équation 3.2.1. Il est cependant impossible de satisfaire tous ces critères de similitudes simultanément. Cela nécessiterait par exemple des champs de pesanteurs distincts.

La solution est d'avoir recours à une similitude partielle en déterminant la force prédominante de l'écoulement. Cela permet de décider quel nombre adimensionnel garder. Les autres seront négligés. Dans le cas d'écoulement à surface libre, c'est la force de pesanteur qui est prépondérante (Reggio, 2014). Il faudra donc respecter la similitude de Froude, qui s'exprime comme suit :

$$Fr = \frac{V_1^2}{D_1 \cdot g} = \frac{V_2^2}{D_2 \cdot g} \quad (3.2.2)$$

où D et V sont respectivement une dimension linéaire et une vitesse, caractéristiques de l'écoulement, et g est l'accélération de pesanteur.

À partir de cette équation de similitude de Froude et en fixant le rapport d'échelle géométrique $\lambda_L = \lambda$, il est possible d'exprimer les autres grandeurs en fonction de cette dernière valeur λ . Ces expressions sont reprises dans le tableau 3.4.

Le respect de contraintes technologiques (capacité de pompage, espace disponible) et l'exactitude de la modélisation (effets parasites dus aux forces de tensions de surface doivent rester négligeables) ont conduit au choix du rapport d'échelle $\lambda = 1/5$. Cette échelle permet d'atteindre des vitesses suffisantes pour assurer un écoulement turbulent.

Le tableau 3.4 présente les grandeurs caractéristiques principales de la passe et leurs valeurs pour le prototype et le modèle réduit.

TABLE 3.4 – *Rapports d'échelle et dimensions principales caractéristiques de la passe à poisson de Rivière (en Meuse belge) (Zorzan, 2016)*

Échelle		Grandeur	Prototype	Modèle
Longueur	$\lambda_L = 1/5$	Longueur échelle	50 m	10 m
		Chute totale ΔH_t	2,05 m	0,41 m
		Largeur échancrure	0,30 m	0,06 m
Débit	$\lambda_Q = (1/5)^{5/2}$	Débit total Q_t	2,50 m ³ /s	0,045 m ³ /s
Vitesse	$\lambda_V = (1/5)^{1/2}$	Vitesse de pointe V_{max}	1,00 m/s	0,45 m/s
Puissance dissipée p	$\lambda_p = (1/5)^{1/2}$	Puissance dissipée p	130 W/m ³	58 W/m ³

Matériel vivant

En travaillant avec un modèle réduit, il va de soi que pour la validité de l'étude, la taille des poissons doit également être adaptée. La solution est d'utiliser des juvéniles au lieu de poissons adultes. C'est cette dernière catégorie qui est généralement ciblée (pour les espèces sur lesquelles nous nous concentrons dans ce travail) lors de la conception de la passe. Les deux critères permettant de calibrer la longueur des poissons que nous allons utiliser lors des expériences sont les suivants :

- **La taille du poisson doit être adapté à l'environnement du modèle réduit.** Le modèle réduit a des dimensions à échelle 1/5 par rapport au prototype. Par exemple, les échancrures ont une ouverture de seulement 6 cm, au lieu de 30 cm sur le prototype. Le choix des poissons se fait donc de façon à ce qu'ils soient suffisamment petits pour pouvoir passer les échancrures et que leur notion de l'espace soit conservée dans les bassins.
- **Les capacités de nage du poisson doivent être adaptées aux vitesses de l'écoulement au sein du modèle réduit.** Les poissons juvéniles, à cause de leur plus petite taille, ont des capacités de nage inférieures aux adultes. Il est nécessaire de choisir des

poissons dont les capacités au sein du modèle réduit soient représentatives des capacités des poissons adultes dans le prototype, car ce sont surtout les adultes reproducteurs qui empruntent les passes à poisson en montaison. Les difficultés et facilités rencontrées doivent être comparables.

Prenons le même rapport d'échelle pour définir la taille des poissons que celui utilisé pour créer le modèle réduit, c'est-à-dire, $\lambda = 1/5$. Cela permet de parfaitement respecter le critère de taille. Afin de respecter également le deuxième critère, il faut idéalement s'assurer que le rapport d'échelle mettant en relation les capacités de nage de poissons juvéniles et adultes soit le même que celui définissant la vitesse dans le modèle réduit. Pour rappel, ce dernier rapport correspondant au lien entre les vitesses d'écoulement du modèle et du prototype est égale à $\lambda^{1/2}$ (voir le tableau 3.4).

La compatibilité des deux critères nécessite donc que la relation liant la taille du poisson et sa capacité de nage (c'est-à-dire les vitesses qu'il peut atteindre) soit de la forme suivante :

$$U = \lambda^{0,5} \cdot C \cdot L \quad (3.2.3)$$

où U [m/s] représente la vitesse du poisson, C est une constante et L [m] est la longueur du poisson.

Deux simplifications vont être faites pour arriver à un résultat se rapprochant de cette dernière équation 3.2.3. Premièrement, nous allons négliger les effets du sous-développement physiologique du poisson juvénile par rapport à un poisson adulte. Seule la différence de longueur sera prise en compte. Deuxièmement, le développement sera réalisé à partir de l'expression de la vitesse maximale de croisière. Les autres vitesses caractéristiques des poissons ne seront pas étudiées.

Pour rappel, une équation empirique liant la taille du poisson à sa vitesse maximale de croisière (équation 2.5.2) a été développée au chapitre précédent :

$$U_{mc,L} = 1,3898 \cdot L^{0,562} \quad (3.2.4)$$

En considérant une longueur $l = 1/5 \cdot L$ à échelle réduite, nous obtenons :

$$U_{mc,l} = 1,3898 \cdot ((1/5) \cdot L)^{0,562} = (1/5)^{0,562} \cdot 1,3898 \cdot L^{0,562} \quad (3.2.5)$$

Cette dernière équation a la même forme que celle recherchée (équation 3.2.3). La différence se trouve dans l'exposant qui vaut 0,562 au lieu de 0,5. Cela se traduit par le fait que les capacités de nage des poissons pris à échelle géométrique $\lambda = 1/5$ seront légèrement inférieures aux capacités de nage des poissons adultes par rapport aux écoulements expérimentés respectifs. La courbe illustrant la vitesse maximale par rapport à la vitesse de croisière, présentée dans le chapitre précédent (figure 2.9), indique que l'équation la définissant présente des exposants encore plus

grands. Les résultats que nous obtiendront avec nos poissons juvéniles correspondront donc à une borne inférieure des résultats attendus avec les adultes.

Pour conclure, vu la faible différence qu'il y a entre les rapports d'échelle correspondant aux vitesses des poissons et aux vitesses de l'écoulement, il est acceptable de travailler avec des poissons juvéniles respectant l'échelle géométrique $\lambda = 1/5$.

3.2.3 Description de l'écoulement

La modélisation de l'écoulement de la future passe à poisson de Rivière a fait l'objet d'une étude réalisée par Adeline Bagnée et Jean-Christophe De Greef lors de l'année académique 2013-2014 : *Modélisation numérique de l'écoulement d'une échelle à poisson*. Cette section reprend les démarches et les résultats utiles de ce travail de fin d'études.

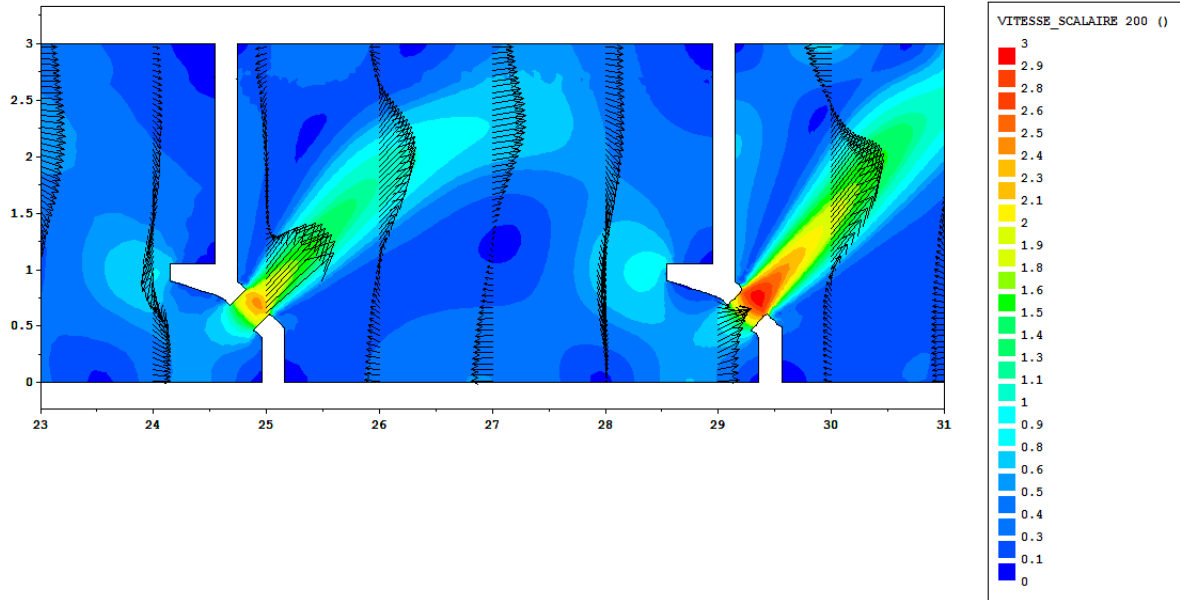


FIGURE 3.6 – Modélisation en deux dimensions (*k-epsilon*) des vitesses scalaires, exprimée en m/s, de l'écoulement au sein du bassin 4. Valeurs calculée pour le prototype. Les distances sont données en mètres. L'amont se trouve à gauche. (Bagnée & De Greef, 2014)

La modélisation numérique a été réalisée grâce au logiciel *TELEMAC*. C'est un logiciel de résolution d'équations issues de la mécanique des fluides par la méthode des éléments finis qui est adaptée pour simuler des écoulements à surface libre. Différents modèles permettent de modéliser un écoulement turbulent. Chacun fournit une expression différente pour le terme de viscosité ν_t . Plusieurs de ces modèles ont été comparés. Les résultats les plus concluants ont été obtenus grâce à la modélisation en deux dimensions avec le modèle *k-epsilon* (où *k* représente l'énergie cinétique turbulente et ϵ sa dissipation). En parallèle à la modélisation numérique, des mesures de vitesses et de pression ont été faites sur le modèle réduit afin de valider ou de trouver les failles

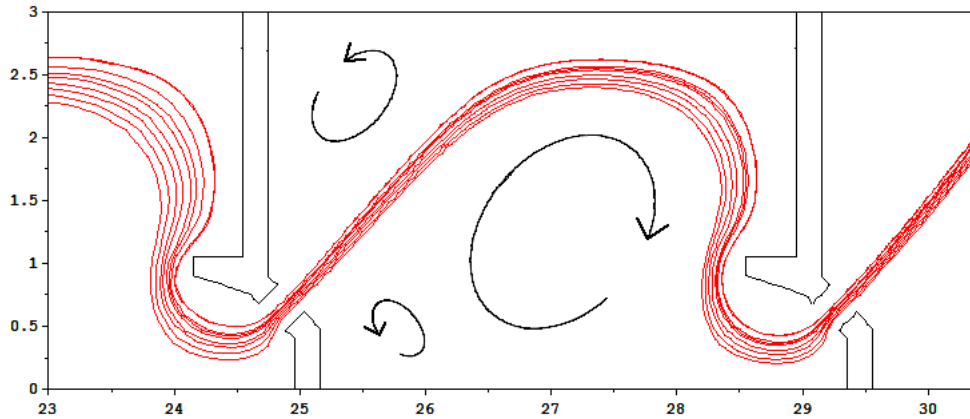


FIGURE 3.7 – Mise en évidence des zones de recirculation et des lignes de courant principales dans le bassin 4. Les distances sont données en mètres. L'amont se trouve à gauche. (Baugnée & De Greef, 2014)

des résultats obtenus numériquement. Cela a permis de mettre en évidence que la modélisation tend à surestimer la dissipation de l'écoulement, ce qui fournit des vitesses scalaires légèrement inférieures à la réalité. De plus, les zones situées dans les coins et près des discontinuités sont aussi des sources d'erreurs. La figure 3.6 montre les résultats de la modélisation $k-\epsilon$ de la vitesse scalaire au sein d'un bassin, tandis que la figure 3.7 montre les zones de recirculation ainsi que les lignes de courant principales.

Rappelons que cette modélisation représente les vitesses d'écoulement au sein du prototype. Selon la figure 3.6, ces vitesses sont de l'ordre de 2 à 2,5 m/s dans les échancrures et peuvent monter jusqu'à 3 m/s. La vitesse moyenne présente des valeurs entre 1 et 1,5 m/s tandis que les vitesses tombent à 0,3 m/s dans les zones de recirculation. Le tableau 3.5 récapitule ces vitesses et donne la conversion pour le modèle réduit en suivant le rapport d'échelle $\lambda^{1/2}$.

En comparant ces valeurs aux critères piscicoles admissibles (tableau 3.3), les vitesses maximales obtenues par la modélisation semblent excessivement grandes. Il faut cependant se rappeler que les critères ont été formulés uniquement pour les vitesses au sein des bassins et non dans les échancrures. Ce choix peut d'ailleurs être remis en question car il semble peu judicieux. Effectivement, Godinez et al. (2014) affirme qu'un des critères principaux pour le dimensionnement efficace d'une passe est de tenir compte des capacités de nage des poissons à travers les sections de vitesses maximales. C'est une limitation absolue, vu que si le poisson ne réussit pas à franchir les échancrures, il ne pourra pas remonter l'échelle.

Des mesures de vitesses à la surface de l'écoulement ont été faites sur le modèle réduit du laboratoire de Châtelet. L'ordre de grandeur des vitesses maximales enregistrées sont en réalité de l'ordre de 0,50 à 0,60 m/s dans le courant principal (Zorzan, 2016). Cela reste toutefois supé-

TABLE 3.5 – Vitesses scalaires caractéristiques de l'écoulement découlant de la modélisation numérique de l'écoulement de la future passe à poisson à fentes verticales de Rivière (Meuse belge) et de son modèle réduit à échelle 1/5 (Châtelet, Belgique)

	Vitesses prototype	Vitesses modèle
Vitesses maximales (échancrures)	De 2 à 3 m/s	De 0,89 à 1,34 m/s
Vitesses moyennes (échancrure et bassin)	De 1 à 1,5 m/s	De 0,44 à 0,67 m/s
Vitesses minimales (bassin)	0,3 m/s	0,13 m/s

rieur aux prescriptions piscicoles $V_{max} \leq 0,45$ m/s. En considérant que les vitesses subaquatiques sont plus faibles qu'à la surface, nous pouvons conclure que le modèle respecte tout de même les critères admissibles (Zorzan, 2016).

Matériels et méthodes

co-écrit par Estelle Courtois et Loïc Van Audenhaege

Ce chapitre décrit le matériel et les lots de poissons utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale et le traitement informatique des données.

4.1 Matériels

4.1.1 Matériels d'acquisition des données

Système RFID

Le système RFID (*Radio Frequency IDentification*) est un système électromagnétique de détection de tags. Les antennes ont été fournies par la société *Profish Technology* (Naninne, Belgique) tandis que les PIT tags (HF PIT Tags, 12 mm) ont été livrés par la société *Oregon RFID* (Oregon, États-Unis). Dans le cadre de cette étude, le système RFID permet de suivre le parcours réalisé par les poissons dans le modèle réduit grâce à la détection électromagnétique de tags insérés préalablement dans poisson. Le fonctionnement de ce dispositif est expliqué ci-dessous.

Une antenne située à un endroit connu va émettre une pulsation électromagnétique à intervalle régulier connu. Cette antenne est placée de manière à ne pas perturber l'écoulement (figure 4.1).

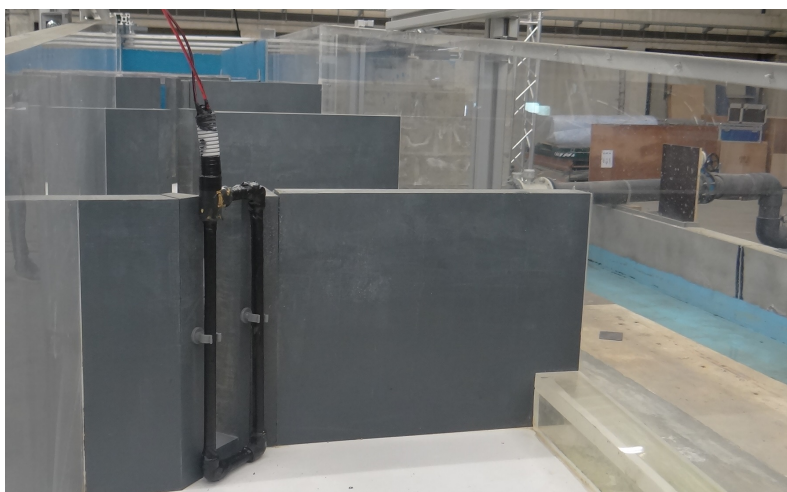


FIGURE 4.1 – Photo illustrant la disposition d’une antenne à la sortie d’une échancrure

Les tags situés à proximité vont alors réfléchir le signal et y répondre. Dans ce cas d’étude, ce sont des tags passifs qui ont été utilisés (Passive Information Transponder tag aussi appelé PIT tag). Ces derniers ont une longueur de 12 mm. La photo 4.2 compare un de ces PIT tags à une pièce de 5 centimes d’euro.



FIGURE 4.2 – Photo d’un PIT tag

Les PIT tags ont été insérés dans des saumons, des chevesnes et quelques chabots au Conservatoire du saumon mosan (CoSMos) du Service Public de Wallonie. Selon Bruyndoncx et al. (2002), étant donné la taille du matériel expérimental, l’insertion du PIT tag se fait en incisant la face ventrale des poissons sur 3 mm. La position de l’incision dépend néanmoins fortement des caractéristiques anatomiques spécifiques. Le mode opératoire complet se trouve en annexe page 185. Il est important de rappeler que l’utilisation de ce type de système est intrusive pour l’animal.

Chaque poisson possède un PIT tag avec un identifiant de détection qui va permettre de le différencier des autres poissons du lot utilisé. Lorsque le poisson est détecté, il sera possible de connaître l’endroit de détection grâce au numéro de l’antenne ainsi que l’heure de détection. Ces informations sont alors stockées dans un datalogger depuis lequel seront téléchargées les données.

De plus, une analyse des perturbations dues à des champs magnétiques à proximité a été réalisée avec l'entièreté des pompes allumées. Aucun bruit ayant un effet parasite n'a été détecté.

Système caméra

Quatre caméras scientifiques (*Marlin F-131B* (1stVision, Andover, Canada)) ont été placées à des endroits stratégiques permettant de capturer des images de la passe sous différents angles. Ces dernières sont utilisées pour collecter des informations visuelles concernant le comportement des poissons à l'intérieur de la passe. Les images sont toutes prises à une fréquence de 15 fps (frames per second). Le champ de vision de chaque caméra est décrit dans la section décrivant le protocole des expériences. La disposition exacte ainsi que les paramètres optiques sont donnés en annexe B.2. Cette méthode d'acquisition de données n'est pas intrusive contrairement au système RFID.

Un ordinateur ainsi qu'un disque dur externe sont utilisés afin de stocker les images prises par l'intermédiaire du programme *MetaCAM* (Metamation).

Néanmoins, en raison de la turbulence des courants et des remous provoqués en surface, il aurait été difficile de traiter les images, car causant des phénomènes de réflexion et de diffraction. Par conséquent, des plaques de plexiglas ont été installées sur la surface de l'eau des bassins filmés. Le but est d'écraser la surface de l'eau (en évitant cependant de modifier l'écoulement) afin d'annihiler ces phénomènes altérant la perception des images. L'effet de ces plaques est illustré par les figures 4.3.

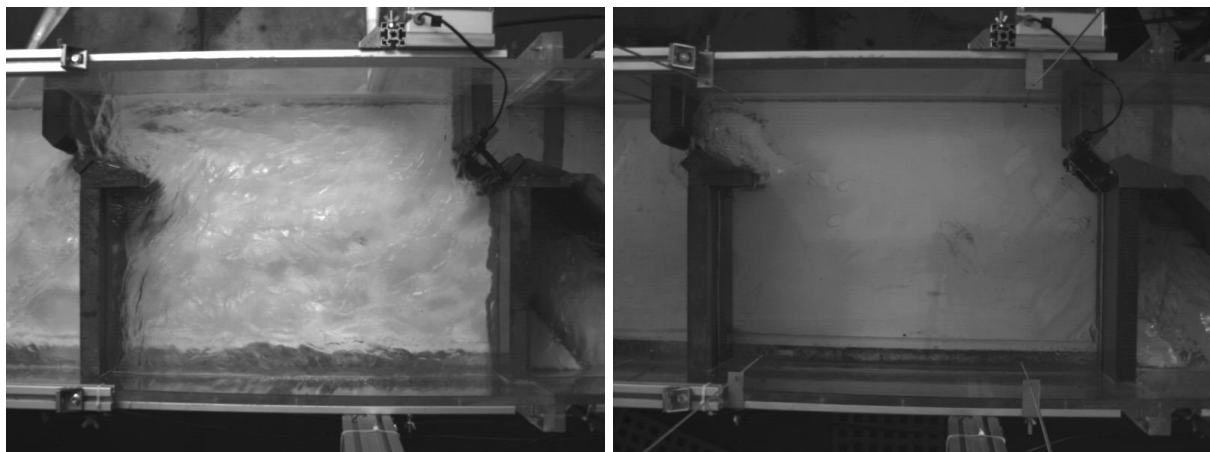


FIGURE 4.3 – Photos illustrant le gain en terme de qualité d'image grâce à l'écrasement de la surface d'eau par une plaque de plexiglass (à gauche, sans plaque ; à droite, avec plaque)

Cependant, la turbulence prononcée de l'écoulement, la présence d'une chute d'eau partielle à chaque échancrure et l'inconstance relative des débits se génèrent une oscillation de la hauteur d'eau. En conséquence, il subsiste parfois des coulées et des éclats d'eau sur la plaque ainsi que

des bulles stagnant sous la plaque, car forcées à s'engouffrer sous celle-ci à cause de la chute d'eau à l'échancrure amont.

4.1.2 Matériel vivant

Cette section présente les caractéristiques spécifiques des poissons utilisés. Les lister est important. En effet, certaines caractéristiques apportent un éclairage quant à la compréhension du comportement des poissons durant les expérimentations. Cela permet en outre d'appréhender au mieux certaines sources d'erreurs.

De plus, la mise en relation de la longueur et du poids du poisson donne une idée de leur état physiologique et de leur capacité de nage. Cette corrélation se réalise par une régression de type puissance ($y = a.x^b$) (Rollin, 2017, comm. pers.) optimisant la somme des carrés des résidus entre les mesures réalisées avec la taille en abscisse (x) et le poids en ordonnée (y). En partant de l'hypothèse que les facteurs ajustant la régression (a et b) sont propres à une espèce donnée, il est possible de comparer les gabarits des individus utilisés pour juger de la représentativité morphologique du lot par rapport à des coefficients pour des populations sauvages trouvés dans la littérature. Cette opération est réalisée à l'aide du programme *Excel* (Microsoft, Washington, États-Unis).

En annexe est présenté le tableau B.1 qui synthétise les valeurs des coefficients trouvées dans la littérature scientifique. Ces valeurs sont intéressantes car elles vont permettre de confronter nos données à des valeurs tendancielle, résultats d'une compilation de données, afin de vérifier la représentativité du lot utilisé.

Par ailleurs, dans le cadre d'une analyse comportementale, il est nécessaire de connaître l'âge des poissons. Des indicateurs déterminés grâce à la littérature permettent d'estimer l'âge d'un poisson. La catégorisation en classes d'âge selon des intervalles de taille va être utilisée. L'interprétation de ces tableaux nécessite la lecture de la section 2.4.3.

Enfin, les intervalles de vitesse sont calculés à partir du modèle basé sur les données collectées par Katopodis et Gervais (1991) présenté à la section 2.5.2. En outre, rappelons que la pertinence des bornes des intervalles a été discutée pour chaque espèce dans la section 2.6. Il n'est en effet pas nécessaire de considérer l'intervalle complet des vitesses expérimentales collectées par Katopodis et Gervais (1991).

Les vitesses de nage présentées dans la présente section sont déterminées par la procédure suivante.

- Dans le cas d'un intervalle des vitesses prenant en compte les extrema, les tailles minimale et maximale sont utilisées pour déterminer les bornes inférieure et supérieure de vitesse respectivement.
- Dans le cas d'un intervalle de vitesse prenant en compte la valeur moyenne, les bornes inférieure ou supérieure de vitesse sont déterminées à l'aide de la taille moyenne du lot.

Les saumons (*Salmo salar*)

Dans le cadre du projet wallon Meuse Saumon 2000, des saumons atlantiques adultes en montaison prélevés dans les passes mosanes sont reproduits au Conservatoire du saumon mosan à Érezée. Les saumons juvéniles sont élevés en vue d’une réintroduction pour restaurer la présence de ce salmonidé.

Avant d’arriver au hall d’essais, les 20 saumons juvéniles sont marqués à l’aide de PIT tags. Leur poids et longueur sont mesurés à cette occasion. Le graphe 4.4 représente le poids en fonction de la taille ainsi que la régression associée ($y = a.x^b$).

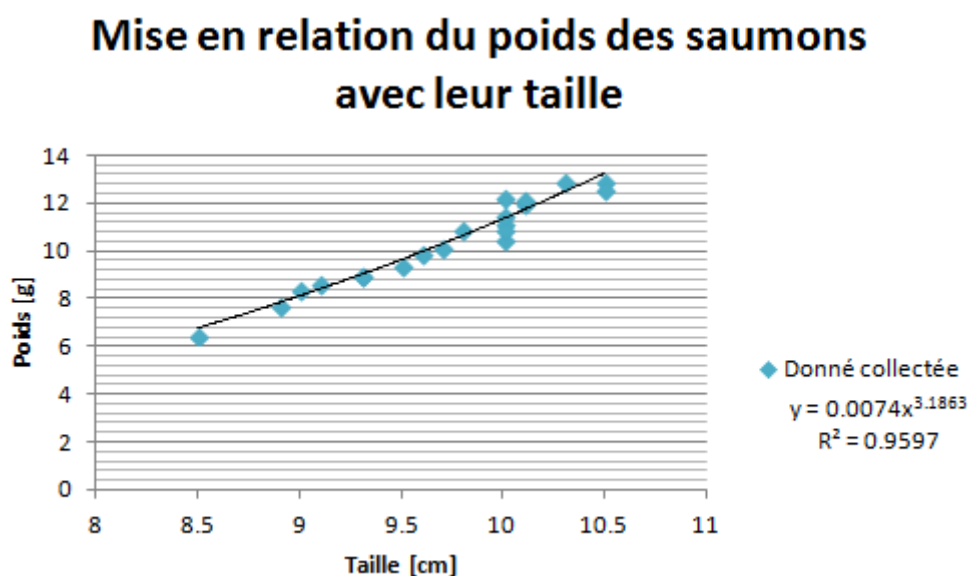


FIGURE 4.4 – Figure mettant en relation la taille et le poids des saumons utilisés

En comparant les valeurs des coefficients de la régression avec celles trouvées dans la littérature (tableau B.1 en annexe), il semble subsister une légère différence entre la relation taille-poids des saumons utilisés et la tendance observée dans la nature. Etant donné la valeur très élevée du R^2 (0,96), nous considérons cependant l’échantillon comme représentatif de la réalité de terrain. Ce constat est appuyé par le fait que les différences avec les valeurs de coefficients de la littérature restent très faibles selon le tableau B.1.

A partir des données de taille et du modèle de Arlinghaus-Wolter présenté à la section 2.6.1, les intervalles de vitesses peuvent être déterminés et sont présentés dans le tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Tableau des vitesses maximales et maximales de croisière modélisées pour les saumons utilisés

Données de taille Considérée	Borne	Vitesse maximale [m/s]	Vitesse maximale de croisière [m/s]
Extrema	Supérieure	1,2	0,35
	Inférieure	1,85	0,65
Moyenne	Supérieure	1,32	0,38
	Inférieure	1,75	0,58

Rappelons que les bornes inférieure et supérieure sont la délimitées par la régression optimale du modèle et la limite supérieure de l'intervalle expérimental respectivement et conformément au raisonnement expliqué à la section 2.6.1.

Notons que les saumons d'élevage engagés dans l'expérience sont des individus 0+.

Les ablettes communes (*Alburnus alburnus*)

Le choix d'utiliser des ablettes communes a été motivé par deux raisons.

D'une part, la caractéristique de grégarité est un critère assez intéressant dans le choix d'utiliser cette espèce. En effet, les espèces généralement introduites dans un modèle réduit sont plutôt territoriales et solitaires. Il faudra donc s'intéresser à cette caractéristique et sur son influence au niveau expérimental.

D'autre part, à notre connaissance, aucune expérimentation en modèle réduit n'a été réalisée avec des ablettes communes.

Un banc de 78 ablettes communes a été prélevé dans la passe à poisson de Lixhe le 23/09/2016. Les poissons ont été conservés au Conservatoire du saumon mosan à Érezée. Étant sauvages, les ablettes n'étaient pas stimulées par la nourriture proposée. De plus, leur fragilité a obligé à restreindre au maximum les manipulations à l'épuisette.

Le graphe 4.5 représente le poids en fonction de la taille ainsi que la régression associée ($y = a.x^b$). Étant donné la petite taille et la fragilité des ablettes prélevées, il n'a pas été possible de les PIT taguer.

Mise en relation du poids des alettes avec leur taille

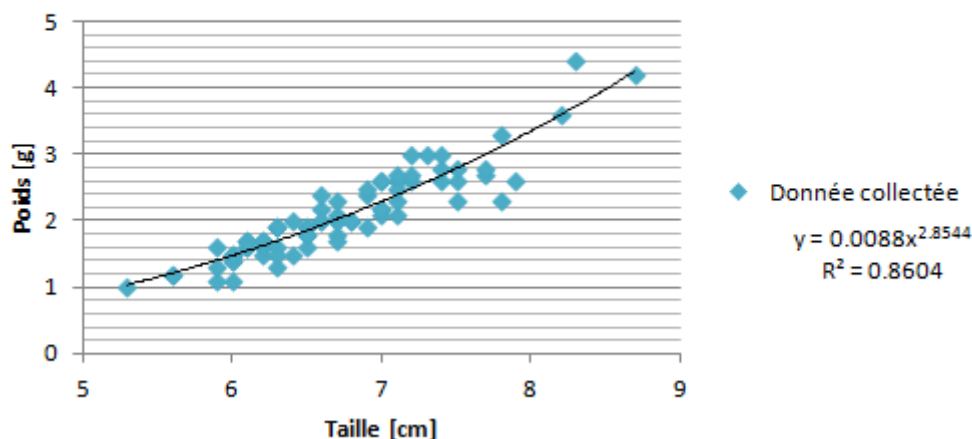


FIGURE 4.5 – Figure mettant en relation la taille et le poids des alettes utilisées

Les valeurs de taille des alettes utilisées étant très proches des valeurs répertoriées dans la littérature dans le tableau B.1, l'échantillon utilisé a donc été validé et considéré comme représentatif car comparable à un échantillon typique que l'on pourrait prélever dans la nature. Remarquons que la croissance allométrique est négative ($n < 3$).

Le tableau 4.2 présente les résultats calculés à l'aide du modèle défini grâce aux données collectées par Katopodis et Gervais (1991).

TABLE 4.2 – Tableau des vitesses maximales et maximales de croisière modélisées pour les alettes utilisées

Données de taille Considérée	Borne	Vitesse maximale [m/s]	Vitesse maximale de croisière [m/s]
Extrema	Supérieure	0,88	0,27
	Inférieure	1,63	0,54
Moyenne	Supérieure	1,03	0,3
	Inférieure	1,37	0,47

Pour rappel, les extremas des vitesses sont définis par la régression optimale comme borne inférieure et par la limite expérimentale supérieure de l'intervalle comme borne supérieure conformément au raisonnement explicité à la section 2.6.2.

Pour déterminer l'âge du lot étudié, la classification présentée ci-dessous a été employée (Pollux et al., 2006).

TABLE 4.3 – Classes d'âge des ablettes selon leur taille

	Stade larvaire	0+ juvénile	1+ juvénile	Adulte jeune	Grand adulte
Intervalle de taille [cm]	0,5 - 1,4	1,5 - 5,5	5,6 - 8,5	8,6 - 15	15,1 - 25

Selon ce tableau, le lot étudié est majoritairement représenté par des ablettes juvéniles âgées entre 1 et 2 ans maximum. Elles ne devraient donc pas encore être sexuellement matures.

Les chevesnes (*Squalius cephalus*)

Le choix d'utiliser des chevesnes peut être justifié par deux raisons.

Premièrement, le caractère grégaire est un critère intéressant. En effet, les espèces généralement introduites dans un modèle réduit sont plutôt territoriales et solitaires. Il faudra donc s'intéresser à cette caractéristique et sur son influence expérimentale. Il serait d'autre part intéressant de mieux comprendre si le degré de grégarité varie entre les chevesnes et les ablettes communes. Deuxièmement, à notre connaissance, une seule expérimentation a déjà été réalisée avec des chevesnes en modèle réduit (Cornu et al., 2012). Il pourrait donc être intéressant de déterminer si cette étude est comparable avec la nôtre.

Les 130 chevesnes utilisés proviennent d'un lot d'œufs fécondés par des individus sauvages de la Meuse dans le cadre d'une étude du développement des larves et des chevesnes juvéniles par lecture des otolithes¹. L'éclosion des œufs a eu lieu six jours après la fécondation, le 16/05/2016. L'élevage des chevesnes aux états larvaire et juvénile a été réalisé au CEFRA (ULg) à Tihange avec une température de 23 °C en moyenne.

Il est important d'ajouter qu'une absence d'opercules a été constatée sur un grand nombre d'individus.

À nouveau, la régression de la relation taille-poids ($y = a \cdot x^b$) a été établie. Dans la littérature, les valeurs prises par les coefficients sont présentées en annexe dans le tableau B.1.

1. Concrétions calcaires dans les saccules de l'oreille des poissons osseux. Ces os montrent fréquemment des anneaux ou stries de croissance quotidiennes, saisonnières ou annuelles, qui peuvent être utilisées pour déterminer l'âge des poissons. (Vetofish, 2017)

Mise en relation du poids des chevesnes avec leur taille

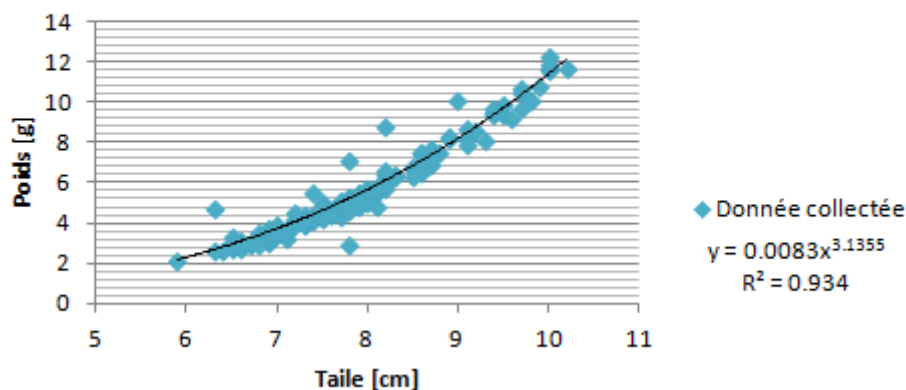


FIGURE 4.6 – Figure mettant en relation la taille et le poids des chevesnes utilisés

Étant donné la faible différence entre les résultats expérimentaux et ceux de la littérature, le lot utilisé peut être considéré comme représentatif du milieu naturel du point de vue de la relation taille-poids.

20 premiers individus ont d'abord été PIT tagués et, étant donné que le taux de mortalité était nul après une semaine, 110 autres ont ensuite été PIT tagués.

Le tableau 4.4 présente les données de vitesses calculées pour les chevesnes selon les intervalles de vitesse définis à la section 2.6.3.

TABLE 4.4 – Tableau des vitesses maximales et maximales de croisière modélisées pour les chevesnes utilisés

Données de taille Considérée	Borne	Vitesse maximale [m/s]	Vitesse maximale de croisière [m/s]
Extrema	Inférieure	0,94	0,28
	Supérieure	1,81	0,6
Moyenne	Inférieure	1,15	0,33
	Supérieure	1,53	0,52

Pour rappel, les spécimens du lot étaient des individus 0+, allant devenir des individus 1+.

Les chabots (*Cottus gobio*)

À notre connaissance, cette espèce n'a jamais été étudiée dans des modèles réduits de passe à poissons. Placer des chabots dans un modèle réduit pourrait donc être très instructif pour mettre en avant les obstacles que rencontrent les poissons benthiques au contraire des poissons

pélagiques dans ce type de passe.

De plus, étudier le comportement de remontée des chabots pourrait être très instructif étant donné que peu voire pas d'études se sont focalisées sur le mécanisme de montaison de ce type de passes.

Les chabots ont été capturés par pêche électrique dans l'Orne à Court-Saint-Etienne (Belgique) le 14/02/17 par les préposés forestiers du Service de la pêche (DNF) du Service Public de Wallonie.

Les caractéristiques de poids et de taille ont été utilisées afin de caractériser la représentativité naturelle du lot étudié. Il est important de remarquer qu'il peut subsister un biais dans ces mesures car les femelles sont bien plus petites que les mâles (Crisp, Mann, 1991) et, durant la période de reproduction qui coïncide avec la période des expérimentations, le rapport poids/taille augmente considérablement pour ces dernières comparativement aux mâles. Selon FishBase (2014) et Treer et al.(2008), les coefficients sont assez similaires à ceux obtenus pour des populations sauvages selon le tableau B.1. Cela confirme la représentativité du lot pêché.

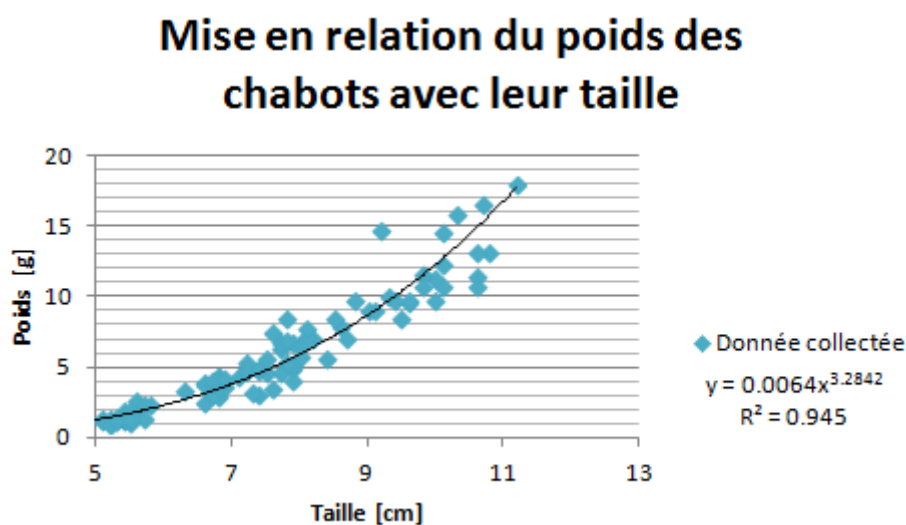


FIGURE 4.7 – Figure mettant en relation la taille et le poids des chabots utilisés

Les vitesses caractéristiques théoriques du chabot sont présentées dans le tableau 4.5.

TABLE 4.5 – Tableau des vitesses maximales et maximales de croisière modélisées pour les chabots utilisés

Données de taille Considérées	Borne	Vitesse maximale [m/s]	Vitesse maximale de croisière [m/s]
Extrema	Inférieure	0,47	0,12
	Supérieure	1,45	0,41
Moyenne	Inférieure	0,71	0,17
	Supérieure	1,07	0,32

Rappelons que, le chabot étant théoriquement un mauvais nageur, les valeurs extrêmes de vitesse sont déterminées grâce aux bornes de l'intervalle inférieur des données expérimentales collectées par Katopodis et Gervais (1991).

Pour déterminer l'âge de la population prélevée, la classification taille/âge suivante a été utilisée (Tomlinson & Perrow, 2000, Crisp & Mann, 1991, Smyly, 1995). Il est important de considérer que cette classe d'âge est indicative, car les tailles du chabot varient fortement selon les habitats écologiques et le sexe.

TABLE 4.6 – Classes d'âge des chabots selon leur taille

	0+ juvénile	1+ juvénile	2+ juvénile	3+ adulte
Intervalle de taille [cm]	1 - 4,0/5,0	5,0 - 6,0	6,0 - 8,0	8,0 -

Selon les articles de référence, il n'a pas été possible de déterminer des classes de taille supérieures étant donné la grande variabilité des résultats montrés.

4.2 Méthodes

4.2.1 Bien-être animal

Se soucier du bien-être animal lors d'expérimentations scientifiques est devenu une obligation. Le respect de certaines règles est donc nécessaire. Remarquons que se soucier du bien-être animal est aussi une nécessité expérimentale. Des individus en mauvaise forme risquent en effet de biaiser les résultats. Étant donné que le modèle se trouve dans un laboratoire hydraulique, il a fallu mettre en place un système pour conserver les poissons utilisés. De plus, la qualité de l'eau a été testée.

L'insertion de PIT tags a été réalisée par Yvan Neus, car nous n'étions pas autorisés à réaliser ce type d'opération. Le protocole est présenté en annexe page 185. De même, les pêches électriques ont été réalisées par des professionnels.

Les poissons ont été transportés dans de l'eau de forage à environ 10 °C en provenance d'Érezée, grâce à une cuve de stockage (volume réel d'eau d'environ 120 L) ou grâce à des sacs de transport

(volume d'eau représentant 1/3 du volume du sac). De l'oxygène pur sous pression était ajouté. À leur arrivée, les poissons étaient systématiquement acclimatés. Le sac de transport posé pendant 20 minutes sur l'eau a permis d'équilibrer la température du sac à celle de l'eau du modèle. Ensuite, pendant 90 minutes, à intervalle régulier, de l'eau du modèle a été transférée dans le sac de transport afin d'habituer les poissons aux nouveaux paramètres physicochimiques de l'eau stockée dans le hall d'essais « André Sterling » de la Direction des Recherches Hydrauliques (DGO2) du Service Public de Wallonie.

Une fois les expérimentations terminées, les poissons ont été relâchés dans un habitat correspondant à leurs exigences spécifiques avec l'autorisation du Service de la pêche du Service Public de Wallonie. Ci-dessous se trouve le tableau exposant les lieux de lâchage. Toutes ces localités sont situées en Wallonie, Belgique.

TABLE 4.7 – Rivières et localités de lâchage des espèces utilisées dans le cadre de la présente étude

	Saumons	Ablettes	Chevesnes	Chabots
Rivière	Samson	Sambre	Néthen	Orne
Localité	Ton	Châtelet	Beauvechain	Court-Saint-Etienne

Qualité physicochimique et biologique de l'eau

Avant de pouvoir accueillir des poissons dans le modèle réduit, il est nécessaire de vérifier la qualité de l'eau par respect du bien-être animal.

Une analyse de la qualité de l'eau a été réalisée cette année-là par l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP). Elle a permis de déterminer si les paramètres tant chimiques que biologiques étaient adaptés pour héberger les différentes espèces. Il faut noter que cette eau est conservée dans une cuve en béton située en dessous du laboratoire. Les résultats de l'analyse sont présentés en annexe dans le tableau B.4. Dans ce même tableau sont présentés les normes européennes de qualité des eaux salmonicoles et cyprinicoles (europa.eu, 2006) ainsi que les normes belges de potabilité de l'eau (IECBW, 2016).

En comparant ces données au tableau B.4, les résultats obtenus pour paramètres analysés ne posent aucun problème dans le maintien de poissons dans ces eaux. Rappelons qu'une étude antérieure (Pype, 2015) avait déjà permis de maintenir avec succès des salmonidés dans l'eau provenant du sous-sol du hall d'essais.

La teneur en oxygène est en outre un paramètre clef car certains poissons comme la truite de rivière vivent dans des eaux où l'oxygène est quasiment à saturation. Un test réalisé en octobre a montré que l'oxygène était présent en saturation (± 11 mg/L) dans l'eau convoyée du sous-sol du hall d'essais vers le modèle. Par conséquent et puisque nous pouvons admettre qu'il n'existe quasi aucune activité biologique ni aucune source d'apport organique dans l'eau du modèle et de sa réserve, il semble convenable d'admettre que l'oxygène devrait rester à saturation tout au long de l'année. Ce paramètre n'est pas un problème pour le maintien des poissons et leur bien-être selon les critères de qualité des eaux douces salmonicoles et cyprinicoles (europa.eu, 2016). Il aurait cependant été nécessaire de vérifier cette hypothèse.

D'autre part, selon les résultats présentés en annexe page 186, la charge microbiologique dans l'eau de la réserve est très faible et ne peut donc être un facteur potentiel de contamination. En outre, deux sondes à température (WARANET Solutions SAS, Auch, France) ont été placées dans le modèle dans le but de lier le comportement du poisson à la température de l'eau convoyée dans le modèle. De plus, il est important que la dynamique et les valeurs prises par la température ne puissent affecter la forme du poisson. Les données collectées par les sondes durant les expérimentations sont présentées dans les figures 4.8 A, B et C. Il n'a pas été possible de récolter les données de température avec les sondes durant l'expérimentation avec les saumons.

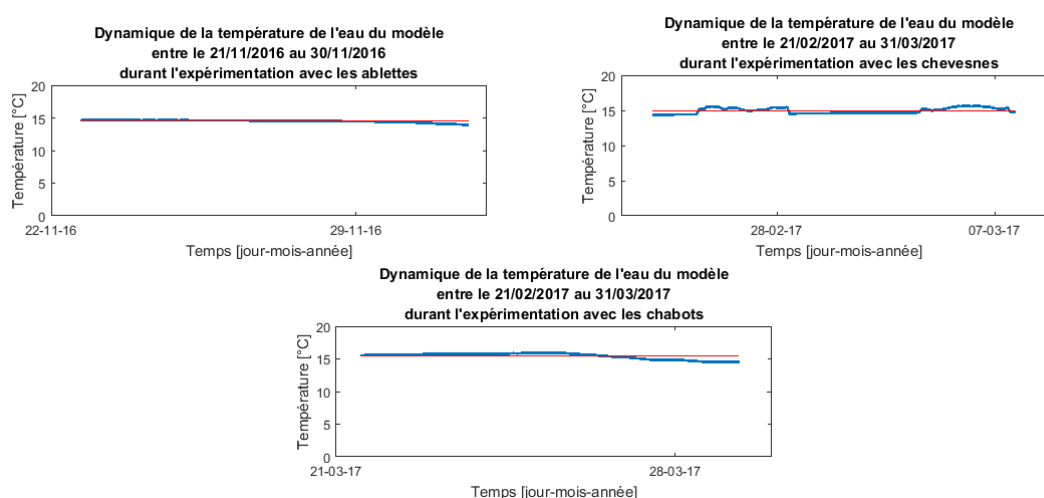


FIGURE 4.8 – Figures présentant l'évolution de la température de l'eau du sous-sol du laboratoire en fonction du temps pour trois expérimentations différentes (A, ablette; B, chevaine; C, chabot) (en bleu, les données de température collectées; en rouge, la température moyenne déterminée à partir de ces températures)

Tout d'abord, remarquons que l'entièreté des valeurs mesurées par les sondes sont exposées en annexe, figure B.2. L'intérêt est de pouvoir appréhender les gammes de température de l'eau du sous-sol si d'autres expérimentations devaient être réalisées à d'autres moments de l'année. La dynamique de la température (Figure 4.8) durant les expérimentations montre une certaine inertie et est donc peu sujette aux variations brusques qui pourraient affecter le poisson. Les figures A, B et C (Figure 4.8) montrent des températures tout à fait acceptables pour l'ichtyocénose (Philippart, 1989).

Bassins de stockage

Les ablettes et les saumons sont initialement stockés dans le bassin aval du modèle ou dans un vivier placé dans un autre modèle. Les pompes étaient allumées en continu afin de pouvoir permettre un renouvellement et un brassage continu de l'eau.

Après la réalisation de l'expérimentation avec les ablettes, trois bassins de stockage de 450 litres ont été disposés à proximité immédiate du modèle réduit.

L'objectif de ces bassins de stockage est de faciliter le stockage et la séparation des lots ainsi que de permettre leur nourrissage.

Un tiers de l'eau de chaque bassin (et plus si le besoin se présentait) était remplacé chaque semaine par de l'eau de la réserve du hall d'essais « André Sterling ». De même, la température de surface de chaque bassin y était relevée lors de notre passage.

Une pompe à air (modèle AL-40, Alita Industries, Inc., Arcadia, États-Unis) a permis l'aération et le brassage de l'eau des bassins de stockage ainsi que du vivier. La pompe à air (entourée de rouge) et les bassins de stockage sont présentés à la figure 4.9.

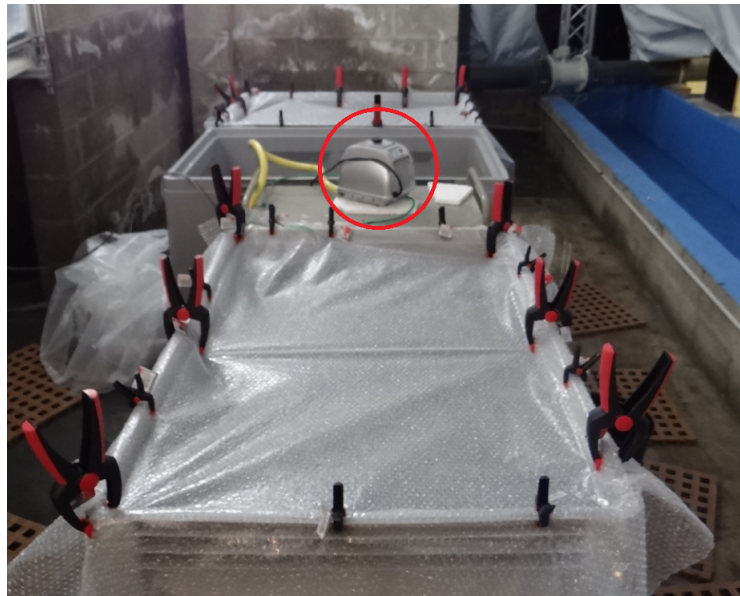


FIGURE 4.9 – Cliché des bacs de stockage. La pompe à air est entourée en rouge

Les bassins étaient recouverts d'une bâche pour éviter aux poissons des sauts hors de l'eau (Figure 4.9). Cette bâche était maintenue grâce à des pinces.

Des pierres ont aussi été placées dans les bassins afin de procurer des cachettes rassurant les poissons. Elles étaient très appréciées des chabots. Les pierres schisteuses (forme aplatie, diamètre de plus de 10 centimètres) et les graviers (forme arrondie, diamètre de plus de 5 centimètres) ont été récoltés dans un dépôt de pierre à proximité du laboratoire. De plus, des tuyaux en PVC ont été découpés dans ce même but. Ces éléments ont disposés de manière à former des zones dans lesquelles la lumière ne pouvait pénétrer afin de procurer des zones de cachette aux poissons stockés.

RFID

Soulignons que l'insertion des PIT tags est une opération chirurgicale. La manipulation doit donc être réalisée par des personnes formées, car l'insertion de PIT tags est intrusif.

Malgré le caractère intrusif de l'insertion des PIT tags, le système RFID a été retenu car aucune technique alternative ne permet de récolter les données attendues. Lorsque la manipulation

représente un danger pour les poissons, la mise en place de PIT tags n'est pas réalisée, comme ce fut le cas pour les ablettes et pour la plupart des chabots. Il est globalement accepté qu'une taille minimale de 5-6 mm est requise pour que le poisson ne soit pas exposé à un risque majeur lors du placement du PIT tag (Knaepkens et al., 2007, Neus Y., 2017, comm. pers.).

L'utilisation de système de caméra aurait permis un respect supérieur du bien-être animal. Toutefois, les techniques de traitement d'image ne permettent pas l'identification de chaque poisson. Développer le traitement d'images pour un suivi individualisé sortait du cadre d'étude de ce mémoire. De plus, les limitations matérielles ne permettaient pas de brancher plus de quatre caméras à l'ordinateur. Ainsi, suivre le parcours du poisson sur l'entièreté de la passe n'aurait donc pas été possible.

Pour terminer, soulignons que le système RFID présente l'avantage de suivre les mouvements des poissons de manière individualisée et représente donc une source de données pertinentes dans le cadre de cette étude.

Photopériode

La photopériode² est un facteur biologique pouvant intervenir dans le mouvement des poissons dans les passes (Katopodis & Gervais, 2012).

Par conséquent, reproduire correctement la photopériode naturelle s'avère une nécessité afin de simuler au mieux les conditions dans lesquelles évoluent les poissons dans la nature.

Premièrement, il a d'abord fallu isoler l'environnement expérimental des influences lumineuses extérieures qui ne sont pas de durée constante chaque jour. Pour ce faire, le modèle a été recouvert d'une bâche noire permettant de limiter l'entrée des rayons lumineux inhérents à l'éclairage du laboratoire. Des armatures en métal ont permis de créer une structure soutenant la bâche qui isole alors l'environnement expérimental. Ensuite, deux spots lumineux LED montés sur pied



FIGURE 4.10 – Vues extérieure et intérieure du modèle après la couverture par la bâche et l'installation des projecteurs

2. Durée quotidienne d'éclairage ou de longueur du jour considérée quant à ses effets sur le développement des organismes animaux et végétaux (Villemin, 1975, cité par Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRS))

ont été installés. L'un s'allumait à 07h30 et s'éteignait à 20h30 tandis que l'autre s'allumait et s'éteignait avec un décalage de 30 minutes (8h00 et 21h00). Le but est de simuler de manière plus précise le coucher et lever du soleil dans la nature.

Néanmoins, l'orientation des projecteurs ne fut pas réalisée au hasard. En effet, celle-ci doit être réalisée de manière à ne pas éclairer directement les objectifs des caméras. En outre, un spot halogène fut placé de manière à augmenter la luminosité afin d'atteindre une qualité d'image exploitable.

4.2.2 Méthodes expérimentales

Dans cette section, les différentes expériences réalisées sont d'abord expliquées selon un principe général. Ensuite, elles sont résumées dans un tableau récapitulatif faisant la distinction entre les manipulations réalisées pour chaque espèce.

Évaluation de la franchissabilité

L'objectif d'une évaluation de la franchissabilité est de quantifier le nombre de remontées et de mettre en évidence les tendances comportementales de montaison.

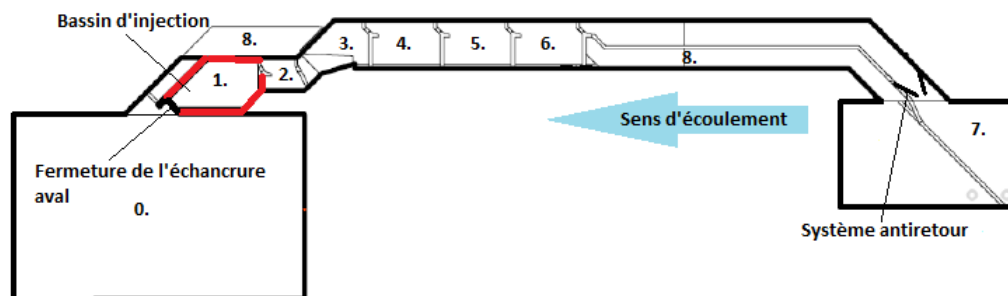


FIGURE 4.11 – Évaluation de franchissabilité : schéma des éléments particuliers du modèle expérimental

Les poissons sont initialement introduits dans le bassin d'injection 1 (figure 4.11). Un délai d'attente a lieu entre l'introduction des poissons et le début de l'expérience. L'ouverture de l'échancrure amont du bassin 1 marque le début de l'expérience pendant laquelle les poissons sont libres de remonter le modèle.

Pour éviter que les poissons ne descendent dans le bassin 0 (Figure 4.11) (bassin représentant la Meuse aval), l'échancrure aval du bassin d'introduction est fermée par une moustiquaire, en prenant garde de ne pas modifier le régime d'écoulement. Les poissons effrayés pouvant descendre dans le bassin 0, ils ne participent alors plus à l'expérimentation de la franchissabilité.

Un système anti-retour est placé en aval du bassin 7 représentant la Meuse amont (Figure 4.11). Ce dernier permet le piégeage des poissons ayant complètement remonté la passe jusqu'à ce bassin. L'intérêt est que ce poisson ne contribue plus à l'expérience. La Meuse amont est donc

séparée du reste de la passe afin de quantifier les remontées avec exactitude. Dans le cas d'un prélèvement manuel des données, les poissons piégés sont comptabilisés à la fin de l'expérience. Les clichés 4.12 illustrent la disposition du système anti-retour.



FIGURE 4.12 – Photos du dispositif anti-retour

Les antennes du système RFID sont placées comme le montre la figure 4.13. Au total, quatre antennes ont été placées aux échancrures encadrées sur la figure 4.13.

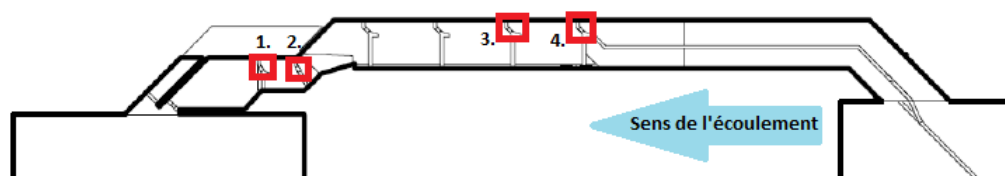


FIGURE 4.13 – Évaluation de franchissabilité : disposition des antennes RFID dans le modèle

Les quatre caméras filment les zones illustrées par la figure 4.14. Trois caméras (entourées de cadre de couleur) filment verticalement le modèle. Une caméra est placée horizontalement au modèle (flèche verte).

L'intérêt de l'utilisation des caméras est double dans ce type d'expérimentation. Elle permet de vérifier les résultats obtenus grâce au système RFID et de collecter des données de comportement des poissons dans les bassins.

Remarquons que s'il n'est pas possible de PIT taguer le lot, aucune information ne peut être prélevée de nuit.

Tableau récapitulatif relatif à une évaluation de franchissabilité

Le tableau 4.8 synthétise les caractéristiques méthodologiques propres à chaque espèce utilisée pour l'évaluation de franchissabilité.

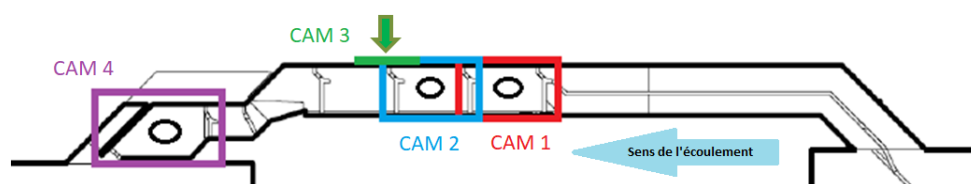


FIGURE 4.14 – *Évaluation de franchissabilité : schématisation des zones filmées verticalement (cadres de couleur) et horizontalement (flèche verte) par les caméras*

TABLE 4.8 – *Évaluation spécifique de la franchissabilité : caractéristiques méthodologiques pour chaque espèce*

O = Oui N = Non	Saumon	Ablette	Chevaine	Chabot
Gamme de tailles	85 - 105 mm	53 - 87 mm	59 - 102 mm	39 - 112 mm
Possibilité de PIT taguer ?	O	N	O	O (certains grands) sinon N
Possibilité de filmer ?	N	O	O	O
Nombre d'expérimentations x nombre d'individus	1 x 20	2 x 45 1 x 18 2 x (45+18)	5 x 20 1 x 18	2 x 13 (grands) sinon 4 x 20
Durée	20 heures	3 heures	23 heures	23 heures
Heure de début	15.30	Variable	10.00	10.00
Heure de fin	11.30	Variable	9.00	9.00
Période expérimentale	08/11/16 au 09/11/16	21/11/16 au 30/11/16	23/02/17 au 06/03/17	20/03/17 au 29/03/17
Température [°C]	[Pas de donnée]	[13,9 : 14,7]	[14,3 : 15,7]	[14,5 : 15,9]

Évaluation comportementale

L'objectif de cette expérimentation est de collecter des données concernant le comportement des poissons à l'intérieur même d'un bassin aux dimensions « standards »³. Ce type d'expérience est assez courant en laboratoire pour juger de la capacité du poisson à se mouvoir dans une configuration donnée de bassin et d'échancrure. Remarquons que, bien qu'une évaluation comportementale peut être réalisée en même temps qu'une évaluation de franchissabilité, les données collectées sont les images et non les données RFID. Les résultats développés sont donc totalement différents de ceux déterminés dans le cas d'une évaluation de franchissabilité. Cela signifie aussi qu'une étude du comportement n'est pas envisageable lorsque les poissons ne sont

3. Un bassin de type « standard » signifie que l'architecture du bassin est couramment utilisée dans la construction des passes à poissons. D'autre part, dans le contexte du redimensionnement de la passe de Rivière, un bassin « standard » est un bassin qui n'est pas adapté à la contrainte de taille qui fait la spécificité de cette passe.

pas filmés.

Une évaluation comportementale est réalisée soit en collectant des données grâce à l'enregistrement des images au-dessus des bassins 5 et 6 (Figure 3.5), soit, si l'évaluation de franchissabilité n'a pas permis de collecter assez de données pour le traitement d'image, à l'aide d'une évaluation comportementale « artificielle ». Nous posons donc l'hypothèse simplificatrice que le poisson possède le même comportement quand il est injecté artificiellement dans des bassins spécifiques pour une évaluation comportementale, que quand le poisson se retrouve dans ces mêmes bassins suite à une remontée de la passe réalisée dans le cadre d'une évaluation de franchissabilité.

Étant donné la contrainte de place liée à la construction de la passe de Rivière, les trois bassins aval (1, 2, 3) de la passe ont été adaptés. Les bassins de type « standard » sont les bassins 4, 5, 6 selon la figure 4.15.

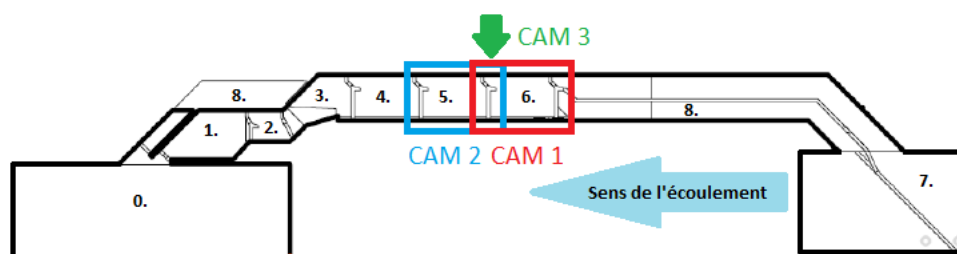


FIGURE 4.15 – Évaluation comportementale : schématisation des zones filmées verticalement par les caméras

Pour réaliser une évaluation comportementale, seul le système caméra est nécessaire. Deux caméras sont disposées verticalement. L'une filme le bassin 6 (CAM 1) tandis que la deuxième, le bassin 5 (CAM 2) comme les rectangles de couleur le montrent sur la figure 4.15. Une troisième caméra filme d'un point de vue horizontal (CAM 3).

Dans le cadre d'une évaluation comportementale « artificielle », les individus sont injectés dans le bassin 6 pour lequel les échancrures sont fermées par des moustiquaires en aval et en amont pour éviter la fuite des poissons. La moustiquaire aval est ensuite doucement retirée pour éviter d'effrayer les poissons et de les voir tous descendre dans le bassin 5.

La durée d'une telle évaluation est fixée à deux heures. La première heure sert à stabiliser les poissons afin d'éviter de restreindre l'expérience à une période pendant laquelle les poissons seraient trop stressés. Ensuite seulement commence la prise de données. L'intérêt ici est de collecter un maximum de données utilisables et représentatives.

Ce type d'expérimentation comportementale « artificielle » a uniquement été réalisé pour l'étude des chabots, car trop peu de données avaient été récoltées durant les évaluations de franchissement. Les individus utilisés sont préalablement séparés en trois classes de longueur

(petits, moyens, grands), et pour chaque classe de taille les chabots ont encore été divisés en deux lots. Le tableau 4.9 contient les informations relatives au nombre de poissons utilisés dans l'évaluation comportementale.

TABLE 4.9 – *Évaluation comportementale des chabots : nombre d'individus par classe de longueur*

Classe de taille	Petit (1)	Petit (2)	Moyen (1)	Moyen (2)	Grand (1)	Grand (2)
Nombre d'individus	15	15	10	15	10	15

Tableau récapitulatif relatif à l'évaluation comportementale

Le tableau 4.10 synthétise les caractéristiques méthodologiques de chaque évaluation comportementale pour toutes les espèces utilisées. Il est cependant à noter que les saumons n'ont pas été filmés et ne sont donc pas repris dans ce tableau.

TABLE 4.10 – *Évaluation spécifique comportementale : synthèse des caractéristiques méthodologiques pour chaque espèce utilisée*

O = Oui N = Non	Ablette	Chevaine	Chabot
Gamme de tailles	53 - 87 mm	59 - 102 mm	39 - 112 mm
Possibilité de filmer ?	O	O	O
Nombre d'expérimentations x nombre d'individus	2 x 45 1 x 18 2 x (45+18)	5 x 20 1 x 18	2 x 15 (petits) 2 x 10 et 2 x 15 (moyens en grands)
Durée	3 heures	23 heures	2 heures
Heure de début	Variable	10.00	Variable
Heure de fin	Variable	9.00	Variable
Période expérimentale	21/11/16 au 30/11/16	23/02/17 au 06/03/17	30/03/17 au 31/03/17

Évaluation de l'efficacité d'attraction du débit d'attrait et de l'entrée dans la passe

L'objectif de cette expérimentation est double. D'une part, il s'agit de rendre compte de l'efficacité du débit d'attrait dans l'orientation du poisson vers l'entrée de la passe. Cet aspect est souvent limitant dans l'efficacité globale de remontée des passes (Williams et al., 2012). D'autre part, le but est de quantifier la capacité des poissons à entrer dans la passe.

Une seule caméra utilisée a été placée comme le montre le rectangle rouge de la figure 4.16. Étant donné l'objectif de l'expérience, la caméra a été installée pour filmer l'amont et l'aval de

l'entrée de la passe ainsi que la sortie du débit d'attrait. L'utilisation de cette caméra a pour but de permettre la vérification qualitative des données collectées par le système RFID. En effet, les images prises en ce point du modèle sont peu exploitables.

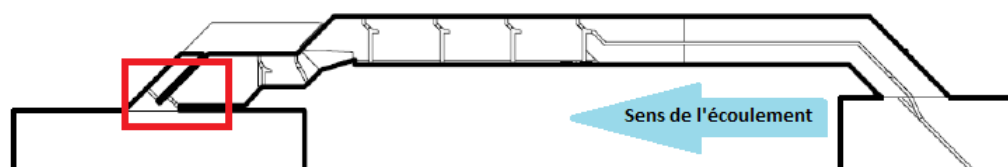


FIGURE 4.16 – Efficacité d'attraction par le débit d'attrait : schématisation de la zone filmée verticalement par la caméra

Les antennes RFID ont été placées aux points 1, 2 et 3 (rectangles rouges) de la figure 4.17 permettent de le visualiser.

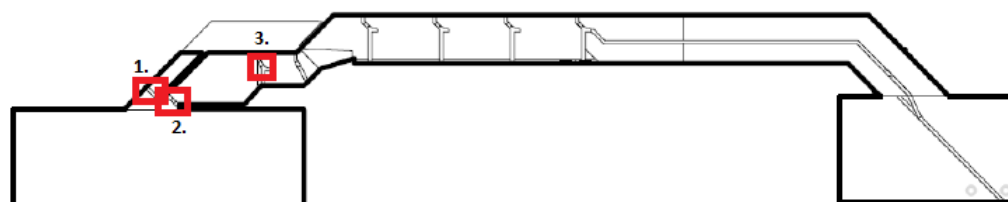


FIGURE 4.17 – Efficacité d'attraction par le débit d'attrait : disposition des antennes RFID dans le modèle

Une première antenne est placée au niveau du déversement du débit d'attrait (antenne 1) afin de quantifier les tentatives d'entrée dans le débit d'attrait. Son objectif est de distinguer la part des tentatives d'entrée qui sont réalisées en vain sur le débit d'attrait. L'antenne mesure quant elle les tentatives réussies ou ratées d'entrée dans la passe.

L'antenne 3 est placée à l'échancrure amont du bassin 1 de la passe afin de valider l'entrée d'un poisson.

Une seule évaluation de ce type a pu être réalisée avec l'entièreté des chevesnes (118 individus durant 85,5 heures (09/03/17, 17h30 au 14/03/17, 07h00)).

Limitations des méthodes expérimentales

Malgré le soin apporté à la représentativité des conditions expérimentales par rapport aux conditions de terrain, certains biais expérimentaux subsistent. Cette section liste les limitations majeures à considérer.

Tout d'abord, l'utilisation d'un modèle réduit implique la vérification du respect de la loi d'échelle. Pour rappel, la cohérence du facteur d'échelle concernant la vitesse de nage a déjà été vérifiée dans le chapitre précédent. Il reste à vérifier si les lots utilisés lors des expériences

TABLE 4.11 – Tableau permettant de comparer les tailles des poissons utilisés envisagées par la loi d'échelle et les longueurs d'individus couramment rencontrées dans la nature

	Saumon atlantique	Ablette commune	Chevaine	Chabot selon le lot de taille		
				Petit	Moyen	Grand
Intervalle de longueur du lot utilisé [cm]	8,5-10,5	5,3-8,7	5,9-10,2	3,9-6,3	6,6-8,7	7,9-11,2
Intervalle de longueur attendu pour un lot après application du facteur d'échelle (1/5) [cm]	42,5-52,5	26,5-43,5	29,5-51	19,5-31,5	33-43,5	39,5-56
Taille communément rencontrée dans la nature [cm]	75	12 à 20	45	10 à 15		

respectent bien le facteur d'échelle géométrique $\lambda = 1/5$ et sont donc représentatifs des poissons empruntant fréquemment une passe de terrain. Par exemple, si les ablettes empruntant les échelles ont une taille 15 cm, il faut utiliser des poissons dont la taille se rapproche de 3 cm lors des expériences.

Le tableau 4.11 expose les valeurs de longueur des lots expérimentaux, les tailles communément retrouvées (Baudoin et al., 2014, DGARNE, 2010) dans les cours d'eau, ainsi que le résultat après l'application du facteur d'échelle. Notons que les longueurs des chabots ont été séparées en trois classes définies pour les évaluations expérimentales. Le tableau 4.11 montre que les longueurs des saumons utilisés pour les expériences sont inférieures à celles attendues après application de la loi d'échelle comparativement à la taille considérée comme commune (75 cm). Néanmoins, étant donné que des saumons d'une cinquantaine de centimètres ont été capturés dans la passe de Lixhe en 2013 (Philippart & Ovidio, 2014), le respect de la loi d'échelle peut tout de même être validé pour ce lot. De même, la loi d'échelle est bien respectée pour les lots de chevaines selon le tableau 4.11.

Concernant les ablettes, les longueurs du lot utilisé semblent surestimer la taille d'un individu commun. Pour les chabots également, tous les lots surestiment la taille communément rencontrée, après application du facteur d'échelle. Cependant, les lots de petits chabots se rapprochent le plus de la taille attendue.

Remarquons qu'une contradiction pratique existe entre la faisabilité de la collecte de données par RFID et par système caméra et le respect du facteur géométrique de la loi d'échelle. Pour rappel, l'exemple des ablettes montre que pour des poissons atteignant communément une longueur de 15 cm, les individus utilisés dans le modèle réduit devraient normalement mesurer 3 cm. Cela rend l'insertion de PIT tags et le traitement d'image irréalisables. Il est donc nécessaire

de faire des compromis dans le choix de la longueur des poissons utilisés.

De plus, la relation mathématique de la loi d'échelle se concentre uniquement sur les vitesses et les longueurs et ne prend pas en compte les changements de comportement liés au stade de développement de l'espèce. Par exemple, les saumons juvéniles se stabilisent souvent sur le fond (comparativement à ce qui est observé dans le modèle réduit). Néanmoins, il semble peu cohérent d'imaginer un saumon adulte se maintenir sur le fond dans une passe à poissons.

Ensuite, malgré le fait que la photopériode a été reproduite, la lumière obtenue en laboratoire n'est pas identique à celle dans l'environnement. C'est principalement les transitions entre la phase nocturne et la phase diurne, correspondant à l'aube et au crépuscule, qui sont difficiles à reproduire. Cette différence pourrait perturber les poissons.

Finalement, le biais le plus important reste lié au stress. Les poissons, sortis de leur environnement naturel et manipulés au gré des expériences, sont exposés à beaucoup de sources de stress. Le transport, le passage inévitable de personnes le long de la passe, les transferts entre bassins de stockage et l'injection dans la passe sont autant de facteurs susceptibles d'effrayer le poisson. Par conséquent, il pourrait ne pas se comporter de la même façon que dans une passe réelle.

En conclusion, il est important de garder en tête qu'il existe de nombreux biais expérimentaux influençant le comportement des poissons. Comme il est difficile de quantifier le biais total, l'interprétation et la discussion des résultats doivent être réalisées avec un certain recul.

4.2.3 Traitement des données RFID

Avant tout, il est important de remarquer que pour un système RFID, un scan est la création ponctuelle d'un champ magnétique par une antenne à un moment donné. Un PIT tag peut potentiellement réagir à ce champ magnétique s'il se trouve à proximité. Une détection est quant à elle une série continue de scans durant laquelle un PIT tag réagit à chaque scan. Seules les détections sont extraites du datalogger.

Les données extraites du système RFID sont présentées sous forme d'un fichier *texte* pour lequel chaque colonne relaie une information (heure de détection, antenne de détection, etc.) et chaque ligne contient les informations relatives à chaque détection réalisée.

Remarquons que des scripts ont été développés permettant une automatisation du traitement de données étant donné la grande quantité de détections et la grande quantité de poissons. Un utilisateur souhaitant un tel traitement semblable aura à entrer le nombre d'individus du lot dans le script et, après avoir inséré ses fichiers des données et les identifiants des PIT tags utilisés,

nombre de passages d'antenne correctement enregistrés.

Cela étant fait, il est nécessaire de réaliser une isolement des lignes non reconnues par le script pour comprendre la nature des informations qu'elles contiennent. Généralement, ces détections sont induites par des bruits magnétiques ou par un problème inhérent à l'enregistrement des détections. En outre, en rapportant le nombre de lignes non reconnues par le script sur le nombre de lignes reconnues par le script, il est possible d'avoir une idée de la qualité de l'enregistrement des données du système RFID et de la validité des résultats extraits (relatif au code section E.1.2.3).

Par après, les montaisons sont déterminées. Ces dernières sont définies par le traitement de données et possèdent la signification suivante. Une montaison correspond à l'intervalle de temps délimité par la dernière détection à l'antenne aval jusqu'à une première détection à l'antenne la plus en amont. Une première montaison une fois terminée, le poisson peut réaliser une dévalaison. La dévalaison est définie comme étant l'intervalle de temps délimitée par une dernière détection en amont et une première détection à l'antenne aval. Par exemple, pour les chevesnes, est obtenu la figure B.3 en annexe.

Ensuite, la fiabilité du système RFID est évaluée en quantifiant le nombre de remontées qui ont été réalisées en des temps aberrants et en comparant ce résultat aux remontées réalisées en des temps réalistes (relatif au code section E.1.5.2). Pour cela, il est nécessaire de définir une valeur de durée de remontée au-delà de laquelle une remontée n'est pas considérée comme aberrant (1 minute dans notre cas).

De la sorte, il est possible de déterminer de nombreux résultats comme le nombre de remontées par individu, la durée de remontée, (relatifs au code section E.1.4.) l'influence de la photopériode sur la remontée, l'influence de la taille sur le temps de remontée, etc.

Traitement des données pour une évaluation de l'efficacité du débit d'attrait

Le traitement des données collectées en vue d'évaluer l'efficacité du débit d'attrait a été réalisé comme suit (relatif au code section E.2).

Les détections aux trois antennes sont tout d'abord isolées pour chaque individu. Pour l'antenne 1 se trouvant dans le débit d'attrait et pour l'antenne 2 se trouvant à l'entrée du modèle (Figure 4.17), chaque détection constitue une tentative d'approche. Pour déterminer l'efficacité d'attractivité de la passe, il est intéressant de quantifier le rapport entre le nombre de tentatives d'entrée dans le modèle réalisées dans le débit d'attrait sur le nombre de tentatives réalisées à l'entrée de la passe. Cependant, les données RFID brutes doivent être traitées afin de permettre la quantification de tels résultats. Il est donc nécessaire de déterminer d'abord les phases d'entrée et de descente.

Une entrée dans le modèle est déterminée comme suit :

- Pour la première entrée, la détection à l'antenne 3 (Figure 4.17) suffit à la comptabiliser.
- Pour une entrée autre que la première, la détermination de celle-ci est délimitée par une dernière détection à l'antenne 1 dans le débit d'attrait et par une première détection à l'antenne 3 (Figure 4.17).

Une entrée peut alors être suivie d'une descente. Par conséquent, la descente du modèle est distinguée comme s'étalant depuis la dernière détection à l'antenne 3 en amont jusqu'à la première détection à l'antenne 1 du débit d'attrait.

Une fois ces opérations réalisées, il est possible de comptabiliser individuellement le nombre d'entrées pour chaque poisson.

Dans le but de quantifier les tentatives d'entrée dans le modèle et le débit d'attrait, les détections à l'antenne 2 à l'entrée de la passe durant les phases de descente et d'entrée ne peuvent être prises en compte. Par exemple, elles peuvent constituer une phase durant laquelle le poisson peut camper en amont de l'antenne 2 ce qui n'équivaut pas à une tentative d'entrée. Il est par conséquent décidé de purement supprimer ces données.

De même, si le poisson reste trop longtemps juste en aval, de l'antenne, il est probable qu'il y ait eu plusieurs tentatives car plusieurs détections. Par conséquent, si, en-dehors d'une phase d'entrée et de sortie préalablement délimitée, un intervalle de temps séparant deux détections pour un poisson donné est inférieur ou égal à 5 secondes, la première détection est considérée comme la seule tentative.

Finalement, le rapport entre le nombre de tentatives réalisées dans le débit d'attrait sur le nombre de tentatives infructueuses entreprises à l'entrée de la passe est quantifié. Cet indicateur permet de rendre compte de la qualité du débit d'attrait à orienter correctement le poisson vers l'entrée de la passe. Notons que cet indicateur peut prendre en compte le passage de certains poissons à proximité de l'antenne. De plus, étant donné que le courant du débit d'attrait est plus important, il est probable que les tentatives d'entrée soient sous-estimées à cet endroit. Il est en effet plus difficile pour le poisson d'atteindre la zone de détection située dans le débit d'attrait que de rentrer dans le champ magnétique de l'antenne placée à l'entrée de la passe.

Limitations rencontrées avec le système RFID

Remarquons qu'utiliser des poissons de petite taille reste le facteur le plus limitant du système RFID. En réalisant les expérimentations avec des individus plus petits que ± 60 mm, l'insertion des PIT tags n'est plus permise. En effet, le risque de voir augmenter le taux de mortalité du lot étudié est accentué. Par ailleurs, de nombreux poissons sont fragiles à la manipulation. C'est le cas de certains poissons sauvages comme les ablettes communes.

Concernant les saumons et les chevesnes, aucune limitation majeure n'a été rencontrée au niveau du taux de mortalité qui fut nul. De même, pour le traitement des données, les résultats des quantifications d'erreurs ne montrent pas d'incohérence majeure au niveau du traitement de données. Par exemple, les sauts d'antennes sont évalués à moins de 1 % par rapport au nombre total de détections.

Néanmoins, concernant les chabots, de nombreuses limitations ont pu être observées durant les sessions expérimentales et le traitement de données.

Premièrement, certains chabots se sont réfugiés entre l'antenne RFID et l'échancrure, probablement pour éviter les vitesses rapides du courant. Dans le cas de poissons benthiques, les antennes semblent donc être des obstacles au franchissement, ainsi que des éléments pouvant biaiser les résultats.

Ensuite, en restant près d'une antenne, un individu « monopolise » les détections à cette antenne. Bien qu'il soit possible de stopper l'enregistrement de données pour un individu « campeur ⁵ », la réponse au signal émis par l'antenne reste réalisée par le PIT tag du chabot « campeur ». Par conséquent, un individu passant à ce moment précis pourrait ne pas être détecté par l'antenne.

Malheureusement, le traitement des données RFID n'a pas pu être réalisé pour les chabots. Il semblerait qu'en « campant » à certaines antennes, les poissons ont perturbé l'enregistrement des détections, car elles étaient trop nombreuses pour le data logger. Par conséquent, les données récoltées ne sont pas utilisables. Pour information, pour 5 individus du lot utilisé durant un test préliminaire, 40 remontées ont été enregistrées par le système RFID. 42 % de ces remontées ont été réalisées en moins de 5 secondes. De même, 56 % de sauts d'antennes ont eu lieu. Étant donné ce haut taux d'erreurs, il devient difficile et même dangereux de poser des critères permettant de distinguer une remontée erronée d'une remontée réelle. Par conséquent, les données collectées ont été déclarées inexploitable.

Ces difficultés montrent que le système RFID n'est pas encore correctement applicable à des espèces statiques et benthiques utilisées dans ce contexte expérimental.

4.2.4 Traitement des images

Filmer plusieurs bassins permet par la suite d'analyser le comportement des poissons au sein de la passe. Afin de pouvoir interpréter les informations contenues dans les nombreuses images collectées lors des expériences, il est nécessaire de les transformer en données exploitables. Cela consiste à détecter automatiquement les poissons et à enregistrer leur description via des paramètres chiffrés (aire, longueur, centroïde, etc.). Ce sont des paramètres qui sont exploités

5. Dans le cadre du système RFID, un individu campeur est considéré comme restant intentionnellement à plus ou moins long terme près d'une antenne.

pour, entre autres, calculer les trajectoires et les vitesses des poissons. Par la même occasion, cela permet de diminuer de manière considérable l'espace de stockage nécessaire à la sauvegarde des données. Le traitement d'image s'effectue en deux étapes. Premièrement, les images sont traitées via le logiciel *ImageJ* (logiciel open source). Ce dernier crée un tableau *Excel* reprenant les informations de toutes les détections faites sur les images d'un dossier considéré. Ensuite, ces détections sont filtrées plus finement via le logiciel *MATLAB* afin d'en retirer un maximum d'erreurs.

Traitement d'images avec *ImageJ*

ImageJ est un logiciel open source d'analyse d'images développé sous *Java* (Oracle, Redwood City, États-Unis). Il est inspiré de *NIH Image*, logiciel créé par les National Institutes of Health (ImageJ, 2017). Pour traiter les images collectées, nous avons utilisé *Fiji*, une extension de *ImageJ* qui contient un bon nombre de plugins utiles pour l'analyse scientifique d'images dans différents domaines, dont entre autres les sciences vivantes.

Une fonctionnalité intéressante qu'offre *ImageJ* est la possibilité de créer une macro, c'est à dire une liste d'ordres préalablement enregistrés et exécutables de façon automatique (Linternaute, n.d.). Cela permet donc d'appliquer chaque étape du traitement à la totalité des images contenues dans un dossier. Le but final est d'isoler les poissons sur les images et d'enregistrer leurs caractéristiques descriptives sous forme de différents paramètres (aire, centroïde, périmètre, etc.). Les étapes successives de la macro vont maintenant être décrites et illustrées par un exemple. Le code complet de la macro est disponible à l'annexe F.

Le tableau 4.12 est un résumé des étapes du traitement des images. La dernière colonne correspond aux paramètres utilisés pour le traitement d'une image typique, notamment un chevaïne filmé dans le dernier bassin amont. Le détail des valeurs des paramètres pour chaque lot d'images est consultable à l'annexe B.6.

La figure 4.19 illustre les différentes étapes du traitement d'images avec l'exemple d'un chevaïne dans le dernier bassin amont. La figure 4.20 montre les paramètres chiffrés que *ImageJ* détermine pour cet exemple.

TABLE 4.12 – Résumé du traitement d'images avec ImageJ

Étape	Description	Paramètres	Valeur typique
1	Soustraction image moyenne	Quantité d'images	1000
2	Définition ROI	-	-
3	Applications filtres	Gaussian Blur Radius	2
4	Application threshold	Type de threshold	RenyiEntropy
		Limite inférieure threshold	Valeur entre 5 et 25
5	Analyse particules	Limite inférieure aire	150
		Limite supérieure aire	inf

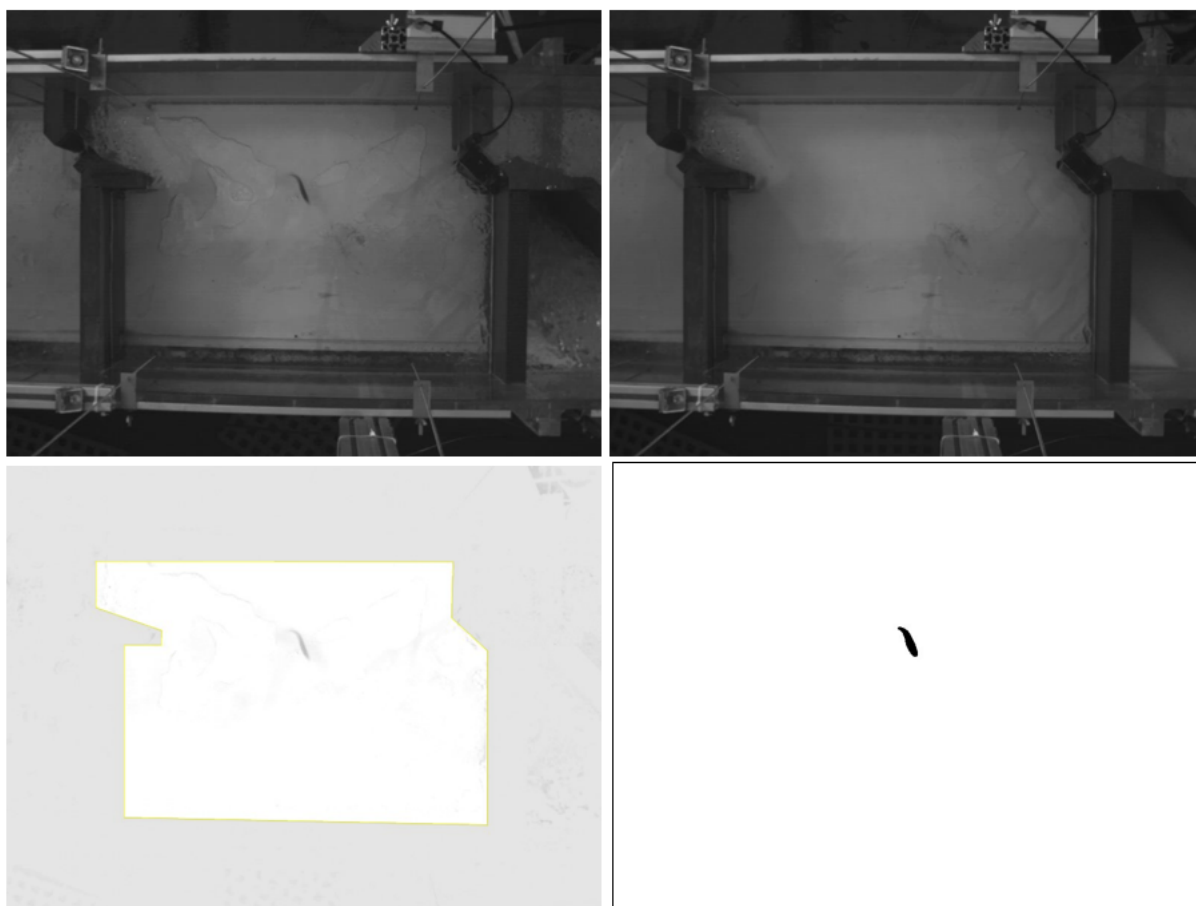
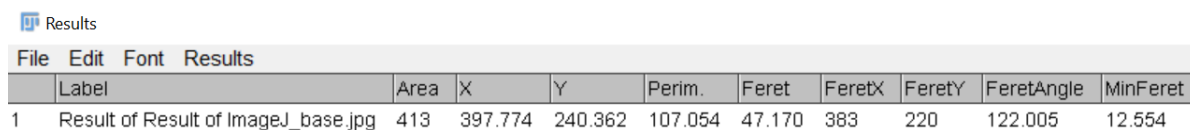


FIGURE 4.19 – Illustration des différentes étapes du traitement d'image. De gauche à droite, de haut en bas : image initiale, image moyenne, résultat de la soustraction et illustration de la ROI, résultat du threshold



Results										
File Edit Font Results										
	Label	Area	X	Y	Perim.	Feret	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret
1	Result of Result of ImageJ_base.jpg	413	397.774	240.362	107.054	47.170	383	220	122.005	12.554

FIGURE 4.20 – Ligne de résultat fournie par ImageJ

Étape 1 - Soustraction de l'image moyenne à l'image initiale

La première étape permettant d'isoler le poisson de son entourage est de soustraire à l'image analysée une image de base représentant l'environnement sans poisson. L'image de base est formée en calculant une moyenne sur mille images sans poisson, ce qui permet de lisser l'écoulement, et d'en retirer les irrégularités. Nous verrons par la suite que la plus grande source d'erreurs dans le processus de détection des poissons est la présence d'irrégularités dans l'écoulement de l'eau. Comme expliqué dans la section *Système caméra* de ce chapitre, des plaques de plexiglas ont été placées à la surface de l'écoulement afin de le lisser. Cependant, des "bulles" (principalement au droit des échancrures) persistent. Créer cette image moyenne comme image de base évite donc d'intégrer systématiquement des erreurs lors de la soustraction de l'environnement.

Étape 2 - Définition de la ROI

La zone délimitée par les parois du bassin est la seule région de l'image qui nous intéresse. Afin de réduire le risque de détections erronées dues par exemple au passage de personne dans le champ de vision de la caméra, il était judicieux d'éliminer de l'image les parties hors du bassin. Pour ce faire nous avons défini une ROI (Region Of Interest) délimitée par un polygone suivant les parois du bassin. La définition exacte de ce polygone se trouve en annexe B.6.

Étape 3 - Application des filtres

L'unique filtre utilisé pour faciliter la détection de poissons est le *Gaussian blur*, utilisant la convolution avec une fonction Gaussienne afin d'estomper les différences de niveaux de gris de l'image (ImageJ WIKI, 2012). Ce filtre permet de réduire le bruit sur les images en effaçant les détails et taches de petite taille. Le paramètre qui définit l'intensité du filtre correspond à l'écart-type σ de la fonction Gaussienne. Pour la plupart des images traitées, la valeur de σ est fixée à 2. Cette valeur a été choisie afin de lisser les contours des taches sans trop les déformer. Pour les poissons de très petite taille il convient de prendre un σ plus faible. Un tableau récapitulatif reprenant la valeur de chaque paramètre fixé en fonction du lot d'image traité se trouve en annexe B.6.

Étape 4 - Application du threshold

Un *threshold*, ou seuillage d'image, est une méthode simple de segmentation d'une image en

niveau de gris. Le principe consiste à fixer une valeur seuil et de créer une image monochrome, comportant uniquement deux valeurs. La valeur initiale du pixel sera remplacée par les valeurs 0 (noir) ou 255 (blanc) si elle est respectivement inférieure ou supérieure au seuil. L'utilisation d'un *threshold* dans ce traitement d'image permet d'isoler le poisson (en noir) de l'arrière-plan (en blanc) sur chaque image.

ImageJ propose plusieurs méthodes adaptatives pour fixer cette valeur seuil. Après avoir testé chacune d'entre elles sur des échantillons d'images contenant des poissons, la méthode *RenyiEntropy* semblait fournir les meilleurs résultats sur les échantillons d'images avec poisson(s). Son principe de fonctionnement est expliqué en détails dans l'annexe B.6.

Cependant, cette méthode adaptative n'est pas concluante sur les échantillons d'images sans poisson. Effectivement, une quantité importante de "bulles" est alors détectée. La solution pour éviter ce dysfonctionnement est de fixer une borne inférieure à la valeur de seuil.

Étape 5 - Analyse des particules

Sur chaque image analysée, le logiciel *ImageJ* reconnaît les taches (formes noires sur l'image) mises en évidence grâce au processus de traitement d'image décrit ci-dessus. Ces taches noires correspondent à priori à des poissons bien que soient parfois des détections erronées de "bulles". Quoi qu'il en soit, l'objectif de ce traitement d'image est de transformer les images en données exploitables. Dans ce but, chaque tache (poisson ou erreur) est analysée et les informations suivantes sont enregistrées sous un format de tableau *Excel* (figure 4.20) :

Label La macro enregistre premièrement le nom de l'image. Cela permet de situer les détections de taches dans le temps, car chaque image est liée à une date et une heure.

Area L'aire de la tache est défini par le nombre de pixels contenus dans cette tache. Ce sera par la suite un critère aidant à définir s'il s'agit d'une détection de poisson ou d'une erreur. En effet, les taches correspondant à un poisson ont une aire comprise dans une certaine fourchette de valeurs. Une limite inférieure éliminera dès cette étape les détections trop petites. Généralement, nous n'utiliserons pas de limite supérieure à ce stade, car cela risquerait d'éliminer les détections correspondant à deux poissons collés l'un à l'autre. Les valeurs limites d'aire se trouvent dans le tableau récapitulatif de l'annexe B.6.

Centroid Ce paramètre renvoie la coordonnée X et la coordonnée Y du centroïde de la tache sélectionnée. Il est calculé comme étant la moyenne des coordonnées x et y de tous les pixels de la sélection. Ce paramètre servira principalement à définir la trajectoire et à calculer la vitesse des poissons.

Perimeter C'est la longueur du contour de la sélection (qui peut être, pour rappel, un poisson ou une erreur de détection).

Feret's diameter Le diamètre de Feret est défini par la plus longue distance entre deux points du contour de la tache sélectionnée. Cela correspond à la plus grande ouverture qu'aurait un pied à coulisse si on utilisait cet instrument pour mesurer la longueur de l'objet sélectionné. *FeretAngle* (0 à 180 degrés) est l'angle entre le diamètre de Feret et une droite parallèle à l'axe x de l'image. *MinFeret* est l'ouverture minimum du pied à coulisse. Les coordonnées du point de départ du diamètre de Feret sont données par les valeurs de *FeretX* et *FeretY*. La plupart de ces paramètres permettront de créer une modélisation basique du poisson sur base uniquement de données chiffrées. Ils sont représentés ainsi que le centroïde sur la figure 4.21.

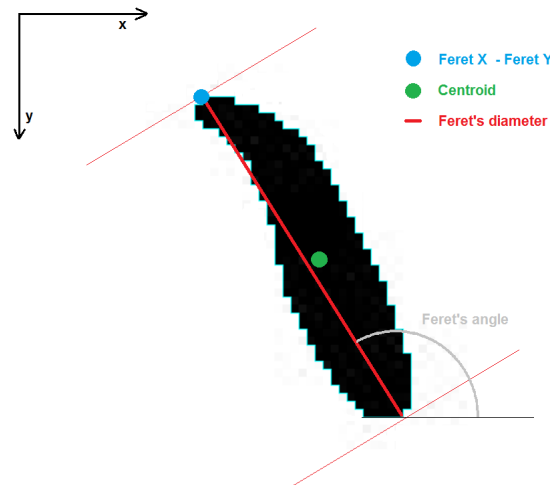


FIGURE 4.21 – Représentation des différents paramètres de Feret et du centroïde

Limitations du traitement d'image

Afin que ce processus de détection de poisson fonctionne de façon optimale, il est nécessaire de réunir trois conditions. La première est d'avoir un écoulement dont la surface est lissée afin de limiter les effets de diffraction et de réfraction qui déforment le poisson sur les images. C'est dans ce but que les plaques de plexiglas ont été installées à la surface de l'écoulement. La deuxième condition consiste à avoir des poissons de taille suffisamment grande afin de pouvoir les distinguer des irrégularités de l'écoulement. Et finalement, il est nécessaire d'avoir assez de contraste entre le poisson et son environnement.

Comme décrit dans la section précédente, au fur et à mesure des expériences, le processus de prise d'image a été amélioré (ajout des plaques de plexiglas réglables avec précision, poissons de plus grande taille). Cela a permis par exemple d'obtenir des résultats plus concluants pour les chevaines. Les images étaient de bonne qualité et la détection des poissons assez fiable. Cependant, même avec ces lots d'images optimales, le traitement comporte toujours trois grandes limitations.

Les détections qui ne sont pas des poissons Malgré le lissage de la surface de l'écoulement, de nombreuses erreurs de détections sont faites. Ces erreurs apparaissent principalement à l'entrée et à la sortie du bassin, là où l'écoulement se décolle de la plaque de plexiglas. Les irrégularités de l'écoulement provoquent alors des zones d'ombre qui sont détectées comme des poissons.

Les poissons qui ne sont pas détectés Lorsque le contraste n'est pas suffisant entre le poisson et l'arrière-plan, il arrive régulièrement que ce dernier ne soit pas détecté par le logiciel. C'est le cas par exemple lorsque le poisson reste le long des arrêtes du bassin (de couleur plus foncée que le fond blanc du bassin) ou sur les images prises par la caméra avec champ de vision horizontal. En effet, les parois verticales sont soit de couleur gris foncé, soit transparentes avec un arrière plan non-uniforme. Une deuxième source de ce type d'erreur est lorsque le poisson se trouve dans une zone trouble de l'écoulement. Il est alors déformé et difficilement détectable.

Lorsque plusieurs poissons sont proches les uns des autres S'il y a deux poissons ou plus qui se trouvent dans la même zone du bassin, il arrive souvent qu'ils se "collent" l'un à l'autre ou qu'il se mettent l'un au dessus de l'autre. Le programme n'arrive dans ce cas plus à discerner chaque individu et ne détecte du coup qu'une seule grande tache.

Le lecteur l'aura compris, le plus grand challenge de ce traitement d'image est de fixer les paramètres de façon à détecter un maximum de poissons et un minimum d'erreurs. Il est toutefois inévitable (dans nos conditions de prise d'image) que des erreurs de détection se glissent dans les résultats. C'est pourquoi les données sous forme de tableau *Excel*, qui résultent du traitement d'image avec *ImageJ*, doivent encore être affinées afin d'éliminer le plus possible de détections erronées.

Post-traitement de données avec *MATLAB*

Nous avons choisi d'utiliser le logiciel *MATLAB* afin de "nettoyer" les tableaux *Excel* (matrices de base) en éliminant un maximum de détections ne correspondant pas à un poisson. Pour ce faire, plusieurs stratégies ont été élaborées après avoir analysé le type d'erreurs récurrentes. Elles vont être exposées dans cette section. L'annexe G contient l'entièreté du script *MATLAB* traitant les données *Excel*.

Le script est divisé en trois parties principales, reprises dans le tableau 4.13. Elles sont détaillées par la suite. La dernière colonne donne à titre illustratif des valeurs pour un lot de chevaines filmés dans un bassin standard.

TABLE 4.13 – Résumé du script MATLAB servant à éliminer les erreurs de détection

Partie	Description	Paramètres	Valeur typique
1	Élimination des bulles isolées sur les images sans poisson	Nombre d'images analysées	100
		Nombre de détections requises	75
2	Sélection des images supposées ne contenir qu'un seul poisson	Nombre d'images analysées	100
		Nombre de détections requises	75
3	Application des filtres sur les images ne contenant qu'un seul poisson	Limite d'aire	500
		Limite du ratio périmètre/aire	0,5
		Limite de distance	1500

Partie 1 - Élimination des bulles isolées

Comme déjà mentionné précédemment, il n'est pas rare que des détections soient faites sur des images ne contenant pourtant pas de poisson. Ce sont des ombres formées dans les zones du bassin où la surface de l'écoulement n'a pas pu être correctement lissée. C'est l'erreur la plus courante et aussi la plus facile à détecter, car ces images avec fausses détections sont souvent "noyées" au milieu d'images blanches, c'est-à-dire sans aucune détection. La solution est de définir un critère permettant de les repérer. Ce critère consiste à fixer un pourcentage de détection requis afin de pouvoir considérer que les détections sont effectivement des poissons. Prenons comme exemple un pourcentage de 75 % afin d'illustrer ce critère. Sur un nombre fixé d'images consécutives, disons 100 images, il faudra alors un minimum de 75 images avec détection(s) pour pouvoir considérer qu'il y a effectivement un poisson dans le bassin. Si ce n'est pas le cas, les détections seront alors supprimées de la matrice de base, car nous considérons qu'il s'agit d'erreurs.

Partie 2 - Sélection des images ne contenant qu'un poisson

La deuxième partie du script tente d'isoler les images avec un seul poisson des images avec plusieurs poissons. Le principe est le même que celui permettant de décider s'il s'agit d'un poisson ou d'une "bulle", comme expliqué dans le paragraphe précédent. En reprenant le même exemple, le critère de décision est le suivant : si sur 100 images il y en a minimum 75 qui n'ont qu'une seule détection, c'est qu'il s'agit d'images avec un seul poisson par bassin. L'utilité d'isoler les détections uniques est de pouvoir y appliquer des filtres plus sévères (sur par exemple leur forme et leur localisation) afin d'augmenter le nombre d'erreurs éliminées de la matrice de base. Le lecteur peut se poser la question de la nécessité d'un critère de décision. Pourquoi ne pas simplement appliquer les filtres aux images n'ayant qu'une seule détection ? Il est alors judicieux de rappeler que cette détection unique pourrait correspondre à deux poissons superposés ou collés l'un à l'autre.

Partie 3 - Filtres sur les images ne contenant qu'un poisson

Les trois critères utilisés sont les suivants :

Aire Le filtre impose une limite supérieure à l'aire de la tache. En effet, les poissons de chaque lot sont de taille plus ou moins égale. Cela implique que si la détection a une aire anormalement grande, il s'agit d'une erreur.

Ratio périmètre/aire Les taches correspondant à un poisson ont généralement un contour plus régulier que les taches correspondant à des "bulles". Ce critère permet donc à priori aussi de faire la distinction entre les deux. Nous nous sommes cependant rendu compte qu'il était compliqué de calibrer ce paramètre et donc qu'il était inefficace.

Distance entre deux détections Si sur deux images consécutives les détections sont trop éloignées, c'est qu'au moins une des deux détections est une erreur. Pour rappel les images sont prises à une fréquence de 15 images par seconde. Le poisson est donc incapable d'aller d'un côté à l'autre du bassin sur le laps de temps qui s'écoule entre deux images. Ce filtre tente donc d'éliminer les erreurs en se basant sur ce critère.

La figure 4.22 illustre le résultat du traitement des données avec *MATLAB*. Les deux images représentent la densité de détection d'un lot de chevaines dans le dernier bassin amont. L'image de gauche correspond aux détections "brutes", avant traitement. L'image de droite représente les détections restantes après traitement. Nous observons qu'une grande partie des détections éliminées se trouvent dans la zone juste en amont de l'échancrure aval (qui se trouve à droite sur image). C'est notamment à cet endroit que la surface de l'écoulement se décolle régulièrement de la plaque de plexiglas et que les détections erronées sont nombreuses. Nous pouvons donc conclure que le traitement fournit d'assez bons résultats, car beaucoup de fausses détections sont supprimées. Il ne faut cependant pas négliger les nombreuses détections de poissons qui sont également supprimées. Les raisons de ce phénomène sont expliquées dans la section suivante, qui explique les limitations du traitement de données.

Limitations du post-traitement de données

La plus grande difficulté du post-traitement des données est de prendre en compte tous les cas de figures d'erreurs possibles. Plus spécifiquement, voici les erreurs typiques pour chaque partie du code. La première partie est censée n'éliminer que les bulles isolées, hors si un poisson traverse le bassin rapidement, en moins de 75 images, sa détection sera supprimée.

Dans la deuxième partie, plusieurs erreurs peuvent aussi survenir. Il est assez fréquent que deux poissons restent pendant longtemps l'un à côté de l'autre. Ce qui correspond à une détection unique au lieu de deux détections. A l'inverse, si le débit dans la passe est légèrement modifié, la surface de l'écoulement se décolle alors de la plaque de plexiglas. Ce qui conduit à un haut taux de détections erronées. Le programme pourrait alors considérer la présence de plus de poissons

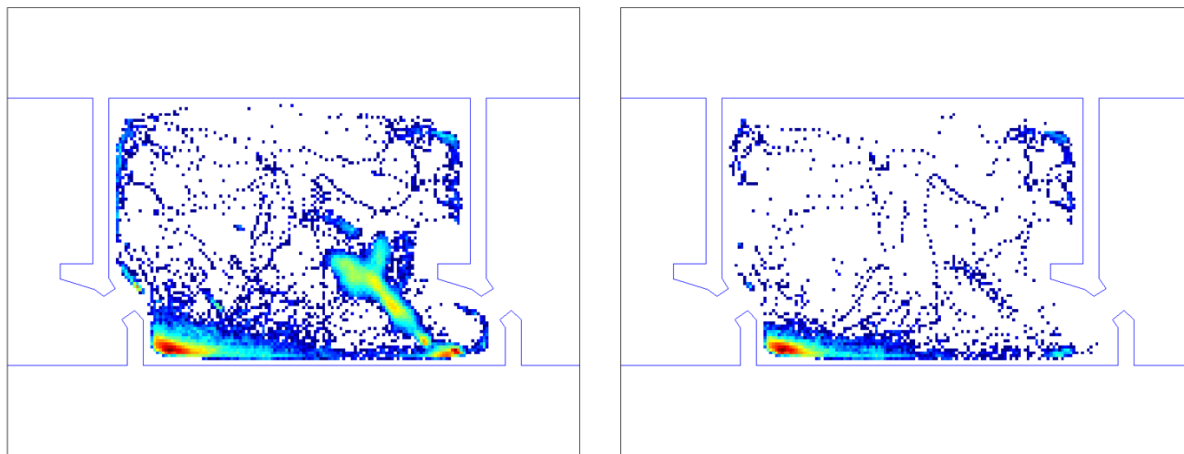


FIGURE 4.22 – Illustration de l'effet du traitement de données avec MATLAB. L'image de gauche représente la densité de détections "brutes" (AVANT), l'image de droite représente la densité de détection après traitement (APRÈS).

que ce qu'il n'y a réellement dans le bassin.

Finalement, la plus grosse limitation de la troisième partie du script est le critère de vitesse. Effectivement, il est difficile de définir un point de référence qui soit un poisson et non une "bulle". Ce critère risque donc de supprimer des détections de poissons, lorsque les erreurs sont nombreuses dans la matrice de base.

En résumé, il est difficile d'ajuster les paramètres pour prendre en compte chaque cas de figure. Le meilleur moyen de diminuer le nombre d'erreurs reste la restriction des sources d'erreurs en amont du processus (prise de données et traitement des images).

Définitions des résultats présentés

Dans le chapitre 6 *Résultats et discussions : comportement du poisson* plusieurs résultats seront présentés pour chaque espèce étudiée. Il est intéressant de préalablement faire une rapide description des principaux concepts.

Zones de présence préférentielle Les graphes représentant ces zones sont construits à partir des centroïdes de chaque tache détectée sur le lot d'images concerné.

Vitesses Les vitesses des poissons sont calculées à partir de la distance entre deux centroïdes (exprimée en nombre de pixels et convertie en mètres) et l'intervalle de temps (exprimé en secondes) entre deux détections consécutives. Le filtre qui permet d'exclure les vitesses anormalement élevées fonctionne comme suit. La médiane et l'écart type des vitesses sont

calculées pour une séquence de détections consécutives. Si une vitesse s'écarte de plus de deux fois l'écart type par rapport à la médiane, elle sera exclue. Il est à noter que ces vitesses sont absolues, c'est-à-dire exprimée par rapport à un système référentiel extérieur à la passe. Nous ne calculerons pas les vitesses des poissons relatives à l'écoulement.

Modélisation du poisson La modélisation se fait comme suit : les droites représentent le corps du poisson, tandis que le cercle rouge représente sa tête. Lorsque la courbure du poisson est importante, le corps est alors représenté par un "L" orienté dans la direction de la queue du poisson. Le petit bout de droite ajouté est de couleur magenta (rouge-mauve) lorsque le centre de courbure se trouve à gauche du poisson, et de couleur cyan (vert-bleu) lorsque le centre se trouve à droite. La figure 4.23 représente chacune des trois possibilités.

Trajectoires Elles sont définies soit par le centroïde du poisson, soit par la modélisation graphique du poisson. Vu que les images sont prises à une fréquence de 15 fps, l'intervalle de temps entre deux représentations du poisson est de un quinzième de seconde.



FIGURE 4.23 – Modélisation graphique de poissons

Résultats et discussions : franchissement

écrit par Loïc Van Audenhaege

5.1 Caractérisation de la remontée et de ses influences

Cette section expose et discute les résultats obtenus grâce aux données collectées par le système RFID ou par relevé manuel. La remontée représente la variable d'intérêt. Pour chaque espèce, les résultats des remontées ainsi que les variables ayant un effet potentiel sur les résultats agissant sont discutés. En outre, une approche éthologique est utilisée pour mieux comprendre ces différents résultats. Finalement, les interprétations spécifiques des résultats sont comparées à la fin de cette section.

5.1.1 Définitions préliminaires des concepts utilisés

Étant donné le caractère discret et ponctuel des données, il a fallu poser une définition de certains concepts-clefs utilisés dans la caractérisation des résultats. Ceux-ci sont définis ci-dessous selon leur signification expérimentale.

Remontée totale (ou franchissement, montaison) :

Définition a. Dans le cas de l'utilisation d'un système RFID, pour un poisson donné, celle-ci est définie comme étant la phase entre la dernière détection à l'antenne la plus en aval (n° 1) et la première détection à l'antenne la plus en amont (n°4) (Figure 4.13), à l'échancrure amont du bassin 6 (Figure 3.5).

Définition b. Dans le cas d'une collecte manuelle des données, pour un poisson donné, la phase de remontée s'étale depuis le début de l'expérience jusqu'au franchissement de

l'échancrure amont du bassin 6 selon la figure 3.5. Pour rappel, une fois qu'il y a eu une remontée, le poisson est isolé du système.

Remontée partielle : La remontée totale est un indicateur pratique dans ce contexte d'étude. Cependant, il arrive que des remontées partielles soient réalisées. L'utilisation unique des remontées totales cache en quelque sorte une part de la réalité comportementale. Les remontées partielles seront donc définies comme les phases entre la dernière détection à l'antenne la plus en aval (n° 1) et la première détection à l'antenne (n° 3) (Figure 4.13) située à l'échancrure aval du bassin 6 (Figure 3.5).

Descente totale (ou dévalaison) : Dans le cas de l'utilisation d'un système RFID, celle-ci est définie comme étant la phase délimitée par une dernière détection à l'antenne la plus en amont (n° 4) jusqu'à la première détection à l'antenne la plus en aval (n° 1) (Figure 4.13). Par conséquent, une dévalaison fait toujours suite à une montaison.

Période de journée : Elle est initiée par l'allumage des projecteurs ou par le début de l'expérience et se termine par l'extinction des projecteurs.

Période de nuit : Elle est initiée par l'extinction des projecteurs et se termine par l'allumage des projecteurs.

5.1.2 Définition des indicateurs

Afin de caractériser la franchissabilité de la passe, des indicateurs sont utilisés. Ceux-ci sont définis ci-dessous. Le but de ces indicateurs est de permettre la comparaison des résultats entre chaque lot.

1. Le taux de franchissement de la passe est défini comme étant :

$$\frac{\text{Nombre d'individus ayant effectué au moins une remontée totale}}{\text{Nombre total d'individus}} \times 100 [\%] \quad (5.1.1)$$

Le taux de franchissement donne une idée de l'efficacité de remontée d'un lot. Cependant, cet indicateur ne prend pas en compte le temps d'expérience qui influence fortement la proportion d'individus remontés.

2. La fréquence moyenne de franchissement est définie comme étant :

$$\frac{\text{Nombre total de remontées totales}}{\text{Temps total de l'expérience}} [\text{remontées/heure}] \quad (5.1.2)$$

Cet indicateur est utile car il permet de rendre compte de l'activité d'un lot. Cependant, il peut être biaisé par les individus ayant réalisé un nombre de remontées trop important. De plus,

le caractère moyenné de cette valeur ne rend pas compte de périodes plus intenses d'activité. Il est dépendant du nombre de poissons du lot.

3. Le taux de franchissement par heure est défini comme étant :

$$\frac{\text{Taux de franchissement}}{\text{Temps total de l'expérience}} \text{ [%/heure]} \quad (5.1.3)$$

Cet indicateur rend compte de la fraction moyenne d'une population qui réalise une remontée toutes les heures. Il est utile dans la comparaison de différentes expérimentations avec différentes espèces, car il n'est pas dépendant du nombre d'individus et de la durée expérimentale.

4. Le taux de répétition des remontées est défini comme étant :

$$\frac{\text{Nombre d'individus remontés totalement au moins deux fois}}{\text{Nombre total d'individus remontés totalement au moins une fois}} \times 100 \text{ [%]} \quad (5.1.4)$$

Le taux de répétition des remontées rend compte du caractère répétable des remontées lorsqu'une première a été réalisée. Celui-ci est intéressant car il rend compte de la tendance qu'ont les poissons à accomplir de nouvelles remontées après en avoir réalisé une première.

5. Le taux de remontées partielles est défini comme étant :

$$\frac{\text{Nombre de remontées partielles}}{\text{Nombre de remontées totales}} \text{ [%]} \quad (5.1.5)$$

Le taux de remontées partielles permet d'indiquer si ces dernières influencent considérablement la réalité expérimentale par rapport à l'interprétation du nombre de remontées totales.

6. Le coefficient de variation (c_v) est aussi utilisé pour caractériser la variabilité des résultats. Celui-ci est défini par la formule suivante :

$$c_v = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \text{ [%]} \quad (5.1.6)$$

où μ est la moyenne arithmétique des données et σ est l'écart-type des données.

Bien que la dynamique d'un banc est un phénomène bien plus complexe (Tien et al., 2004), nous allons la caractériser par une attraction que possède un poisson pour ses voisins. Ce phénomène est un facteur clef dans la vie en banc et pour la survie. Pour illustrer cette tendance, l'indicateur appelé « proportion de remontées réalisées en groupe » est utilisé et est défini par l'équation suivante :

$$\frac{\sum(\text{mouvements individuels réalisés en paire ou plus})}{\sum(\text{mouvements individuels})} \times 100 \text{ [%]} \quad (5.1.7)$$

Un mouvement individuel est considéré comme le passage d'un bassin à un autre par un seul poisson. Par exemple, si un passage est réalisé par deux poissons, il y a deux mouvements individuels.

5.1.3 Tests statistiques réalisés

Pour déterminer s'il existe une influence de la longueur d'une espèce de poisson et le temps de remontée de cette espèce, la méthode suivante est utilisée selon l'avis de Gengler (2017, comm. pers.).

Une régression linéaire ($y = a.x + b$) est tracée entre la variable de taille et le temps de remontée à partir des données expérimentales collectées lors de l'isolement des individus remontés. La régression linéaire minimise la somme du carré des résidus. Par exemple, si le coefficient de pente (a) est négatif, la relation entre la taille et le temps de remontée est négative.

La significativité de cette régression doit être vérifiée à l'aide d'un test statistique. Pour ce faire, une analyse de la variance est réalisée grâce au programme *JMP* (SAS, Cary, États-Unis). En définissant un seuil de 0,05, la valeur déterminée pour la P-valeur va permettre de tester l'hypothèse que la variable en abscisse (la longueur) soit une variable explicative du temps de remontée. Par exemple, si la P-valeur est supérieure à 0,05, la taille n'est pas une variable significativement explicative du temps de remontée.

Dans le but de déterminer s'il existe une influence réelle de la succession des remontées sur le temps de remontée d'une espèce de poisson, la méthode statistique suivante est utilisée. Celle-ci a été conseillée par Gengler (2017, comm. pers.).

Premièrement, seuls les temps de remontée des individus ayant accompli au moins deux franchissements sont utilisés. Il est en effet absurde d'utiliser les temps de remontée d'individus n'ayant franchi qu'une seule fois le modèle puisque rien n'indique que leur comportement soit le même que celui des individus ayant réalisé au moins deux remontées.

Pour information, la première remontée est la remontée 1, la deuxième est la remontée 2 et ainsi de suite. Génériquement, si les temps de deux remontées distinctes sont comparés, ces dernières sont nommées remontée i et remontée $i + 1$ ($\forall i \in \mathbb{N}^*$).

Dans le cas d'échantillons appariés, une comparaison de moyennes est réalisée. Le but est de déterminer s'il est possible d'accepter/de rejeter l'hypothèse que la moyenne des différences entre les remontées i et $i+1$ ($\forall i \in \mathbb{N}^*$) soit égale à 0 en caractérisant la significativité des données.

Notons que, pour réaliser ce test, il est nécessaire de l'appliquer à un minimum de 20 données (Bonnetain, 2013).

Pour ce faire, les hypothèses suivantes sont formulées.

$$H_0 : \Delta_\mu = 0 \text{ et } H_1 : \Delta_\mu \neq 0$$

où Δ_μ est la moyenne des différences de temps de remontées entre la remontée i et la remontée

$i+1$ ($\forall i \in \mathbb{N}^*$).

Pour répondre à ces hypothèses, la statistique t_{obs} est déterminée selon l'équation ci-dessous (Bonnetain, 2013). Les différences entre les temps de remontées suivent hypothétiquement une loi normale.

$$t_{obs} = \frac{(\Delta_{\mu} - 0)}{\sqrt{\frac{var_{\Delta}}{n}}} \quad (5.1.8)$$

où var_{Δ} est la variance des différences entre la remontée i et la remontée $i+1$ et n le nombre d'individus.

En utilisant une table de Student, pour un degré de liberté $n-1$ et une valeur seuil de 0,05, il est possible de déterminer une valeur qui permet de rejeter ou non l'hypothèse de départ.

Si $|t_{obs}|$ est inférieur à la valeur lue dans la table de t pour le nombre de degrés de liberté ($n-1$) et le risque de 5 %, les moyennes ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %.

Si $|t_{obs}|$ est supérieur, les moyennes diffèrent significativement et le risque indiqué par la table pour la valeur $|t_{obs}|$ trouvée fixe le degré de signification. (Bonnetain, 2013, p.55)

5.2 Les saumons (*Salmo salar*)

- Nombre de lots : 1
- Nombre d'expérimentations : 1
- Nombre d'individus : 20
- Type d'expérience : franchissabilité
- Injection : bassin 1 (figure 3.5)
- Acquisition des données : RFID
- Température moyenne : 14 °C
- Durée de l'expérience : 20 heures (15h30 à 11h30)
- Période : (08/11/16 au 09/11/16)

5.2.1 Efficacité des remontées

Le nombre de remontées réalisées et le nombre d'individus les ayant réalisées sont présentés dans le tableau 5.1.

TABLE 5.1 – Tableau du nombre de remontées réalisées selon le nombre de saumons les ayant achevées

Nombre de remontées réalisées	0	1	2
Nombre d'individus les ayant réalisées	14	3	3

Pour faciliter la visualisation de l'efficacité du franchissement des saumons, un diagramme circulaire a été dessiné (Figure 5.1).

**Proportion de saumons regroupés selon
le nombre de remontées effectuées**

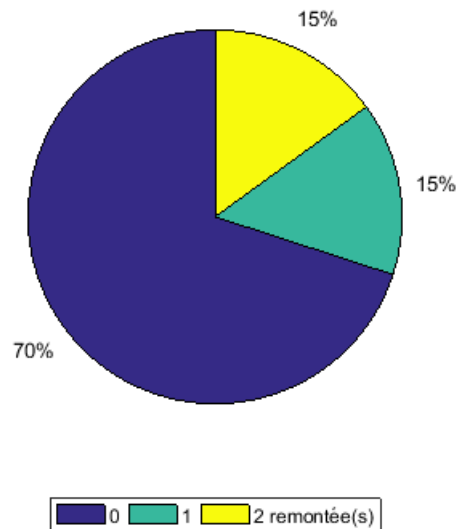


FIGURE 5.1 – Diagramme circulaire présentant la proportion de saumons regroupés selon le nombre de remontées effectuées

Ces données permettent de quantifier certains indicateurs qui ont été définis à la page 101. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.2.

TABLE 5.2 – Tableau des résultats des indicateurs de remontées pour les saumons

Taux de franchissement	30 %
Fréquence moyenne des remontées	0,45 remontée/heure
Taux de franchissement par heure	1,5 %/heure
Taux de répétition des remontées	50 %

Une première observation montre que les saumons juvéniles ont les capacités physiques nécessaires pour remonter dans la passe étant donné que 30 % des individus ont réalisé au moins une remontée.

D'autre part, il semble que les remontées réalisées par les saumons soient très restreintes étant donné un taux de franchissement de 1,5 %/heure seulement. Ce résultat semble surprenant étant donné les capacités de nage des saumons. Ces derniers étaient probablement peu motivés à réaliser des remontées complètes.

Le taux de répétition est assez élevé. Cela signifie que les saumons ayant réalisé une première remontée sont très enclins à en réaliser une deuxième. Ce constat permet d'affirmer que l'accomplissement d'une première remontée ne semble pas constituer un handicap pour la réalisation d'une seconde remontée.

À titre de comparaison, Pype (2015) avait collecté les résultats suivants pour des saumons at-

lantiques.

TABLE 5.3 – Tableau présentant les résultats collectés par Pype (2015) pour des saumons atlantiques juvéniles

	Expérience 1	Expérience 2
Taux de franchissement [%]	19	3
Fréquence moyenne des remontées [remontée/heure]	0,18	0,03
Taux de franchissement par heure	0,20	0,03

L'expérience 2 montre un très faible taux de remontées car les poissons n'étaient pas dans un bon état sanitaire.

L'expérience 2 montre aussi des taux de franchissement plus faibles que dans le cadre de notre expérimentation. Le protocole expérimental de Pype définit le bassin d'introduction comme étant le bassin 0 (Figure 3.5). Il n'est donc pas surprenant que le taux de franchissement par heure soit plus faible que celui déterminé selon notre protocole. Ce constat est renforcé par le fait que la durée d'expérience n'était que de quatre jours.

Bien qu'il soit difficile d'interpréter le comportement sans une certaine influence anthropomorphiste, il est possible que le faible taux de franchissement résulte d'un manque de motivation à réaliser des remontées totales. Le poisson se déplace afin de trouver des zones où sa stabilisation est facilitée. Bien qu'ils possèdent une vessie natatoire, les saumons juvéniles sont généralement restés sur le fond du modèle, comme le montre la figure 5.2. Ce comportement peut expliquer la réalisation de remontées en plusieurs heures. Rester sur le fond permet au saumon d'économiser de l'énergie.



FIGURE 5.2 – Cliché d'un saumon juvénile restant sur le fond du modèle pour se stabiliser

De plus, un comportement territorial a été observé par Pype (2015). Les déplacements dans la passe peuvent donc aussi avoir pour but d'éviter l'agressivité. Ces déplacements peuvent aussi

résulter de la compétition entre individus, certains poissons étant chassés par d'autres.

En conclusion, il est nécessaire de répéter d'autres expériences avec des saumons pour pouvoir fiabiliser nos résultats. De même, une autre campagne de collecte de données permettrait d'alimenter l'interprétation comparative de chaque expérimentation avec de nouveaux résultats.

5.2.2 Temps de remontée

Les temps des remontées totales peuvent être interprétés comme des temps durant lesquels l'endurance du poisson est mise à l'épreuve. Lier ces temps d'endurance avec les capacités de nage spécifiques probables peut être très instructif. L'extrapolation de ces interprétations à une passe réelle a pour but d'évaluer si cette passe est un frein significatif à la remontée migratoire des saumons.

La remontée la plus rapide a été réalisée en 6 minutes. Une autre a duré entre 10 et 30 minutes, deux remontées ont nécessité entre 30 et 50 minutes et enfin, deux plus lentes entre 50 et 100 minutes. Les deux remontées restantes ne sont pas prises en compte, car celles-ci ne caractérisent pas un processus net de remontée (> 100 minutes). Les résultats détaillés sont présentés en annexe (tableau C.1).

Bien que l'échantillon soit très restreint, nous remarquons qu'il existe une diversité dans les temps de remontée qui s'étale de 6 à 94 minutes. Cela montre que les saumons juvéniles possèdent l'endurance pour remonter le modèle sur une large gamme de temps. Le franchissement de la passe ne devrait donc pas poser de problème pour des saumons de cette taille.

5.2.3 Remontées partielles

Tout d'abord, le taux de remontée partielle est évalué à 78 %. Étant donné ce résultat élevé, il est nécessaire de prendre conscience que la quantification des remontées totales ne permet pas de rendre compte de toute la réalité comportementale du modèle. Par exemple, un poisson resté une dizaine d'heures entre l'antenne n° 2 et l'antenne n° 3 (Figure 4.13) a pu être observé. Cela démontre que les indicateurs de remontées totales ne comptabilisent pas certains aspects expérimentaux. Les réalités expérimentale et comportementale sont en effet bien plus complexes. Le simple fait que les individus ne franchissent pas à 78 % l'échancrure en amont (n° 4) montre que l'interprétation de la dynamique des mouvements des saumons doit être réalisée avec prudence si la notion de « remontée » est utilisée.

5.2.4 Influences de la photopériode, de la longueur du poisson et de la succession des remontées

Tout d'abord, il est nécessaire de rappeler que les échantillons de données collectés sont très restreints. Par conséquent, il est difficile de distinguer une tendance significative dans ces résultats. Par exemple, les tests statistiques utilisés pour déterminer un effet de la longueur ou de

la succession des remontées ne sont pas applicables dans ce cas, car l'échantillon de données ne dépasse pas 20 individus.

Les influences sont des facteurs affectant une variable d'intérêt (la remontée). Pour pouvoir confirmer significativement des tendances, un grand nombre de données est requis. Par conséquent, il est peu prudent d'interpréter les résultats collectés lors de cette expérimentation.

Néanmoins, ces derniers sont présentés en annexe (Figures C.1, C.2 et C.3). Ces figures permettent de juger du manque de significativité des données.

À l'avenir, si d'autres expérimentations sont réalisées avec des saumons atlantiques, il pourrait être intéressant de compiler l'entièreté des données collectées durant les expériences réalisées dans le modèle.

5.3 Les ablettes communes (*Alburnus alburnus*)

- Nombre de lots : 2
- Nombre d'expérimentations : 2 (lot 1), 1 (lot 2), 2 (lots 1 & 2)
- Nombre d'individus : Lot 1 = 45, lot 2 = 18, lots 1 & 2 = 63
- Type d'expérience : franchissabilité
- Injection : bassin 1 (figure 3.5)
- Acquisition des données : manuelle
- Température moyenne : 14,5 °C
- Durée de l'expérimentation : 3 heures
- Période : 21/11/16 au 30/11/16

Comme expliqué précédemment, il n'a pas été possible de marquer les ablettes avec des PIT tags. En effet, le risque de perdre la majeure partie du lot et de biaiser irrémédiablement les données collectées était trop élevé.

De par ce constat, la définition d'une remontée se réfère à la définition b. de la page 101. Il n'a cependant pas été possible d'étudier certaines influences comme la photopériode, l'effet de la succession des remontées, etc. Néanmoins, comme l'heure de franchissement et la taille des poissons remontés ont été déterminées, l'efficacité des remontées ainsi que l'influence de la taille ont pu être étudiées.

5.3.1 Efficacité des remontées

Le tableau 5.4 présente les résultats obtenus pour les différentes expérimentations. Les moyennes, les écarts-types et les coefficients de variation y sont aussi exposés. Pour rappel, les définitions de ces indicateurs sont présentées à la page 101.

TABLE 5.4 – Tableau des résultats des indicateurs de remontées pour les ablettes communes

Lot	Nombre de remontées	Taux de franchissement [%]	Fréquence moyenne de franchissement [remontées/heure]	Taux de franchissement par heure [%/heure]
1. Lot 1	6	13	2	4,5
2. Lot 1	7	16	2,5	5,5
3. Lot 2	1	5,5	0,5	2
4. Lots 1 & 2	0	0	0	0
5. Lots 1 & 2	1	1,6	0,5	0,5
Moyenne	3	7	1	2,5
Écart-type	3,2	7	1	2,4
Coefficient de variation [%]	106	100	100	104

Remarquons que le taux de répétition n'est pas présenté car il n'est pas pertinent dans ce contexte. En effet, les ablettes remontées sont immédiatement isolées et ne peuvent réaliser qu'une seule remontée.

Selon les coefficients de variation du tableau 5.4, les expérimentations avec les ablettes sont très variables. Ces indicateurs de variabilité prennent partout une valeur d'au moins 100 %. Chaque expérimentation doit donc être interprétée indépendamment. La variabilité des résultats peut s'expliquer en partie par le peu de temps laissé aux ablettes pour remonter. Ainsi, étant donné la quantité limitée de remontées, il est nécessaire de prévoir un temps d'expérimentation plus long.

En outre, ces résultats montrent la capacité de certaines ablettes communes à remonter le modèle réduit. Cependant, au vu du peu d'individus remontés, il semble difficile d'affirmer avec certitude que la totalité du groupe possède les capacités de nage nécessaires à la réalisation d'une montaison.

5.3.2 Temps de remontée

Trois remontées ont été réalisées en moins de 15 minutes (10, 10 et 13 respectivement) au début des sessions expérimentales.

Cela suggère que les ablettes communes possèdent une capacité de nage permettant une remontée totale en moins de 15 minutes. Cependant, rien ne permet de préciser le type de nage (soutenue ou de croisière) majoritairement exercé durant de pareilles remontées.

Par ailleurs, les vitesses maximales des ablettes ne semblent pas être dépassées par le courant au niveau des échancrures des bassins. Ce constat est justifié par le fait que 14 remontées ont

été observées.

5.3.3 Répartition temporelle des remontées

La figure 5.3 représente une courbe cumulative du moment de la fin des remontées ainsi qu'un histogramme relayant la même information, mais par pas de temps de 10 minutes. La totalité des remontées réalisées durant les cinq expérimentations y est compilée selon le temps expérimental.

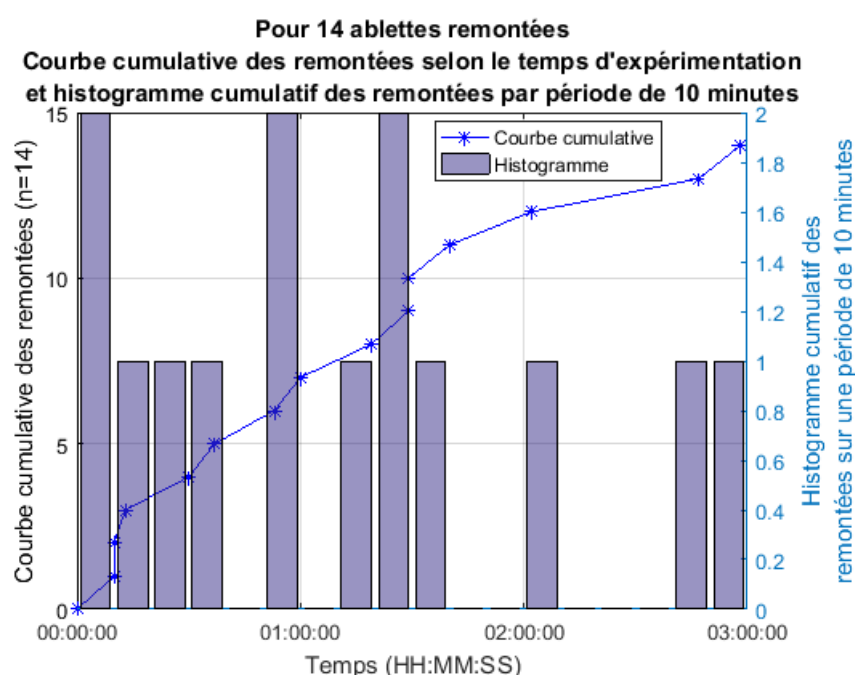


FIGURE 5.3 – Figure présentant une courbe cumulative des remontées selon le temps d'expérimentation et un histogramme cumulatif des remontées par période 10 minutes

L'analyse de cette figure indique que la grande majorité des remontées (80 %) est achevée avant l'heure et demie. Durant une période expérimentale de 3 heures, les ablettes communes semblent donc remonter durant la première moitié de l'expérience. Il aurait été intéressant d'évaluer la validité de ce constat à plus long terme.

En outre, les données présentées dans cette figure mettent en évidence un potentiel biais expérimental lié à l'introduction des poissons dans la passe. Il est alors délicat de tirer des conclusions quant à l'attractivité à remonter la passe pour les ablettes à cause d'une durée expérimentale trop limitée. Il aurait donc été nécessaire de réaliser des sessions expérimentales plus longues.

5.3.4 Influence des dimensions morphologiques du poisson

Pour déterminer s'il existe une influence entre la longueur et le temps de remontée des ailettes, il est nécessaire de réaliser un test statistique. Pour ce faire, une régression linéaire a été tracée entre la variable de taille et le temps de remontée à partir des données expérimentales collectées lors de l'isolement des individus remontés. Cette régression est présentée sur la figure 5.4.

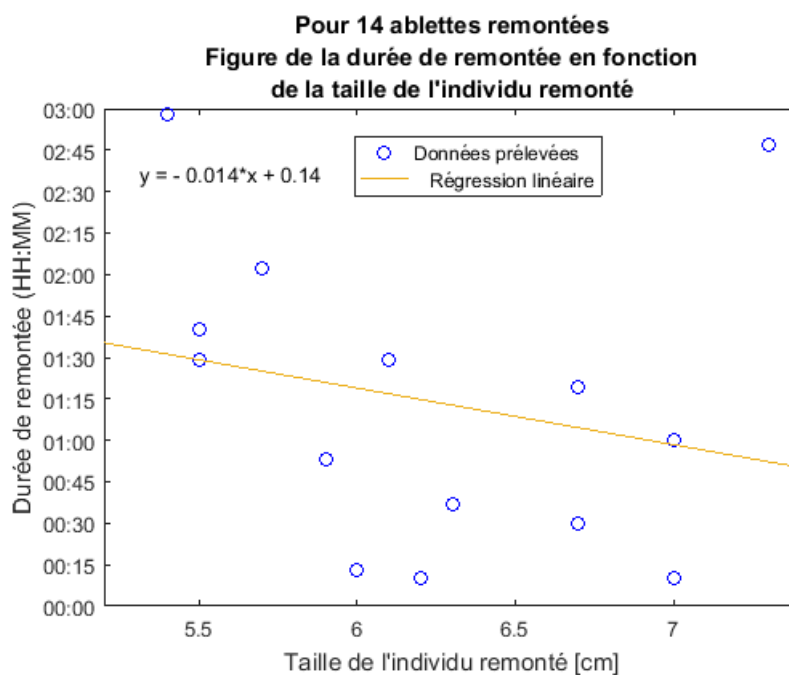


FIGURE 5.4 – Figure de la régression linéaire associée aux observations de temps de remontées selon la taille de l'ablette remontée

Le tableau 5.5 présente les résultats obtenus pour la régression linéaire ($y = a.x + b$) et son coefficient de détermination (R^2) ainsi que la corrélation entre les deux variables. En outre, les résultats des tests statistiques réalisés sont présentés. Notons que, bien qu'il soit nécessaire de collecter au moins 20 données pour pouvoir tirer des conclusions de ce test statistique, ce dernier permet de se faire une idée de la significativité des résultats malgré un nombre inférieur de données. Par conséquent, il est quand même appliqué.

TABLE 5.5 – Tableau présentant les résultats de régression et des statistiques réalisées

Coefficient a			
Valeur [min/mm]	P-valeur (analyse de la variance)	Corrélation	R^2
-2,05	0,424	-0,26	0,054

La régression linéaire indique une pente négative. Au plus le poisson est grand, au plus le temps de remontée est faible.

Néanmoins, le test statistique ne permet pas d'accepter l'hypothèse selon laquelle la taille est

une variable explicative du temps de remontée. Ce raisonnement est justifié par une P-valeur supérieure à 0,05. Cette conclusion est influencée par le faible nombre de données ainsi que par le caractère assez épars de celles-ci. De plus, le R^2 étant très élevé, la fiabilité des données est remise en question.

En conclusion, bien qu'il soit possible qu'il y ait une relation entre la longueur du poisson et la durée de sa remontée, les données récoltées ne permettent pas de confirmer ce constat.

5.3.5 Discussion des résultats par une approche éthologique

Une différence à ce point contrastée au niveau des résultats peut être également expliquée par un phénomène observé durant les sessions expérimentales. L'ablette est un poisson très grégaire qui ne peut survivre qu'en banc. L'image 5.5 illustre un banc d'ablettes formé dans le modèle réduit.



FIGURE 5.5 – Cliché d'un banc d'ablettes formé dans le modèle réduit

Etant donnée cette grégarité, l'indicateur défini par l'équation 5.1.7. est appliqué. Concernant cette analyse, seules les expérimentations 2 et 5 ont été utilisées. Durant ces dernières, plus d'un individu a pu être suivi manuellement dans les bassins 4-5-6 selon la figure 3.5. Les résultats pour cet indicateur sont présentés dans le tableau 5.6.

TABLE 5.6 – Tableau des résultats des remontées réalisées en paire ou plus pour les ablettes

	Expérimentation 2	Expérimentation 5
Mouvements individuels réalisés en paire ou plus	11	8
Mouvements individuels totaux	34	28
Proportion de remontées réalisées en groupe [%]	29	32

Bien qu'il soit difficile de comparer ces valeurs, elles permettent de mieux appréhender le comportement des ablettes à l'intérieur même de la passe. Remarquons que cet indicateur ne prend pas en compte les tentatives de franchissement de l'échancrure réalisées en paire ou plus qui ont été ratées.

La tendance grégaire des ablettes est illustrée par des proportions de remontées en groupe

de presque un tiers. Par conséquent, il est nécessaire de comprendre les phénomènes comportementaux induits par la grégarité. Il peut exister :

- une certaine inertie à la montaison induite par la stationnarité d'un banc principal dans le bassin d'introduction aval.
- un phénomène d'accentuation des montaisons en raison de la tendance de l'ablette à suivre le mouvement d'un individu voisin.

Néanmoins, pour une session expérimentale donnée, il est compliqué de discerner l'impact de ces deux phénomènes.

Par ailleurs, bien que les taux de franchissement restent en général très faibles, il est possible d'observer une diminution considérable des remontées entre les lots 1 et 2 et le lot total (1 & 2) selon le tableau 5.4.

Plusieurs raisons pourraient expliquer cette diminution drastique du nombre de remontées :

Tout d'abord, les ablettes n'étaient pas alimentées depuis leur capture dans la passe de Lixhe. Les aliments secs conventionnels n'étaient probablement pas assez attractifs pour des poissons sauvages.

La privation de nourriture peut avoir un effet sur la performance de nage des poissons (Martínez et al., 2002, Johnston, Goldspink, 1973). Cela peut être expliqué par une diminution globale du contenu de la réserve énergétique des muscles. Selon les résultats déterminés avec des plies communes (*Pleuronectes platessa*) par Johnston et Goldspink (1973), les muscles blancs semblent plus affectés si une activité constante de nage est maintenue. Cela pourrait expliquer la tendance à ne pas remonter dans les bassins en amont. Un effort anaérobie fréquent devant probablement être mis en œuvre lors d'une remontée, les ablettes ont probablement eu tendance à subsister dans le/les bassin(s) en aval. Il est donc certain que priver de nourriture des individus sur une longue période ne permet pas de réaliser l'expérimentation dans des conditions optimales. Remarquons que les ablettes utilisées ne disposent probablement pas de réserves énergétiques importantes, étant donné leur âge et leur stade de développement.

Considérant le manque de littérature étudiant l'effet de la privation de nourriture sur le comportement des ablettes communes, le raisonnement suivant est à interpréter avec beaucoup de prudence. Une grande proportion d'ablettes est restée dans les bassins 1 et 3 (figure 3.5). Ces bassins sont les moins turbulents. Les vitesses de courant atteintes en certains points sont les plus faibles du modèle réduit. De plus, étant donné la privation de nourriture, l'absence de stimuli chimiques associés, le stress engendré par l'introduction dans la passe, il est probable que la plupart des ablettes restées dans le bassin 1 ou s'étant déplacées au bassin 3 aient trouvé des vitesses de courant tout à fait viables à long terme. Pour rappel, pour respecter ces conditions, les vitesses ne peuvent pas dépasser la vitesse maximale de croisière des poissons. Ce constat est renforcé par le fait que les ablettes aient été laissées dans le modèle pendant quatre jours vers la fin de la session expérimentale sans qu'aucun signe d'épuisement majeur ne soit observé.

Ensuite, Lucas et Baras (2001) ont rapporté de nombreux comportements par lesquels des poissons, soumis à la pression d'un prédateur, inversent leur rythme circadien. Cela a pu notamment être observé chez les truites dans la nature. Chassée par de nombreux prédateurs, il n'est pas étonnant que cette espèce possède des mécanismes d'adaptation permettant d'éviter cette menace. Dans notre cas, tout comme cela s'est hypothétiquement produit à la pisciculture d'Erezée, il est fort probable que les ablettes aient adopté progressivement une stratégie de stationnarité (Lucas & Baras, 2001) durant la période d'activité diurne des infrastructures humaines dans lesquelles elles ont séjourné. Comme cela a pu être observé, la présence humaine est un signe de stress apparent pour les ablettes. Il aurait donc été instructif de pouvoir mesurer le mouvement des poissons durant la nuit pour valider l'hypothèse d'activité nocturne.

En outre, en cas de situation inconfortable et de stress, la tendance à rester en banc et à se maintenir dans ces bassins constitue une stratégie protectrice probable pour ce type d'espèce. Comme expliqué à la section 2.4.5, rester en banc confère des avantages par exemple au niveau de la création de tourbillons par les poissons en amont permettant de diminuer l'effort de nage des poissons en aval.

La conjonction de ces facteurs pourrait expliquer une certaine stationnarité en banc dans le bassin aval du modèle. Cependant, ces hypothèses comportementales ne peuvent être vérifiées grâce aux données collectées et à la littérature disponible. De plus, ces hypothèses éthologiques n'expliquent pas la présence d'individus ayant quitté les bassins aval pour réaliser des remontées totales et partielles.

5.4 Les chevesnes (*Squalius cephalus*)

- Nombre de lots : 6
- Nombre d'expérimentations : 6
- Nombre d'individus : 118
- Type d'expérience : franchissabilité
- Injection : bassin 1 (Figure 3.5)
- Acquisition des données : RFID
- Température moyenne : 14,9 °C
- Durée de l'expérience : 23 heures (10h00 à 9h00)
- Période : 23/02/17 au 06/03/17

5.4.1 Efficacité des remontées

Le nombre de remontées réalisées et le nombre d'individus les ayant achevées sont synthétisés dans le tableau ci-dessous. Les résultats sont globalisés pour l'entièreté des chevesnes, car le protocole était rigoureusement similaire pour chaque lot.

TABLE 5.7 – Tableau du nombre de remontées réalisées selon le nombre de chevesnes les ayant achevées

Nombre de remontées réalisées	0	1	2	3	4	5	6	7	8	13
Nombre d'individus les ayant réalisées	25	32	18	18	12	7	2	2	1	1

Par souci de clarté, le diagramme circulaire de ces données a été dessiné à la figure 5.6.

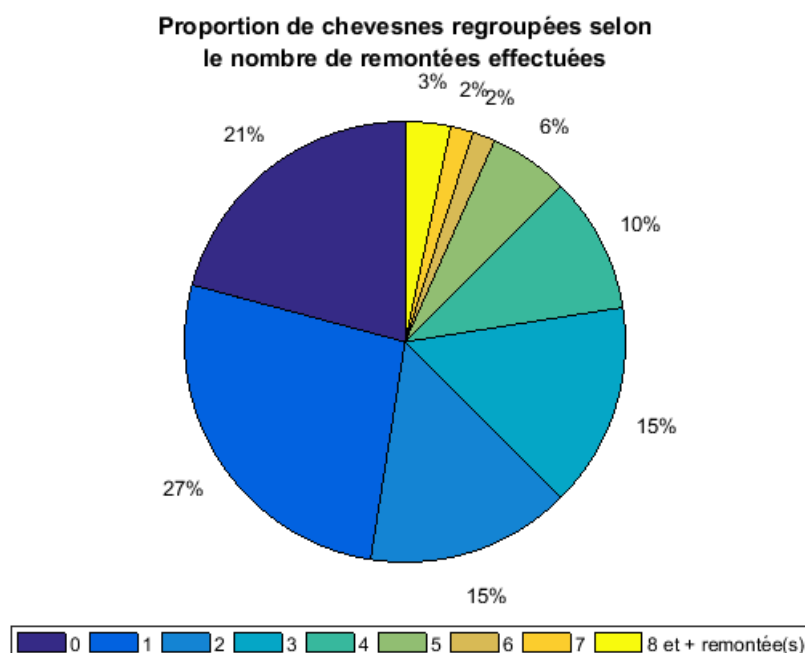


FIGURE 5.6 – Diagramme circulaire présentant la proportion de chevesnes regroupés selon le nombre de remontées effectuées

Ces données permettent de quantifier certains indicateurs qui ont été définis à la page 101. Les moyennes des résultats déterminés pour les 6 lots et les écarts-types et les coefficients de variation sont présentés dans le tableau 5.8. Les résultats détaillés pour chaque lot sont présentés en annexe, tableau C.3.

TABLE 5.8 – Tableau des résultats des indicateurs des remontées des chevesnes

	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation [%]
Taux de franchissement [%]	75	9	12
Fréquence moyenne des remontées [remontée/heure]	1,85	0,56	30
Taux de franchissement par heure [%/heure]	3,25	0,4	12
Taux de répétition	65	12	18

Le taux de franchissement est assez élevé. Durant l'expérience, en moyenne 75 % des che-

vesnes ont remonté le modèle de la passe. Les chevesnes ont effectivement les capacités de nage nécessaires pour réaliser des remontées dans ces conditions. Une valeur aussi élevée démontre aussi que, dans ces conditions expérimentales, les chevaines ont montré une motivation à remonter la passe. Ce constat est corroboré par le taux de répétition des remontées qui est plus grand que 50 %.

À l'exception de la fréquence moyenne des remontées, les coefficients de variation des indicateurs ne dépassent pas les 20 %. Des résultats moyennés sont donc utilisables, car il existe peu de variations entre les caractéristiques des remontées de chaque lot.

5.4.2 Temps de remontée

La figure 5.7 représente la distribution des durées des remontées cumulées pour tous les lots. À première vue, la distribution des temps des remontées semble se concentrer sur des durées

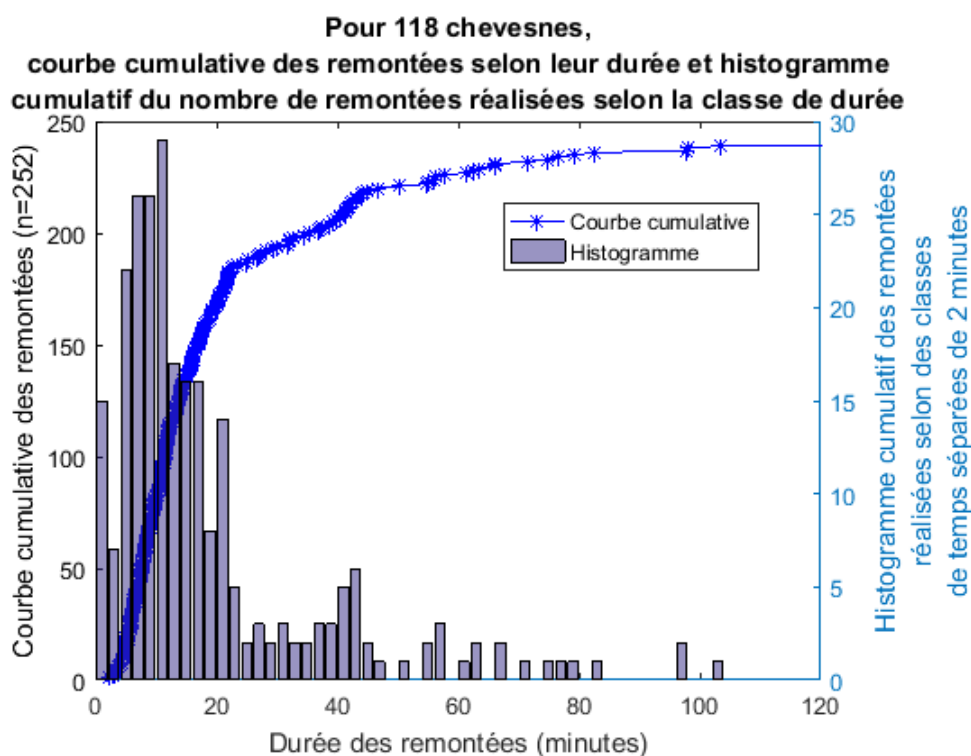


FIGURE 5.7 – Histogramme de densité des durées de remontée et courbe cumulative de ces données pour tous les chevesnes

de 0 et 20 minutes avec un maximum entre 6 et 12 minutes. Les durées de remontée moyenne et médiane valent 31,3 minutes et 14 minutes, respectivement. La moyenne est beaucoup plus élevée car biaisée par les valeurs de durée extrême.

Pour mieux appréhender les temps de remontée, le diagramme circulaire 5.8 est dessiné pour différentes classes de temps de remontées collectées pour l'entièreté des lots.

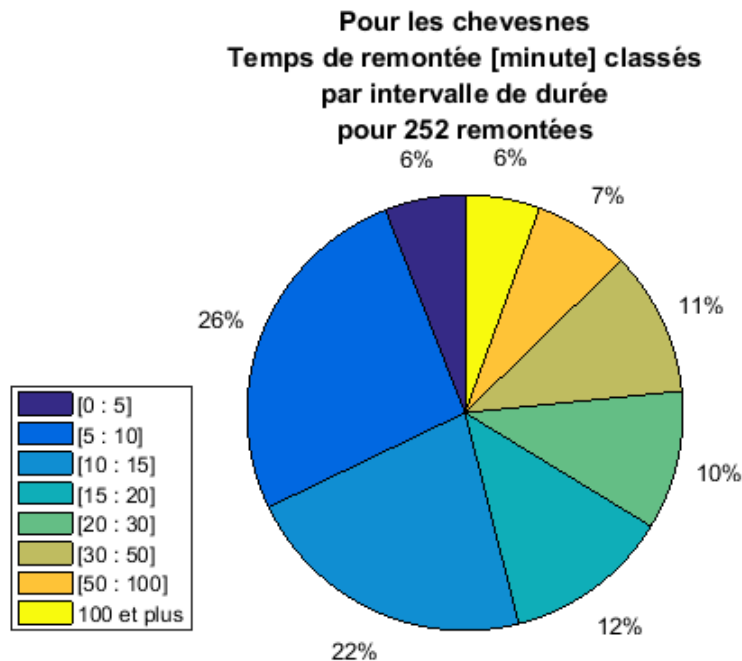


FIGURE 5.8 – Diagramme circulaire des chevesnes classés par intervalles de durée de remontée

La moitié des remontées ont été réalisées en moins de 15 minutes. Cela montre que la capacité de nage des chevesnes permet des remontées dans des temps assez courts. Ce constat est appuyé par le fait que le taux de répétition des remontées était assez élevé. Des remontées dans la passe ne devraient donc pas induire une fatigue musculaire importante.

Remarquons aussi que 6 % des remontées ont duré moins de 5 minutes, avec trois remontées entre 2 et 3 minutes. Ce temps de remontée ne semble pas permettre à priori une récupération après l'effort fourni par les muscles blancs. Sachant que la durée de reconversion du lactate accumulé dans les muscles blancs est de l'ordre de l'heure (Schulte et al., 1992, Pearson et al., 1990), il semble peu probable que les zones de recirculation des bassins aient permis cette reconversion durant ces remontées. De même, les temps de remontée de 30 minutes ne devraient pas permettre une récupération conséquente des muscles blancs du poisson. De plus, il semble donc fort probable que ce soit les muscles rouges qui interviennent majoritairement, car le temps d'endurance dans le modèle semble dépasser la demi-heure pour beaucoup d'entre elles.

En conclusion, selon la figure 5.8, les chevesnes ont clairement montré leur capacité à remonter efficacement la passe. En conclusion, des chevesnes de cette taille possèdent la capacité musculaire pour remonter très rapidement ce type de passe et même d'y rester à plus ou moins long terme grâce à leur endurance.

5.4.3 Répartition temporelle des remontées

La figure 5.9 rend compte de la répartition des remontées effectuées selon le temps expérimental. Dans ce graphique, la remontée est considérée lorsque le poisson atteint l'antenne la plus en amont du modèle. Les données sont cumulées pour l'entièreté des remontées réalisées par les six lots de chevesnes. Le rectangle grisé représente la délimitation temporelle de la reproduction artificielle de la nuit.

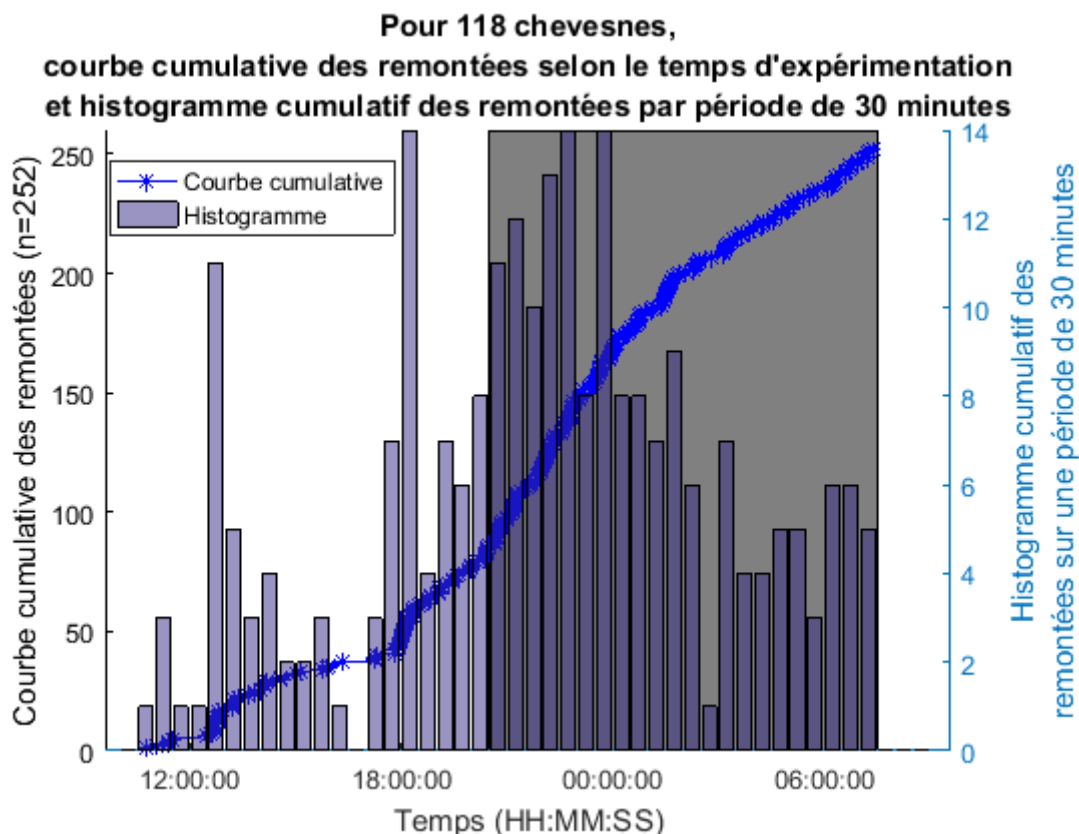


FIGURE 5.9 – Figure des remontées des chevesnes cumulées pour une courbe cumulative et par pas de temps de 30 minutes selon le temps

Entre 10h00 et 16h00, les remontées semblent être les moins fréquentes. Elles augmentent ensuite progressivement jusqu'aux alentours de 22h30. La réalisation de remontées diminue alors progressivement jusqu'à 04h00 où les remontées se stabilisent jusqu'à la journée suivante. Au lendemain, celles-ci s'arrêtent subitement.

Bien que les remontées aient lieu à tous les moments de la journée, il semble que certaines périodes soient privilégiées pour les réaliser. Par exemple, seulement 34 % des remontées ont lieu durant la journée. En moyenne, 15 remontées par heure sont effectuées durant la nuit (contre 8 remontées par heure durant le jour). Les chevesnes semblent donc avoir eu une activité plutôt nocturne. Ce constat est appuyé par le fait qu'aucune remontée n'a été terminée durant la deuxième journée (phase diurne).

La période d'activité privilégiée semble durer 6 heures, depuis la tombée du jour (20h30) jusqu'à 02h30. Même durant la nuit, certaines périodes semblent donc privilégiées à d'autres.

Par ailleurs, l'absence de remontées au début de la deuxième journée ne concorde pas avec la présence de remontées au début de l'expérience, lors la phase diurne de la première journée. Il se pourrait donc que l'après-midi soit la période de jour la plus propice aux remontées. Cela aurait pu être confirmé en augmentant d'un jour la durée de l'expérimentation. Néanmoins, il est fort probable qu'un effet lié au stress provoque certaines remontées immédiates en début d'expérience. En effet, certains chevesnes ont remonté très rapidement les bassins dès leur introduction, probablement motivés par la fuite.

5.4.4 Remontées partielles

Les résultats détaillés pour chaque lot de chevesnes sont compilés en annexe C.4. Dans cette section, les résultats moyennés sont utilisés. En moyenne, le taux de remontées partielles est de 59 % avec un écart-type de 25 %.

Comme pour les saumons, les remontées jusqu'à la troisième antenne constituent une part de la réalité expérimentale qui n'est pas quantifiée par les indicateurs des remontées totales. En ajoutant les remontées partielles au nombre de remontées totales, un taux de remontées partielles de 2,94 %/heure est obtenu contre 1,85 %/heure lorsque seules les remontées totales sont considérées. Cette valeur de 2,94 % témoigne de l'activité des chevesnes dans le modèle, bien que toutes les remontées n'aboutissent pas.

5.4.5 Influence de la succession des remontées

Tout d'abord, les durées de remontées vont être comparées selon leur succession. La figure 5.10 compile les durées des remontées pour chaque numéro de remontée. Les moyennes ainsi que les médianes entre chaque numéro de remontée y sont aussi tracées.

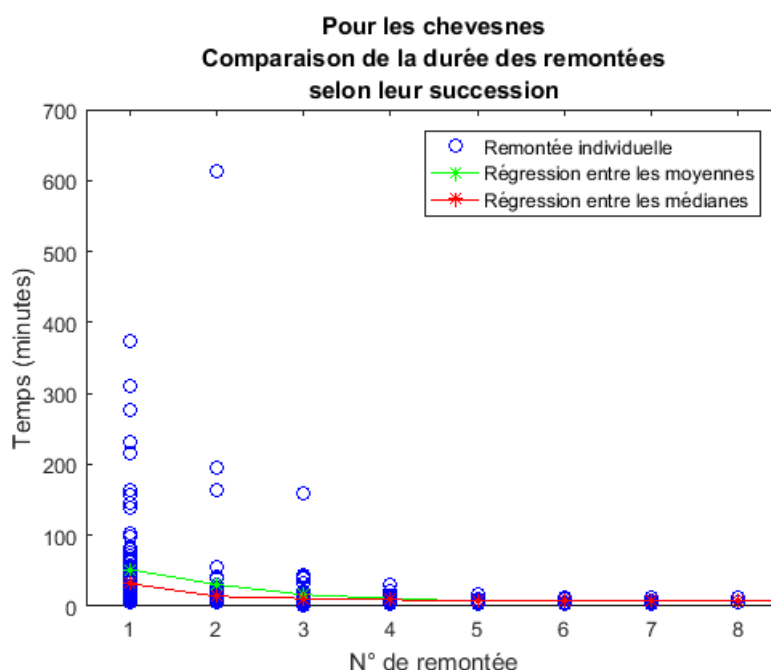


FIGURE 5.10 – Visualisation de l'effet des successions des remontées par les temps de remontées pour les chevesnes

À première vue, la distribution des durées est beaucoup plus éparse pour la première remontée que pour les remontées suivantes. Selon la figure 5.10, la moyenne est fortement influencée par les valeurs extrêmes, comparativement à la médiane. Elle n'est donc pas utilisée.

En considérant la médiane, une nette différence entre la valeur prise pour la première remontée et pour les remontées suivantes est remarquée sur la figure 5.10.

En réalisant un test statistique de comparaison de moyennes pour des échantillons appariés, les résultats exposés dans le tableau C.5 en annexe sont déterminés.

Selon les valeurs présentées dans le tableau C.5, il n'existe pas de différence significative au niveau des temps des premières et des secondes remontées.

Concernant la comparaison des deuxièmes et troisièmes remontées et des troisièmes et quatrièmes remontées, il ne semble pas y avoir non plus de différences significatives des moyennes. Les résultats sont aussi présentés dans le tableau C.5 en annexe.

En résumé, le test statistique montre que la succession des remontées n'est pas une variable explicative de la diminution des temps de remontées. Cependant, un phénomène possible pourrait bien avoir lieu entre la première et la seconde remontée, comme en témoigne la figure 5.10. Par conséquent, pour interpréter prudemment les résultats, la détermination d'autres influences est réalisée en séparément les remontées selon leur succession.

5.4.6 Influence des dimensions morphologiques du poisson

Comme expliqué à la section consacrée à l'exposé des facteurs influençant la capacité de nage, la longueur du poisson a théoriquement une influence sur cette dernière. Il est donc nécessaire de vérifier que ce facteur n'influence pas les résultats.

Après avoir rassemblé les données de chaque lot, une régression linéaire ($y = a.x+b$) est appliquée. Seules les quatre premières remontées ont été prises en compte, car les échantillons compilés présentaient une quantité d'observations supérieure à 20. Les régressions linéaires sont présentées à la figure C.5 en annexe. La majorité des régressions tendent à montrer une influence positive entre la longueur et la durée de remontée.

Ensuite, une analyse de la variance est réalisée. Les résultats associés sont présentés dans le tableau 5.9.

TABLE 5.9 – Tableau présentant les résultats de régression et les statistiques réalisées pour expliquer la relation durée de remontée-longueur

Remontée	Coefficient a		Corrélation	R ²
	Valeur [min/mm]	P-valeur (analyse de la variance)		
n° 1	0,49	0,47	0,076	0,006
n° 2	0,64	0,54	0,079	0,006
n° 3	-0,21	0,19	-0,229	0,073
n° 4	0,56	0,14	0,163	0,052

Seule la troisième phase de remontée envisage une relation négative entre la longueur et le temps de remontée.

Les R² étant très faibles et les P-valeurs supérieures à 0,05 pour chaque remontée, la taille ne peut expliquer pas de manière significative le temps de remontée. Ce constat est corroboré par les valeurs de corrélation qui sont très variables et sont très proches de 0.

Il est important de garder à l'esprit que, théoriquement, la longueur influence positivement les capacités de nage d'un poisson. Pourtant, la relation entre les temps de remontée et la longueur est positive. Cela vient du fait que, dans cette section, ce ne sont pas des capacités de nage qui sont utilisées mais bien des temps de remontée de la passe. Par conséquent, le facteur majeur influençant ces temps semble plutôt être lié au comportement durant la remontée et non à la longueur.

En outre, les différences de longueur au niveau du lot sont très faibles. Étant donné une influence comportementale prédominante, il semble complexe de discerner un effet quelconque de la taille. L'effet de la taille risque en fait d'être très faible car les intervalles de longueur sont très restreints.

Le facteur de condition prend en compte le rapport entre le poids et le cube de la longueur du poisson. Par conséquent, au plus il augmente, au moins la capacité de nage d'un poisson

devrait être optimale. À nouveau, une régression linéaire et des tests statistiques ont été réalisés pour chaque lot de chevesnes. Les régressions sont présentées à la figure C.6 Les résultats sont présentés dans le tableau 5.10.

TABLE 5.10 – Tableau présentant les résultats de régression et les statistiques réalisées pour expliquer la relation durée de remontée-facteur de condition

Remontée	Coefficient a		Corrélation	R ²
	Valeur [10 ⁶ mm ³ .min/g]	P-valeur (analyse de la variance)		
n° 1	-1,60	0,81	-0,025	<0,001
n° 2	1,47	0,89	-0,022	<0,001
n° 3	-5,14	0,11	-0,246	0,061
n° 4	0,66	0,60	0,108	0,012

Les résultats semblent mieux rendre compte d’une relation négative entre les deux variables, étant donné les résultats des régressions linéaires. Cependant, les coefficients de détermination (R²) restent très faibles.

Au vu des P-valeurs déterminées par l’analyse de la variance, il est difficile de confirmer la significativité de la relation entre le temps de remontée et le coefficient de condition des poissons. Les conclusions sont donc les mêmes que celles faites pour l’influence de la taille.

En conclusion, l’interprétation des résultats ne doit pas être manipulée pour prendre en compte une influence liée à la longueur ou au facteur de condition. Cependant, il est fort probable que le manque de données n’ait pas permis de mettre significativement en évidence une relation nette. De plus, il aurait été pertinent de reproduire l’expérience en utilisant des poissons présentant des longueurs s’inscrivant dans un plus grand intervalle. Le but serait de pouvoir mettre plus distinctement en évidence une quelconque relation.

5.4.7 Discussion des résultats par une approche éthologique

Les chevesnes sont considérés comme grégaires à l’état juvénile. Puisque la population utilisée est immature, l’indicateur « proportion de remontées réalisées en groupe » (équation 5.1.7) est déterminé pour chaque lot. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.11. Ceux-ci ont été déterminés pour l’antenne 3 lorsque le poisson passait définitivement cette dernière durant sa remontée. Ce choix méthodologique exclut beaucoup de tentatives et de passages, mais il permet d’assurer que la détection est bien celle d’un poisson en mouvement vers l’amont et qu’un passage a bien été réalisé. Les passages sont considérés comme groupés si elles sont séparées par moins de 5 secondes.

TABLE 5.11 – Tableau des résultats des remontées réalisées en paire ou plus pour les chevesnes

Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4	Lot 5	Lot 6	Moyenne	Écart-type
12,3 %	5,3 %	13,7 %	4,4 %	2,8 %	19 %	9,6 %	6,39 %

Le coefficient de variation de ces données est de 66,5 %. Cela montre qu'il y a une certaine hétérogénéité au niveau du comportement des lots. Il est important de souligner que ces résultats sous-estiment la réalité étant donné que lorsqu'un poisson réussit son passage, il peut arriver qu'un autre soit attiré et entreprenne lui aussi un passage. Ce passage peut alors ne pas aboutir alors qu'il n'y a pas eu détection de son PIT tag.

Néanmoins, ces résultats montrent que la grégarité des chevesnes peut avoir une influence dans le processus de leur remontée. Cela ne nous donne cependant que très peu d'indications pour extrapoler ce constat aux remontées dans l'environnement.

5.5 Les chabots (*Cottus gobio*)

- Nombre de lots : 6
- Nombre d'expérimentations : 6
- Nombre d'individus : 107
- Type d'expérience : franchissabilité
- Injection : bassin 1 (Figure 3.5)
- Acquisition des données : RFID
- Température moyenne : 15,4 °C
- Durée de l'expérience : 23 heures (10h00 à 9h00)
- Période : 20/03/17 au 29/03/17

5.5.1 Efficacité des remontées

Pour les six lots de chabots, aucune remontée totale n'a pu être observée durant la totalité des expériences. Parallèlement, aucun individu n'a été récolté en amont de la nasse anti-retour. Cela ne permet en rien d'exclure qu'il y ait eu du mouvement pendant la nuit. Rappelons que l'activité au sein même de la passe ne peut être déterminée, car les données RFID n'ont pas pu être traitées avec fiabilité.

Bien que certains individus aient changé de bassins, les observations ainsi que les données RFID ont montré que cette espèce était très statique. Il a été observé que beaucoup d'individus bougeaient très peu, voire pas du tout, à long terme. Remarquons que leur déplacement était principalement réalisé par saltation sur le fond plutôt que par une nage dans la colonne d'eau à proprement parler.

Lors d'un test préliminaire, un chabot de grande dimension a réalisé une remontée. Dans les bassins les plus turbulents, il s'est déplacé selon une nage ondulatoire dans la colonne d'eau et non par saltation sur le fond. Cependant, le manque de données empêche la confirmation de cette observation. Il est donc difficile d'affirmer que les plus grands chabots possèdent tous une capacité de nage permettant de remonter le modèle.

Étant donné ces résultats, il n'est pas possible de discuter des autres influences qui ont pu être abordées pour les trois autres espèces utilisées.

5.5.2 Discussion des résultats par une approche éthologique

Les chabots sont des poissons très territoriaux. Comme pour les truites, une distribution des poissons tout le long du modèle était attendue, car forcée par la compétition entre individus. De plus, cette espèce est très sédentaire et son refuge semble primordial à sa survie. La logique aurait voulu que les chabots cherchent à s'abriter dans des cachettes ombragées. Pour rappel, une zone de ce type avait été aménagée en amont de la passe en y plaçant des tubes en PVC et des pierres.

Les chabots se sont souvent retrouvés entassés, s'aidant probablement des autres individus pour accroître la rugosité du fond, très faible dans le modèle. En outre, les vitesses de courant peuvent aussi expliquer la présence de zones densément occupées, car facilitant la stationnarité du chabot.

De plus, les chabots avaient tendance à se maintenir sur les bords des bassins. Cela peut être expliqué par une vitesse de courant plus faible ou par un comportement de camouflage avec les éléments plus sombres du modèle.



FIGURE 5.11 – Cliché illustrant le phénomène d'entassement des chabots

Remarquons que leur comportement n'est pas en opposition avec les informations trouvées dans la littérature. Vivant dans les forts courants et étant une espèce benthique, le chabot a plutôt tendance à rester dans le fond de manière immobile afin de préserver son énergie. S'aidant

normalement de ses grandes nageoires pour s'agripper au substrat (Webb, 1994), ce dernier a la possibilité de subsister statiquement sans utiliser d'énergie à long terme (Lucas & Baras, 2001). Il est probable que les chabots n'aient pu se maintenir efficacement dans le modèle, étant donné la rugosité très faible du fond de la passe. La déstabilisation engendrée les a alors poussé à privilégier une stratégie d'exploration au sein même des bassins. Il n'a de ce fait pas été rare de voir les individus chercher un endroit du bassin où se stabiliser plus efficacement. Une fois cet endroit trouvé, le chabot a probablement tendance à y rester sauf si un autre individu vient à le chasser ou que le courant l'emporte.

Par ailleurs, lors des explorations du périmètre des bassins, les chabots passaient plusieurs fois en face de l'échancrure amont. Cependant, étant donné la légère élévation haussant le seuil de passage par l'échancrure et la tendance des chabots à rester sur les bords du modèle, il était difficile pour ces derniers de se retrouver face au courant entrant dans le bassin et de passer au bassin supérieur. Par conséquent, ce seuil pourrait être considéré comme un obstacle à la remontée de poissons benthiques.

En résumé, ces conditions expérimentales n'ont pas stimulé les chabots à remonter la passe et la franchissabilité peut être considérée comme nulle. Néanmoins, les conditions de laboratoire influencent fortement le comportement du poisson. Cependant, sans aucune information sur les remontées, il est difficile d'étudier l'influence comportementale sur le phénomène de montaison.

En conclusion, le manque de données ne permet pas de tirer de conclusions rigoureuses par rapport aux processus de remontée des chabots. Néanmoins nous constatons que l'attractivité à la remontée semble très difficile à provoquer en conditions de laboratoire. Les mêmes problèmes expérimentaux ont été rencontrés lors de l'évaluation de leur capacité de nage par Tudorache et al. (2007).

5.6 Comparaisons interspécifiques

5.6.1 Efficacité des remontées

Le tableau 5.12 synthétise les données moyennes pour les indicateurs de taux de franchissement et de fréquence moyenne de franchissement.

TABLE 5.12 – Synthèse des indicateurs de taux de franchissement et de fréquence moyenne de franchissement pour chaque espèce dans le but d'une comparaison interspécifique

	Taux de franchissement [%/heure]	Fréquence moyenne de franchissement [remontée/heure]
Saumon	1,5	0,45
Ablette	2,5	1
Chevesne	3,25	1,85
Chabot	0	0

Le protocole expérimental pour les ablettes diffère de celui des saumons, des chabots et des chevesnes. Le fait d'isoler les poissons remontés empêche une seconde remontée de ces poissons et les deux indicateurs (Tableau 5.12) sont donc sous-estimés. Cependant, étant donné une durée assez courte de la session expérimentale pour les ablettes, la part relative des secondes remontées qu'auraient pu réaliser les ablettes sera considérée comme négligeable.

Premièrement, l'échantillon limité pour les saumons et la variabilité élevée des résultats pour les ablettes montrent qu'il est nécessaire de posséder un grand nombre de poissons pour pouvoir répéter les expérimentations de manière indépendante comme pour les chevesnes.

Par ordre décroissant, le franchissement est le plus important pour les chevesnes, les ablettes, les saumons et les chabots. La passe ayant été conçue surtout pour des poissons pélagiques, il n'est pas étonnant que les chabots rencontrent certaines difficultés à remonter la passe.

Par ailleurs, il est très étonnant que les saumons aient réalisé moins de remontées que les ablettes et les chevesnes. Les saumons sont considérés comme bons nageurs. Le faible nombre de remontées peut donc être induit par leur comportement. Remarquons que les saumons juvéniles se stabilisaient sur le fond du modèle. Cependant, ce comportement n'est pas observé dans les passes à poissons durant les migrations de reproduction. Le comportement des saumons juvéniles est donc peu représentatif de celui qu'il adopterait après l'ma maturité.

5.6.2 Temps de remontée

Si bien interprétés, les temps de remontées permettent d'avoir une idée de la capacité d'un poisson à remonter la passe en donnant une idée de son endurance dans ce dispositif de franchissement.

Le tableau 5.13 synthétise les résultats des temps de remontée.

TABLE 5.13 – Tableau synthétique des temps de remontée pour chaque espèce expérimentée

Espèce	Temps de remontée		
	<5 minutes	>5 minutes <30 minutes	>30 minutes
Saumon atlantique	0	1	5
Ablette commune	0	4	10
Chevesne	15	176	61
Chabot	0	0	0

Ces données permettent d’avoir une idée de l’aptitude du poisson à franchir la passe en des temps différents. La passe peut être considérée comme franchissable si une espèce la remonte significativement durant les trois intervalles de temps considérés dans le tableau 5.13. Cela permet d’avoir une idée de l’aisance de déplacement du poisson dans le modèle réduit ainsi que de sa capacité à y rester à long terme. Si le poisson ne peut rester durablement dans le modèle, il va tout simplement s’épuiser et ne pas franchir le dispositif.

Pour les saumons, les remontées sont peu significatives. Cependant, de par les résultats observés par Pype (2015) pour deux espèces de salmonidés, les capacités de nage des saumons ne devraient pas limiter le déplacement des poissons dans la passe.

Les chevesnes possèdent le taux de franchissement le plus élevé. Remonter la passe ne semble alors pas leur poser de difficultés majeures. Ce constat est appuyé par des taux de répétitions importants.

Pour les ablettes, certains individus ont pu remonter rapidement la passe. Il semble donc bien probable que cette espèce ait eu la capacité de remonter le modèle réduit, mais rien ne permet de le vérifier pour l’entièreté du lot étant donné un échantillon de remontées très restreint.

Quant aux chabots, il est impossible de déterminer si les lots avaient la capacité de remonter la passe parce qu’aucune remontée n’a été réalisée. De plus, il subsiste une incertitude quant au mécanisme de nage de la remontée. Il est néanmoins probable que les grands chabots aient la capacité de remonter le modèle par saltation en pratiquant des arrêts plus ou moins longs à chaque bassin. Il semble cependant difficile de stimuler le chabot à remonter le modèle.

En outre, remarquons qu’aucun poisson n’a été retrouvé plaqué contre les moustiquaires

aval après 23 heures dans le modèle réduit. Cela montre que rester dans la passe ne requiert pas l'intervention des muscles blancs à long terme pour les poissons ayant un comportement strictement pélagique (chevesnes et ablettes), car aucun signe physique de fatigue n'a pu être décelé sur de longues périodes.

En conclusion, les capacités à remonter ou à rester dans le modèle sont synthétisées par le tableau 5.14.

TABLE 5.14 – *Synthèse des conclusions spécifiques déterminées sur base des temps de remontée dans le cadre de la détermination de la capacité des poissons à franchir ou, au moins, à rester dans le modèle*

	Capacité de remontée plus ou moins rapide	Capacité à rester durablement dans le modèle
Saumon	Oui (Pype, 2015)	Oui
Ablette	Pas confirmée	Oui
Chevesne	Oui	Oui
Chabot	Indéterminée	Oui

Selon le tableau 5.14, les chevesnes et les saumons possèdent la capacité physique pour remonter le modèle réduit. Par ailleurs, il subsiste une incertitude quant au cas des ablettes. D'autres expérimentations doivent être réalisées pour permettre de mieux comprendre leur potentiel de remontée. Quant aux chabots, reproduire une autre expérience ne pourrait probablement pas donner de résultats plus concluants. Cependant, l'incertitude subsiste et d'autres protocoles expérimentaux doivent être envisagés pour permettre de mieux comprendre leur capacité de remontée.

Par ailleurs, il est important de noter que rien ne permet de rendre compte de l'impact d'une remontée du modèle sur les réserves énergétiques des différentes espèces. Cependant, nous supposons que le fait de rester dans le modèle est probablement moins coûteux en énergie pour les saumons (à tendance benthique) et les chabots (strictement benthiques) que pour les chevesnes et les ablettes (strictement pélagiques).

5.7 Caractérisation de l'attractivité de la passe

Bien que beaucoup d'efforts aient été apportés à l'étude de la franchissabilité des passes à poissons, l'entrée dans la passe est cruciale pour permettre la remontée en amont d'un dispositif de franchissement. L'attraction est un facteur limitant potentiellement l'efficacité des passes à poissons. En effet, la performance à rétablir la continuité écologique est souvent grandement expliquée par la localisation au niveau de la rivière et par l'attraction sur le poisson (Williams et al., 2012).

Parfois, l'installation d'un débit d'attrait est nécessaire si le rejet de la passe n'est pas assez important ou est perturbé par des courants environnants. L'intérêt de ce débit d'attrait est de permettre au poisson de localiser efficacement l'entrée de la passe et de s'orienter pour rentrer dans le dispositif.

Pypte (2015) avait montré l'efficacité du débit d'attrait avec des salmonidés car ceux-ci avaient réalisé des entrées dans la passe depuis le bassin 0, représentant la Meuse, tout en aval du modèle (figure 3.5). Étant donné que les chevesnes ont été PIT tagués, une expérience visant à mieux comprendre l'efficacité du débit d'attrait a été réalisée. Une synthèse des paramètres expérimentaux est présentée ci-dessous.

- Nombre de lots : 1
- Nombre d'expérimentations : 6
- Nombre d'individus : 118 chevesnes
- Type d'expérience : Débit d'attrait
- Injection : Bassin 0 (figure 3.5)
- Acquisition des données : RFID, caméra
- Durée : 85,5 heures (09/03/17, 17.30 au 14/03/17, 07h00)

Pour rappel, à partir des données RFID, il est possible de quantifier les approches réalisées dans la passe à poissons et le débit d'attrait grâce aux informations RFID collectées par l'antenne 2 et 1 respectivement selon la figure 4.17).

Par conséquent, le nombre de détections à l'antenne 2 va être comparé au nombre de détections réalisées par l'antenne 1 au débit d'attrait selon un protocole de traitement de données présenté dans le chapitre *Matériels et méthodes*. Remarquons que les détections durant les phases d'entrée et de sortie sont retirées, de même que pour les détections séparées par un intervalle de temps inférieur à 5 secondes. Pour mieux appréhender la confusion entre le débit d'attrait et le débit au niveau du processus d'entrée dans la passe, l'indicateur suivant est déterminé.

$$\frac{\sum(\text{Nombre de détections dans le débit d'attrait})}{\sum(\text{Nombre de détections à l'entrée de la passe et dans le débit d'attrait})} \times 100 [\%] \quad (5.7.1)$$

La confusion dans la localisation de l'entrée engendrée par le débit d'attrait sera jugée négligeable si moins de 50 % des tentatives sont réalisées dans le débit d'attrait.

Pour les chevesnes, l'indicateur défini par l'équation 5.7.1. est quantifié à 20 %. Cela signifie qu'un cinquième des tentatives d'entrée est réalisé dans le débit d'attrait et non à l'entrée de la passe. Le débit d'attrait ne semble donc pas fortement interférer sur l'orientation du poisson vers l'entrée de la passe car l'indicateur ne dépasse pas 50 %.

En outre, l'interférence du débit d'attrait ne rend pas compte de l'efficacité relative de celui-ci. Par conséquent, les entrées dans la passe ont été quantifiées et sont présentées dans le diagramme circulaire 5.12. Seulement 24 % des individus n'ont pas réalisé d'entrée sur un total

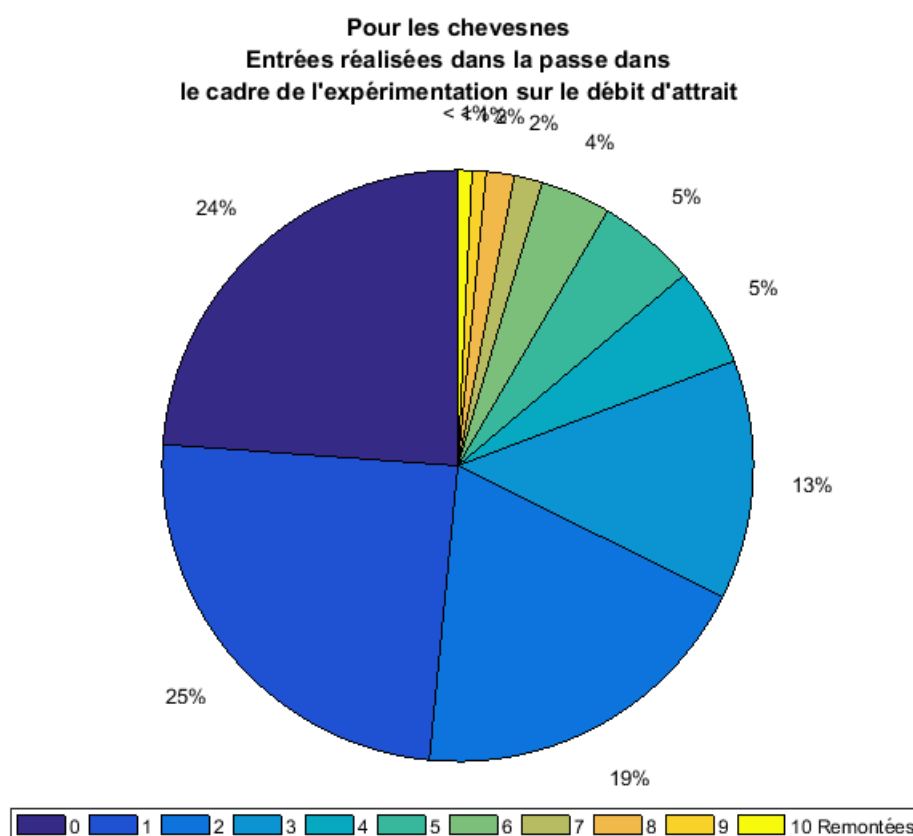


FIGURE 5.12 – Diagramme circulaire montrant les proportions de chevesnes selon le nombre d'entrées réalisées dans le modèle

de 85,5 heures. Étant donné ce haut taux d'entrée dans la passe, des chevesnes de ce gabarit possèdent la capacité physique pour rentrer dans le modèle réduit. De plus, ce résultat montre que la passe possède une certaine attractivité à l'entrée pour les poissons. Ce constat est appuyé par le fait que plus de 50 % des chevesnes ont réitéré une nouvelle remontée durant cette période de temps.

Par ailleurs, il est intéressant de comparer ces résultats aux données de Pype (2015). Le protocole est similaire à celui des expérimentations réalisées par Pype avec des saumons atlantiques (*Salmo salar*) et des truites fario (*Salmo trutta fario*). Le tableau 5.15 présente les résultats obtenus dans le cadre de l'expérimentation avec les chevesnes et des expérimentations réalisées par Pype (2015).

TABLE 5.15 – Tableau présentant les résultats d'entrées dans le modèle et des longueurs des lots dans le but d'une comparaison entre les chevesnes et les salmonidés.

	Chevesne	Saumon 1	Saumon 2	Truite fario
Taux d'entrée [%]	76	57	39	23
Taux d'entrée par heure [%/heure]	0,89	0,59	0,36	0,13
Longueur moyenne [mm]	78,8	110,5	110,5	155,3
Intervalle des longueurs [mm]	[59 - 102]	[80 - 150]	[80 - 150]	[100 - 170]

Remarquons que le taux d'entrée représente le rapport entre le nombre d'individus entrés dans la passe et le nombre total d'individus du lot utilisé. Cet indicateur peut être rapporté au nombre d'heures de l'expérience pour le rendre comparable.

Selon les résultats présentés dans le tableau 5.15, les chevesnes semblent être plus motivées à réaliser des entrées dans la passe. Leur gabarit étant bien inférieur à ceux des saumons et des truites fario, ce résultat démontre que la longueur n'est pas toujours un facteur limitant dans ce type d'expérimentation. Il est donc probable que le comportement spécifique des poissons influence beaucoup plus ces taux d'entrée. Par exemple, chez les salmonidés, très peu d'individus ont réalisé une seconde remontée. Quant aux chevesnes, comme le montre la figure 5.12, plus de 51 % des individus ont réalisé au moins deux entrées dans la passe. Ces dernières observations renforcent les constatations comportementales observées dans le cadre des expérimentations de franchissement. Les saumons (semi-benthiques) ont un comportement plus stationnaire que les chevesnes (strictement pélagiques).

Finalement, il est important de garder à l'esprit que ce type d'expérience est très peu représentatif des conditions de terrain. Le modèle réduit ne possède en effet pas d'installation permettant de simuler l'effet du courant de la Meuse et de la turbine. Par conséquent, les résultats présentés dans cette section sont surestimés par rapport à la situation sur le terrain.

Résultats et discussions : comportement du poisson

écrit par Estelle Courtois

A côté de l'analyse de la franchissabilité de la passe, il est tout aussi intéressant de se pencher sur le comportement des différentes espèces de poissons au sein des bassins. Ce chapitre a pour but principal d'identifier les liens entre les caractéristiques de l'écoulement qui règne dans la passe et le comportement des poissons. Pour chacune des espèces étudiées dans ce mémoire nous ferons une analyse plus ou moins poussée - en fonction de la qualité des données - des notions suivantes : les zones préférentielles de présence, les vitesses des poissons, les trajectoires empruntées et enfin l'analyse de la nage.

6.1 Les salmonidés (*Salmonidae*)

Comme décrit dans le chapitre *Matériels et méthodes*, nous avons effectué des tests préliminaires avec un lot de tacons. Ces tests ont surtout permis de vérifier le fonctionnement du système de détection RFID, mais les tacons n'ont pas été filmés. Le comportement des salmonidés dans les bassins de la passe a cependant déjà largement été étudié par Jean-Charles Pype, dans son travail de fin d'étude réalisé lors de l'année académique 2014-2015. Les résultats découlant de cette étude ont été présentés dans la sous-section 3.1.3 du chapitre 3. Ils seront utilisés à la fin de ce chapitre-ci afin de comparer le comportement des salmonidés à celui des autres espèces étudiées.

6.2 Les ablettes communes (*Alburnus alburnus*)

Rappelons tout d’abord que les ablettes sont les premiers poissons que nous avons filmés dans la passe. Plusieurs facteurs ont compliqué l’analyse des données qui sont présentées dans la suite de cette section. Tout d’abord, le système de réglage des plexiglas permettant de lisser la surface de l’écoulement n’était pas encore optimal. Ensuite, les ablettes, de par leur petite taille, sont des poissons difficilement détectables par le traitement d’image automatisé réalisé grâce au logiciel ImageJ. Et finalement, le fait que le protocole était encore en cours de perfectionnement a pour conséquence le peu de répétabilité des expériences. Les résultats présentés dans cette section présentent donc une certaine marge d’erreur.

6.2.1 Zones de présence préférentielle

Un point important dans l’étude du comportement du poisson au sein de la passe est l’analyse des zones de présence préférentielle. Ce sont les zones des bassins dans lesquelles le poisson reste de façon prolongée et peut éventuellement se reposer avant d’entamer le franchissement de la prochaine échancrure. L’étude de ce paramètre est primordial. Après comparaison avec l’écoulement, il permet notamment de déceler si les poissons ont la possibilité de nager à un rythme de croisière, qui ne les fatiguent pas d’avantage. Nous avons décidé de faire cette analyse en utilisant les images du bassin 6 (le dernier bassin amont) prises par la caméra numéro 1, car ce bassin a pour rappel une géométrie standard.

Les images utilisées pour réaliser la figure 6.1 sont extraites de deux expériences reprises dans le tableau récapitulatif 4.10, notamment celles utilisant le lot complet d’ablettes. Pour chacune des expériences, un échantillon d’images de bonne qualité (images avec présence de poisson et surface d’écoulement lisse) a été sélectionné. En cumulant les deux échantillons d’images, le temps de prise d’images est de 1 heure et 20 minutes (somme de respectivement 50 minutes et 30 minutes). Les résultats de chaque lot pris séparément se trouvent en annexe D.1. Nous avons décidé de ne pas utiliser les autres tests, car les images étaient de moins bonne qualité.

Le graphe a été obtenu en créant un maillage sur l’image et en comptant pour chaque maille le nombre de détections de poisson. Ce nombre de détections a ensuite été divisé par 15 (nombre d’images par secondes) pour convertir les données en terme de temps cumulé par maille. Il représente donc une densité de présence sur une période égale au temps de prise d’image. Les résultats sont présentés sur une échelle logarithmique afin d’avoir une présentation plus contrastée. Le graphe présente une bande blanche entre les parois du bassin et les données. Ce biais à la limite de la ROI (Region Of Interest) est dû à la projection du fond du bassin.

Il est possible de distinguer quatre zones préférentielles. Une de ces régions du bassin peut être considérée comme la zone principale (zone 1, en bas à gauche, près de l’échancrure amont),

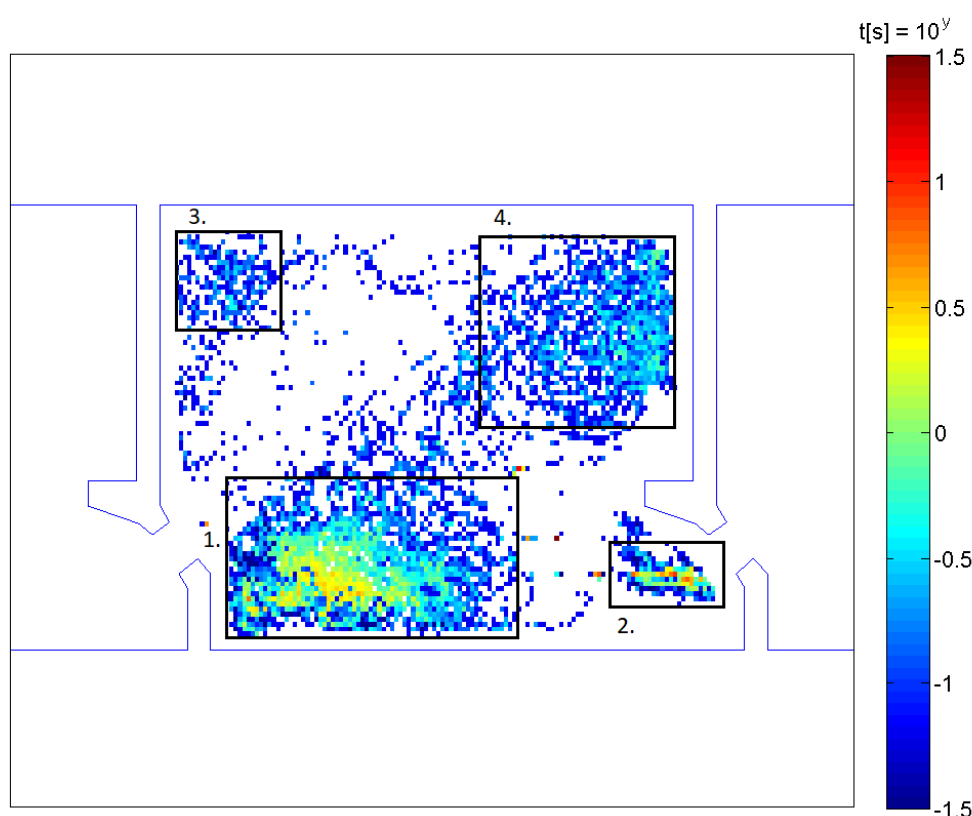


FIGURE 6.1 – Représentation graphique des zones de présence préférentielle des ailettes

car elle est clairement plus grande et elle compte un plus grand nombre de détection de poissons.

Une deuxième zone ressort de ce graphe (zone 2, en bas à droite, près de l'échancrure aval). Cette zone présente cependant un écoulement avec de fortes turbulences. Il serait très étonnant que les poissons y restent de façon prolongée, or le nombre de détections y est élevé. L'explication à ce phénomène est probablement une détection de bulles créées par l'écoulement mouvementé. Nous tenterons de vérifier cette hypothèse par la suite.

Rappelons, à la figure 6.2 (graphe identique à celui présenté dans la section *Présentation de l'écoulement* du chapitre 3), la représentation graphique des vitesses scalaires de l'écoulement au sein d'un bassin de dimensions standards dans le prototype réel. En mettant en parallèle les caractéristiques de l'écoulement et les densités de présence, une constatation flagrante peut être faite : les ailettes restent quasi exclusivement dans les zones de vitesses plus faibles. Elles évitent un maximum le jet principal et s'y aventurent uniquement lorsqu'elles tentent de franchir une échancrure ou pour passer d'une zone calme à une autre.

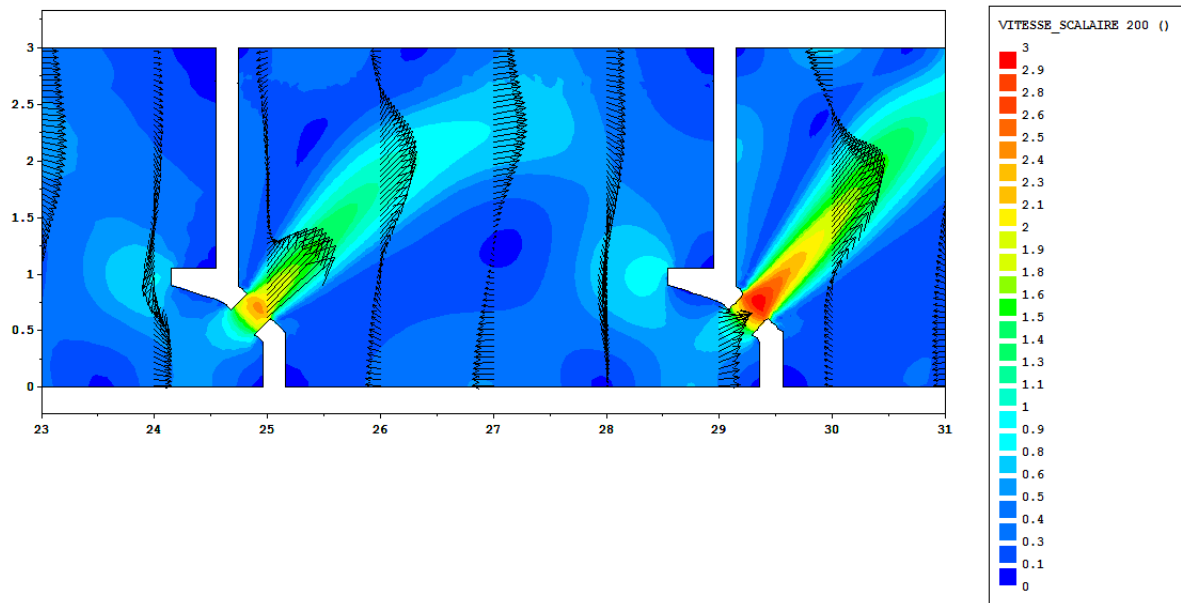


FIGURE 6.2 – Modélisation en deux dimensions (k -epsilon) des vitesses scalaires, exprimée en m/s, de l'écoulement au sein du bassin 4. Valeurs calculées pour le prototype. Les distances sont données en mètres. (Bagnée & De Greef, 2014)

6.2.2 Vitesses

Une autre information essentielle qui lie le comportement du poisson à l'écoulement régnant dans la passe est l'étude de la vitesse du poisson. La définition du calcul des vitesses est décrite à la sous-section *Définitions des résultats présentés* du chapitre 4. Pour rappel, nous parlons ici de vitesses absolues, c'est-à-dire par rapport au référentiel fixe extérieur. Cela signifie par exemple qu'un poisson ayant une vitesse absolue nulle est tout de même en mouvement pour contrer la vitesse de l'écoulement.

La figure 6.3 a été générée par analogie à la représentation graphique des zones préférentielles (figure 6.1) en utilisant le même ensemble d'images et le même maillage. Par contre, les valeurs sont calculées différemment : en prenant une moyenne des vitesses pour chaque maille de l'image. Tout comme pour le graphe de densité de présence, les valeurs des vitesses sont exprimées en échelle logarithmique pour une question de visualisation des tendances.

La première chose qui saute aux yeux en regardant le graphe des vitesses est la zone colorée principalement en rouge devant l'échancrure aval. Pour rappel, nous avons fait l'hypothèse que les détections se trouvant dans cette zone étaient des erreurs. Les vitesses très élevées sans signe de trajectoires confirment l'hypothèse énoncée précédemment. Il s'agit bien de détections répétées de bulles et non de poissons. Nous ne tiendrons donc plus compte de cette zone par la suite.

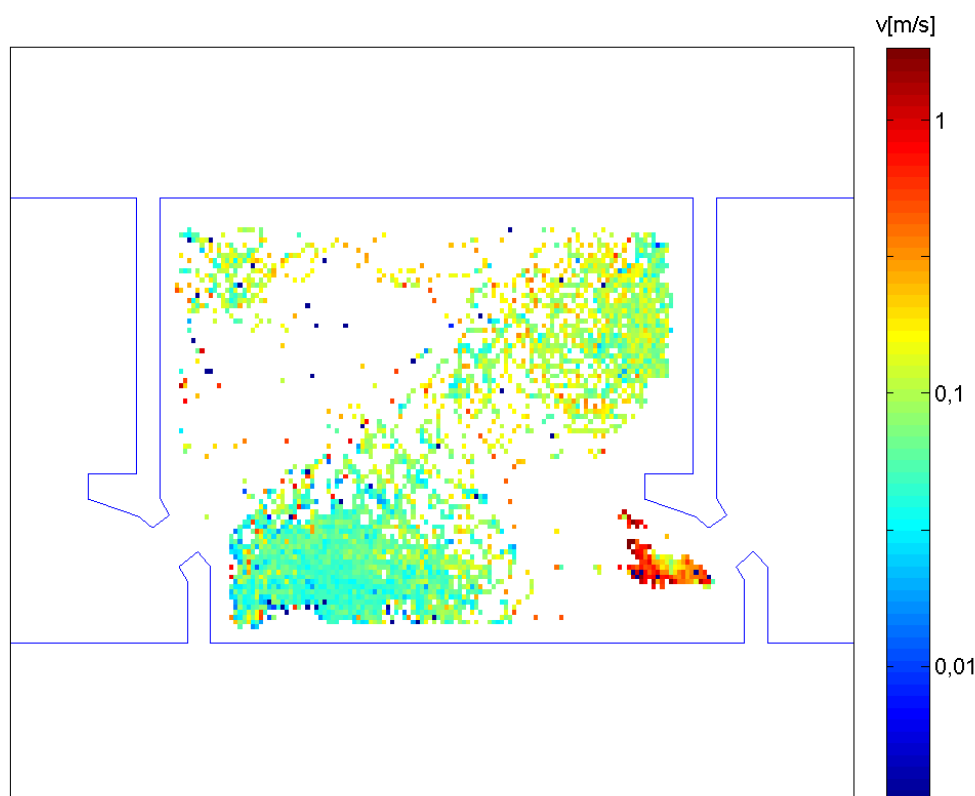


FIGURE 6.3 – Représentation graphique des vitesses scalaires absolues moyennes des alettes

Plus généralement, des vitesses plus faibles sont remarquées dans les zones dites “de repos”, alors que le long des trajectoires traversant le bassin, les vitesses sont généralement plus élevées. Cela se traduit donc par un maintien plutôt statique du poisson dans ces zones, et un déplacement du poisson hors des zones calmes.

6.2.3 Trajectoires empruntées

Les informations récoltées grâce au traitement d'image permettent aussi de tracer la trajectoire et une représentation graphique du poisson. Cependant, les données dont nous disposons ne sont pas de qualité suffisante pour pouvoir faire une étude systématique de toutes les trajectoires. C'est néanmoins une première étape vers ce but qui fournira des résultats plus rigoureux et permettra dans le futur d'étudier les tendances de comportement de chacune des espèces. Nous nous limiterons dans cette section à l'analyse de certains exemples de trajectoires afin de présenter le principe de ce genre d'étude.

Pour rappel, les images sont prises à une fréquence de 15 images par seconde. Les trajectoires sont donc définies par la représentation du poisson à cette intervalle de temps. Grâce à la modélisation du poisson (détaillée dans le chapitre *Matériels et méthodes*) il est possible de

visualiser l'orientation que le poisson prend face aux lignes de courant.

La figure 6.4 a été créée à partir de trois échantillons non-consécutifs d'images extraits de la deuxième expérience, représentant chacun le mouvement d'un seul et même poisson à des instants différents. Un cercle orange autour d'un poisson représente le début d'une trajectoire. Ces extraits de trajectoires sont mis en relation avec le jet principal et les zones de recirculation de l'écoulement régnant au sein du bassin (image en arrière plan, correspondant à la figure 3.7). La figure 6.5 représente quant à elle le résultat obtenu en superposant les images après traitement avec ImageJ.

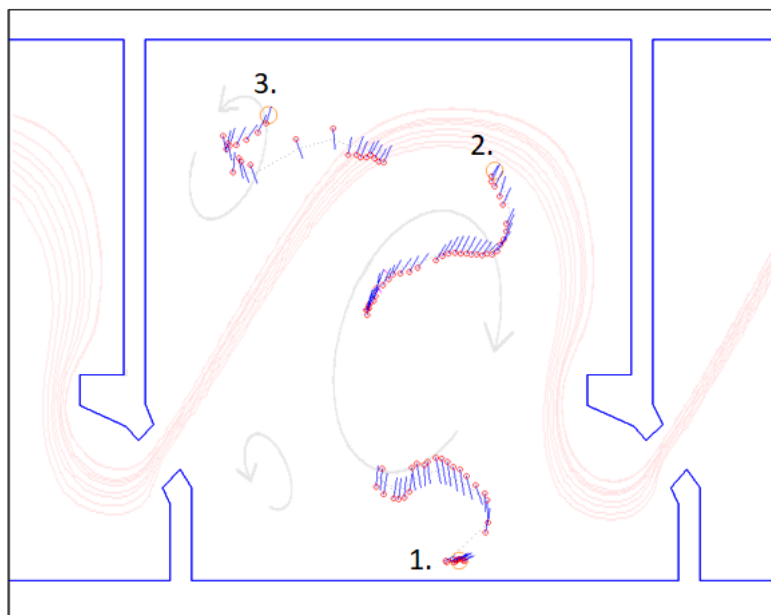


FIGURE 6.4 – Modélisation des ailettes dans différentes positions le long de 3 trajectoires différentes

La représentation graphique de ailettes ne correspond pas parfaitement à la réalité. Cela se remarque notamment lorsque l'orientation de la tête du poisson change subitement de sens. Ces limitations de la modélisation sont dues à la petite taille des poissons et à la mauvaise qualité des images qui fournissent des données présentant une résolution trop faible. Le battement de queue du poisson est quant à lui quasi imperceptible. Cette comparaison entre la modélisation graphique et le résultat du traitement d'image ne sera faite qu'une seule fois. Nous savons néanmoins que les images récoltés pour les chevaines sont de meilleure qualité et fourniront des résultats encore plus proche de la réalité, sans toutefois exclure des erreurs.

Malgré le fait que l'étude soit faite sur un échantillon unique, nous pouvons nous risquer à tirer quelques conclusions qui n'ont toutefois pas de grande valeur d'un point de vue statistique. Plusieurs attitudes sont notables. L'ablette a parfois tendance à se laisser emporter par le cou-

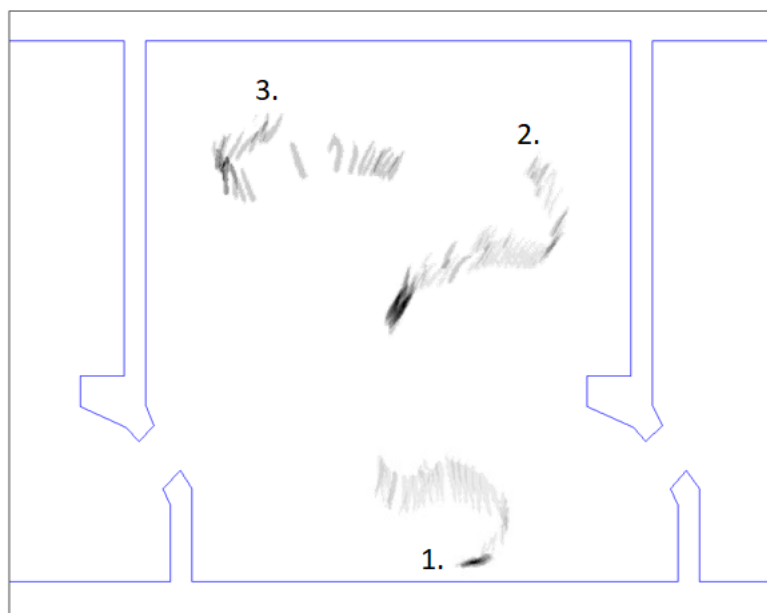


FIGURE 6.5 – *Superposition d'images des alettes dans différentes positions le long de 3 trajectoires différentes*

rant dans les zones de recirculation. Par exemple, vers la fin de la trajectoire 1 : l'ablette suit doucement la direction de l'écoulement. Elle est aussi capable de nager à contre-courant dans ces zones de recirculation (voir trajectoire 2) ou de traverser les lignes de courant principales, mais elle le fait généralement dans les zones de plus faibles vitesses. Par exemple, au niveau de la trajectoire 3, le poisson retourne vers la droite (en direction de l'aval) afin de trouver des vitesses d'eau plus faibles avant de se lancer dans le jet principal, où il arrive à se maintenir pendant moins d'une seconde.

6.2.4 Profondeur de nage au droit de l'échancrure

Les poissons ont aussi été filmés par une caméra ayant un champ de vision horizontal (vue de côté d'un bassin 6 et de son échancrure aval) afin de pouvoir faire une analyse en trois dimensions. A la base, cette caméra a été placée en vue de remplir deux objectifs : définir à quelle hauteur dans la colonne d'eau le poisson préfère nager et analyser sa trajectoire verticale lors de son passage dans l'échancrure.

Les graphes de la figure 6.6 montrent la densité de présence calculée de la même façon que la densité de présence en vue en plan. Les lots utilisés sont également les mêmes, c'est-à-dire des extraits des deux derniers tests avec alettes. Le cadre rouge représente la ROI : sur l'image de gauche elle reprend tout le bassin 6 et sur l'image de droite elle se concentre sur l'échancrure.

L'interprétation des résultats est en fait assez difficile. A nouveau, plusieurs sources d'erreur

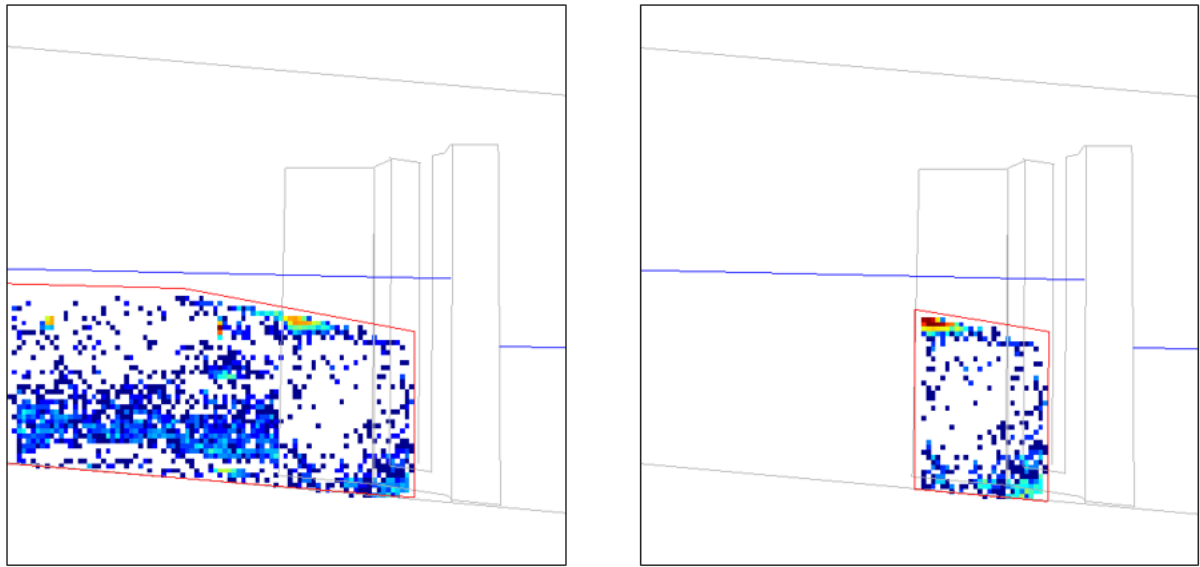


FIGURE 6.6 – *Densité de présence des ablettes, vue de côté. A gauche : détections dans l'entièreté du bassin ; à droite : isolement des détections proches de l'échancrure*

sont notables. Tout d'abord, il y a une différence flagrante entre les détections faites vers le milieu du bassin et celles proches de l'échancrure. Tout laisse à croire que ces détections au sein du bassin sont dues à du passage derrière l'échelle à poisson (dont les parois latérales sont transparentes). Ou alors cela signifie que le contraste entre le poisson et les parois de l'échancrure (de couleur gris foncé) n'est pas suffisant pour une détection. Dans tous les cas, il est difficile de tirer des conclusions sur les trajectoires réellement empruntées par les ablettes. Sur la figure de droite, reprenant uniquement les détections proches de l'échancrure, une zone de forte présence est visible (en rouge dans le coin supérieur gauche). Lors de nos observations pendant les expériences, nous n'avons jamais remarqué de poisson à cet endroit du bassin. Il s'agit donc de détections parasites à la surface de l'écoulement. En effet, le courant est très mouvementé proche de la chute d'eau entre les deux bassins. Il semble donc judicieux de ne pas tenir compte des détections proches de la surface de l'eau. Nous pouvons donc affirmer, avec un certain taux d'incertitude, que les ablettes restent généralement au fond du bassin lorsqu'elles sont proches de l'échancrure (avant ou après avoir passé cette dernière).

Afin de mieux comprendre le comportement de ces poissons, trois trajectoires d'ablettes venant tout juste de passer l'échancrure ont été choisies et sont présentées à la figure 6.7. Vu la faible qualité des détections dû au mauvais contraste, il n'était pas possible d'utiliser la modélisation graphique des poissons. Les trajectoires sont donc présentées comme de simple lignes, chaque couleur correspondant à une trajectoire.

Ces trois trajectoires semblent un peu "brouillon". Les poissons ont l'air d'avoir du mal à se

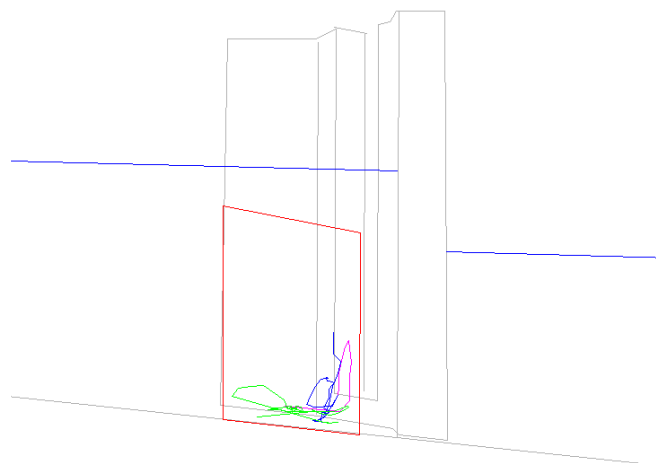


FIGURE 6.7 – Illustration de trois trajectoires juste après le franchissement de l'échancrure, à trois moments distincts

stabiliser après avoir franchi l'échancrure. L'ablette représentée en vert semble faire des aller-retour dans le fond du bassin. Peut-être tente-t-elle de s'éloigner de l'échancrure, mais elle se fait quand même légèrement emporter. Les deux autres trajectoires montrent plutôt une instabilité verticale. Elles paraissent avoir des difficultés à se stabiliser à une hauteur d'eau qui leur convient. Il est une fois de plus peu judicieux de parler de tendances avec si peu de résultats. L'impression générale reste tout de même que l'ablette n'est pas complètement à l'aise dans ce type d'écoulement, mais qu'elle arrive tout de même à atteindre ses objectifs de franchissement au final.

6.3 Les chevaines (*Squalius cephalus*)

Les chevaines, par leur plus grande taille et grâce à un protocole plus abouti, ont fourni des lots d'images mieux exploitables pour le traitement automatisé des images. Cette section sera donc la plus détaillée de ce chapitre. Comme évoqué dans le chapitre *Matériels et méthodes*, nous avons travaillé avec 6 lots de chevaines issus d'un même cycle de reproduction. Par analogie avec l'étude des ablettes, nous avons principalement analysé le comportement des poissons dans le bassin 6, en amont de la passe, car ce bassin présentait les meilleures conditions pour le traitement des images.

6.3.1 Zones de présence préférentielle

La figure 6.8 reprend, pour chaque lot de chevaines, le graphique de densité de présence correspondant. Comme pour les ablettes, les graphiques sont obtenus en sommant le nombre de présences sur chaque élément de maillage, puis en divisant par le nombre d'images par secondes afin d'exprimer les données en temps cumulé. Une zone dans les tons bleu foncé signifie un faible

taux de présence, tandis que une zone dans les tons rouge foncé signifie une présence répétée des poissons à cet endroit du bassin. Chaque lot a été filmé pendant une durée minimum de 5h30 (de 10h du matin jusqu'à l'extinction des lumières).

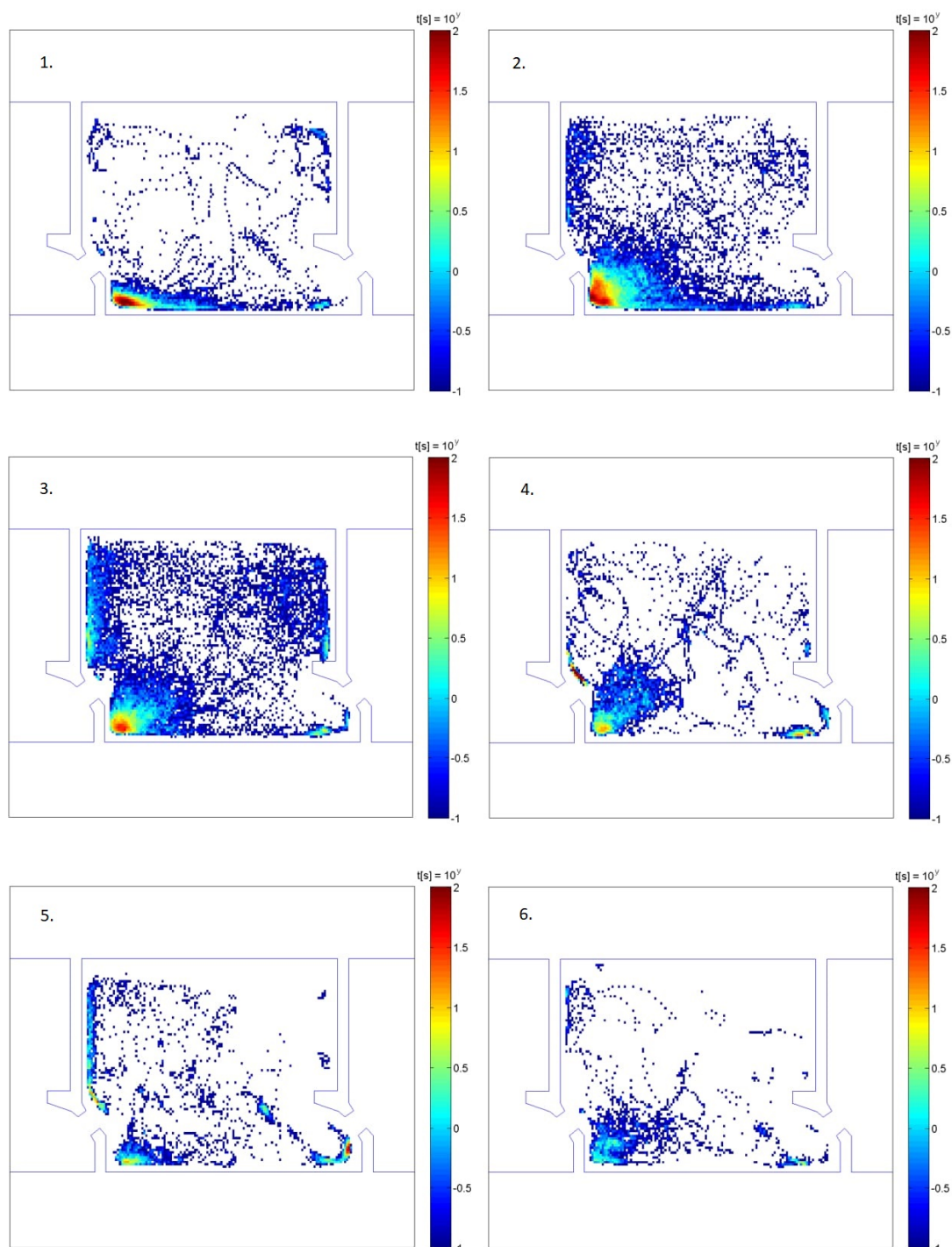


FIGURE 6.8 – Représentations graphiques des zones de présence préférentielle des six lots de chevaines dans le bassin 6

Les six graphes présentent une similitude flagrante : la zone de présence la plus importante est à chaque fois située le long de la paroi juste à l’aval de l’échancrure amont (en bas à gauche sur les images). Une autre observation possible est que le poisson traverse régulièrement le bassin et semble chercher d’autres zones avec des courants plus faibles, souvent le long des parois. Les tendances se démarquent évidemment mieux lorsqu’il y a eu un nombre élevé de poissons qui sont restés pendant une période prolongée dans le bassin. Certains graphes présentent un haut taux de présence juste devant les échancrures amont et/ou aval. Cela correspond probablement à des détections erronées, car l’écoulement y est plus mouvementé et lorsque les plaques de plexi-glas censées lisser la surface de l’eau ne sont pas parfaitement réglées, c’est là que les détections parasites apparaissent.

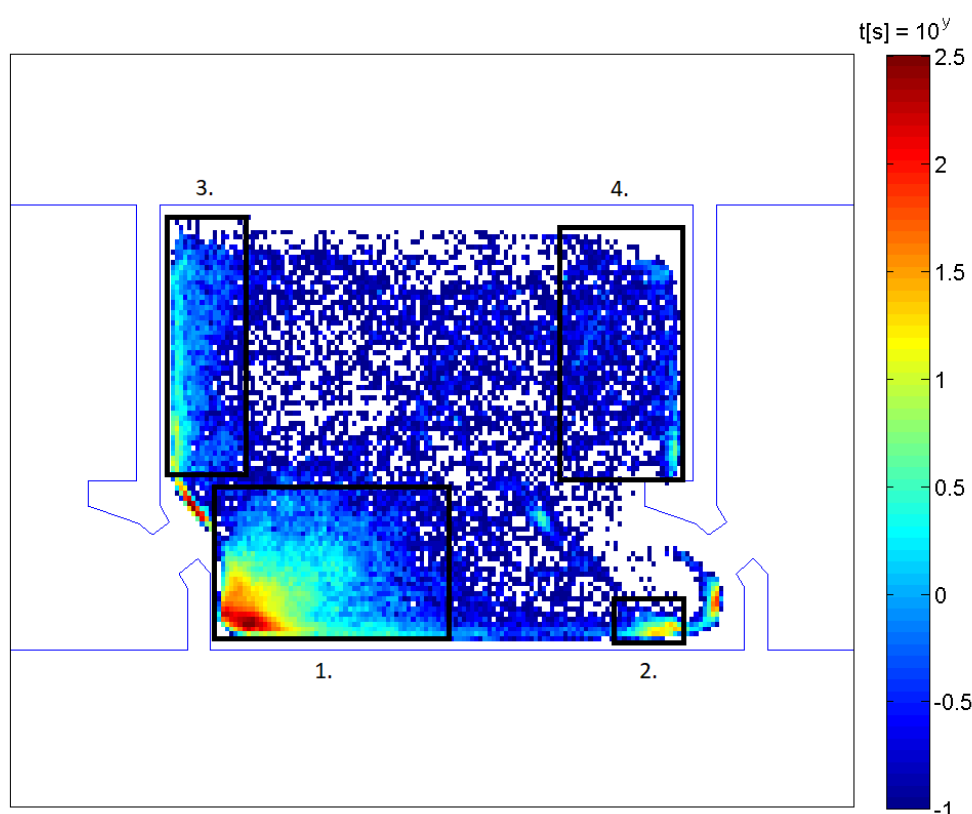


FIGURE 6.9 – Représentation graphique des zones de présence préférentielle des chevaines dans le bassin 6, somme des six lots

En sommant les différents lots (figure 6.9), quatre zones préférentielles ressortent plus ou moins clairement. Chacune de ces zones identifiées va maintenant être analysée. Il est à noter que les endroits présentant un haut taux de présence très proche des échancrures ont volontairement été écartés de l’analyse pour les raisons mentionnées précédemment.

La première zone est clairement définie. C’est la plus grande et avec le plus haut taux de

présence. Elle se situe à l'aval de l'échancrure menant à la sortie de la passe, le long de la paroi opposée à la direction du jet principal. En faisant le lien avec les vitesses de l'écoulement, qui sont pour rappel présentées à la figure 6.2, nous remarquons que cette zone correspond à la plus grande partie du bassin présentant des vitesses faibles. Ces vitesses sont de l'ordre de 0,3 m/s dans le prototype, et donc, après conversion grâce à la loi d'échelle, de l'ordre de 0,13 m/s dans le modèle (voir tableau 3.5). C'est en réalité la plus grande zone de recirculation du courant, d'où le fait que les vitesses de l'eau soient diminuées. Le chevaine est un poisson ayant une vitesse de croisière maximale atteignant les 0,52 m/s (voir tableau 4.4) lorsqu'il a la longueur de nos individus. Nous pouvons donc clairement affirmer que le poisson a l'occasion de rétablir son potentiel musculaire en se maintenant dans cette zone.

La zone 2 se situe proche de l'échancrure aval (sur la droite de l'image). C'est une toute petite zone avec une assez forte concentration de présences. Sa proximité avec l'échancrure et donc un écoulement avec une turbulence prononcée peut mettre en doute la véracité de ces détections. Il faudra donc analyser le graphe des vitesses afin de confirmer ou de contredire cette hypothèse de fausses détections. Notons tout de même que lors des expériences nous avons remarqué que certains poissons restaient parfois à cet endroit du bassin.

Une troisième zone est définie le long de la paroi côté amont. Il s'agit à nouveau d'une zone de recirculation avec des vitesses plus faibles. Par contre, en analysant de plus près la modélisation des vitesses scalaires de l'écoulement (figure 6.2), nous remarquons que le poisson rencontrerait des vitesses encore plus faibles s'il se décollait un peu de la paroi. Une question intéressante peut être posée : pourquoi le chevaine se colle-t-il autant aux parois ?

Finalement, une quatrième zone est identifiée dans le coin opposé à la zone principale. Elle présente une densité de détection beaucoup moins élevée que les autres zones. En revenant aux graphes représentant les lots séparément, nous remarquons même que, pour certains lots, cette zone est complètement inexistante. Cela peut éventuellement s'expliquer par le fait que le jet principal, ayant tout de même des vitesses fortement diminuées, passe près de cette zone.

Jusqu'à maintenant, seules les images de la caméra numéro 1 filmant le bassin 6 ont été analysées. Il est intéressant de comparer les résultats obtenus pour ce bassin avec le bassin voisin qui a exactement les mêmes dimensions. Cela permettra d'étendre les conclusions à tous les bassins de dimension classique présentant le même écoulement.

Le bassin 5 a été filmé par la caméra numéro 2. Les images récoltées sont de moins bonne qualité car la plaque de plexiglas servant à lisser la surface de l'eau était moins facilement réglable. Ce défaut de prise de données a d'ailleurs eu pour effet que les deux derniers lots, présentant des anomalies flagrantes, ont dû être écartés pour réaliser le graphe des sommes de détections (figure 6.10). Les densités de présence des six lots sont reprises séparément dans l'annexe D.2.

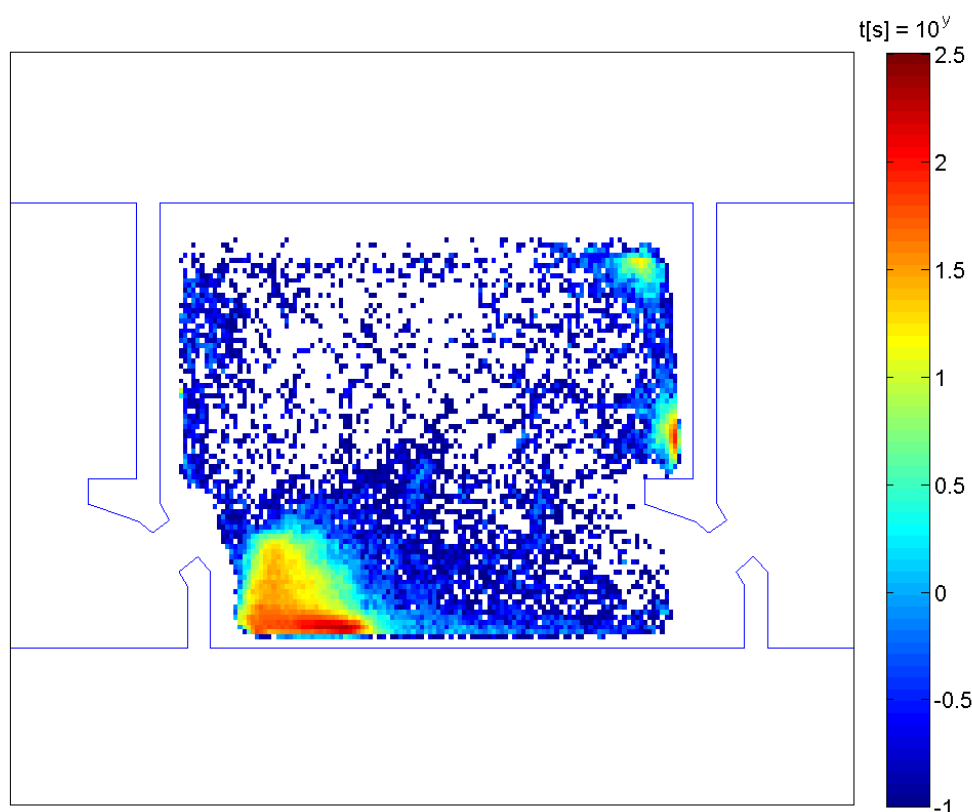


FIGURE 6.10 – Représentation graphique des zones de présence préférentielle des chevaines dans le bassin 5, somme des six lots

La zone principale est située au même endroit que dans le bassin voisin amont. Il est à noter que le temps cumulé de présences dans cette zone est plus élevé (partie rouge-orangée plus large) que dans le bassin amont, or, rappelons-le, ce graphe ne tient compte que de quatre lots au lieu de six. Cela s'explique par un nombre plus élevé de chevaines qui atteignent ce bassin que le suivant. Une deuxième zone ressort dans le coin opposé du bassin par rapport à la zone principale. Cette deuxième aire est beaucoup plus marquée pour ce bassin, que pour le bassin amont. Toutefois, comme dit précédemment, les résultats ne sont pas totalement fiables. Il faudra donc aussi analyser les vitesses des poissons pour pouvoir faire une distinction entre la détection de poisson et la détection de bulles. Les zones 2 et 3 définies pour le bassin 6 sont quant à elles présentes, mais beaucoup moins marquées dans ce bassin-ci.

6.3.2 Vitesses

Repassons à l'analyse du bassin 6 en amont. La figure 6.11 représente les vitesses scalaires des poissons pour chaque lot.

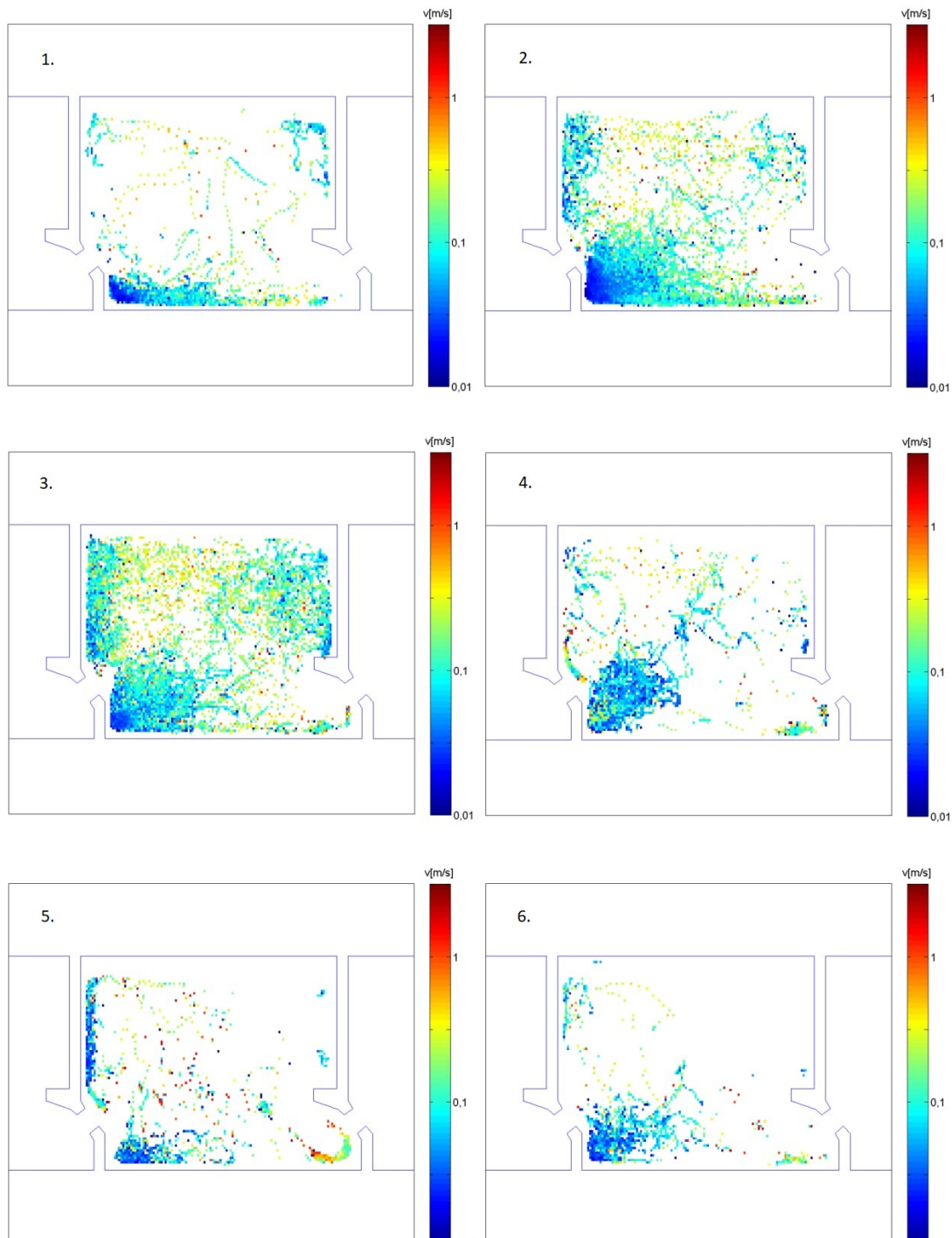


FIGURE 6.11 – Représentation graphique des vitesses scalaires absolues moyennes des chevaines pour les 6 lots dans le bassin 6

Les tendances concernant les vitesses sont les mêmes que celles constatées avec les ablettes. Généralement, lorsque le poisson est dans une zone de repos, il conserve sa position pendant un certain temps. Sa vitesse absolue, c'est à dire en référence à l'extérieur, sera donc faible, voire nulle. Par contre, lorsque le poisson traverse le bassin, il peut atteindre des vitesses plus élevées.

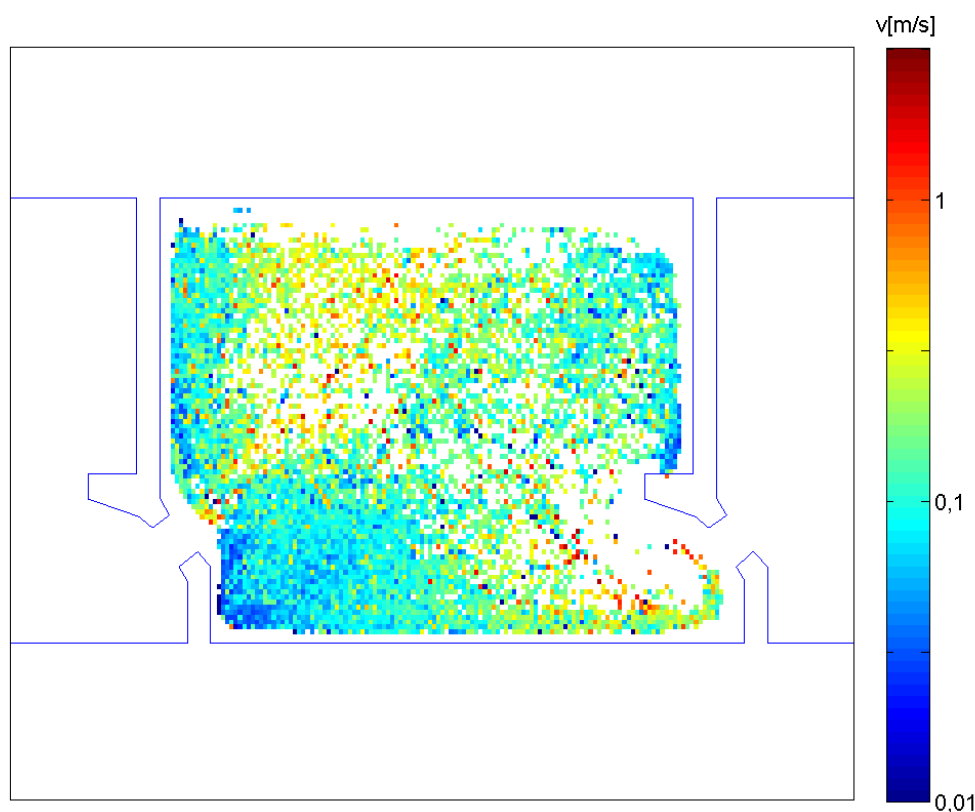


FIGURE 6.12 – Moyennes des vitesses des six lots de chevaines dans le bassin 6

Un résumé des vitesses pour les six lots est obtenu en superposant les vitesses et en prenant les moyennes pour chaque élément de maillage (voir figure 6.12). Il est alors facile de voir une corrélation entre les vitesses des poissons et de l'écoulement régnant dans la passe (voir figure 6.2). Les poissons se déplacent de façon rapide là où le courant est important, dans le jet principal. Effectivement, les zones avec des tons plutôt jaunes-orangées sur le graphe 6.12 (vitesses absolues comprises autour de 1 m/s) correspondent approximativement à la localisation du jet principal de l'écoulement. Cela signifie soit qu'ils fournissent un effort plus prononcé afin de traverser ou contrer les lignes de courant, soit qu'ils se font emporter. D'un autre côté, les zones ayant des tons bleus-turquoises (vitesses absolues comprises entre 0 et 0,1 m/s), correspondent aux endroits du bassin où les vitesses sont les plus faibles. Les poissons restent dans ces zones sans trop bouger. Rappelons toutefois que nous parlons en terme de vitesse absolue, c'est-à-dire qu'une valeur nulle signifie en réalité que le poisson nage à une vitesse équivalente à celle de l'écoulement, dans le sens opposé.

Précédemment nous avons remis en doute l'exactitude de la zone de repos numéro 2. L'hypothèse que les détections correspondent à des bulles et non pas à des poissons va maintenant être analysée grâce au graphe des vitesses. Pour rappel, la zone 2 se situe en amont de l'échancrure

aval, contre la paroi (en bas à droite sur l'image). Les vitesses à cet endroit du bassin sont comprises entre 0,1 et 1 m/s, ce qui met en doute le fait qu'un ou plusieurs poissons y soi(en)t resté(s) de façon prolongée. L'hypothèse de détections erronées est donc confirmée.

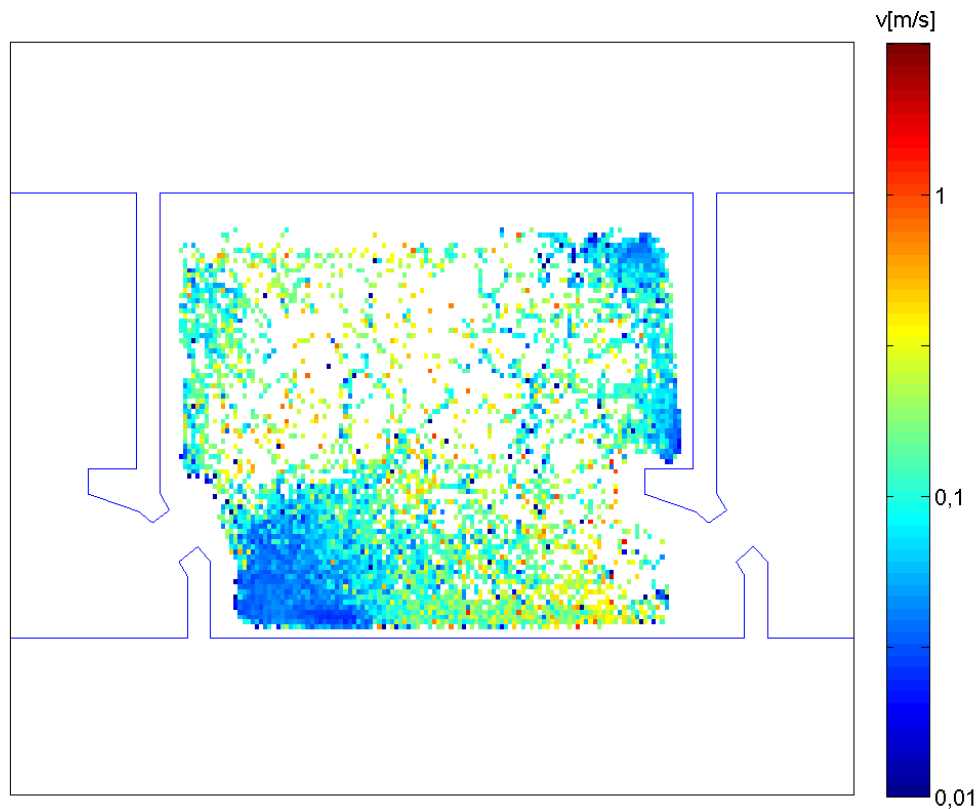


FIGURE 6.13 – Moyennes des vitesses des quatre premiers lots de chevaines dans le bassin 5

Finalement, nous terminerons l'analyse de vitesses avec celles du bassin 5 (le détail des six lots se trouve en annexe D.2). La même constatation de corrélation entre écoulement et vitesse du poisson peut être faite pour ce bassin que pour son voisin amont. Néanmoins, il est remarquable que les zones de repos numéro 1 (en bas à gauche) et 4 (en haut à droite) sont beaucoup plus étendues.

6.3.3 Trajectoires empruntées

Comme déjà annoncé dans la section concernant les ailettes, une étude rigoureuse et statistiquement valable n'est pas envisageable, dû à la qualité médiocre de nos images. Ce qui fait que la sélection des trajectoires doit se faire manuellement. Cependant la modélisation graphique sur les échantillons sélectionnés donne de meilleurs résultats que pour les ailettes, car les poissons sont plus grands et donc mieux distinguables. Des erreurs, comme par exemple l'emplacement de la tête du poisson, ne sont toutefois pas à exclure.

Nous avons fait le choix de présenter certains types de trajectoires qui nous semblaient être caractéristiques des chevaines, car elles ont été observées plusieurs fois. Les modélisations présentées dans la suite de cette section sont toutes tirées du premier lot de chevaines.

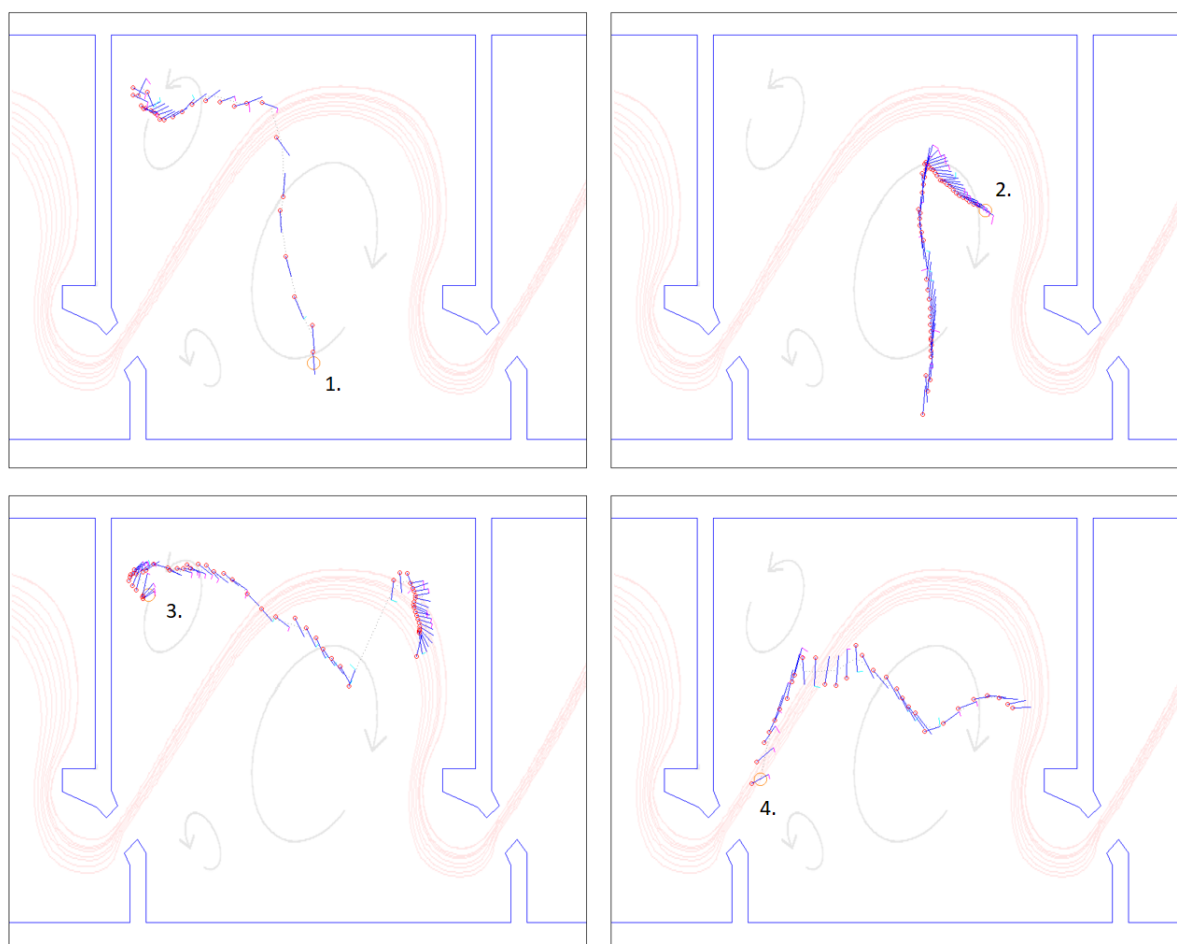


FIGURE 6.14 – Trajectoires de chevaines traversant le bassin

Le premier type de trajectoire (figure 6.14) est le déplacement d’une zone de repos à une autre. Plusieurs tendances sont notables. Premièrement, le chevaine est capable de traverser le jet principal. Il le fait de façon assez rapide. En effet, comme on peut le voir sur les trajectoires 1 et 3, les détections sont plus espacées au moment de la traversée du jet. Pour rappel, la fréquence de prise d’image est de 15 fps et donc il s’écoule 1/15 de seconde entre chaque détection. Le poisson entame cette traversée à l’endroit où les lignes de courant principales commencent à s’écarter, c’est-à-dire là où la vitesse du jet diminue. Deuxièmement, les chevaines sont capables de nager dans les deux directions dans les zones de recirculation. Les poissons évoluant le long des trajectoires 1 et 2 avancent plus ou moins sur une même ligne, mais dans des sens opposés. Finalement, la trajectoire 4 illustre un poisson qui se laisse légèrement emporter par le jet. Le

chevaine donne toutefois l'impression de contrôler son mouvement, vu que les détections sont assez proches l'une de l'autre.

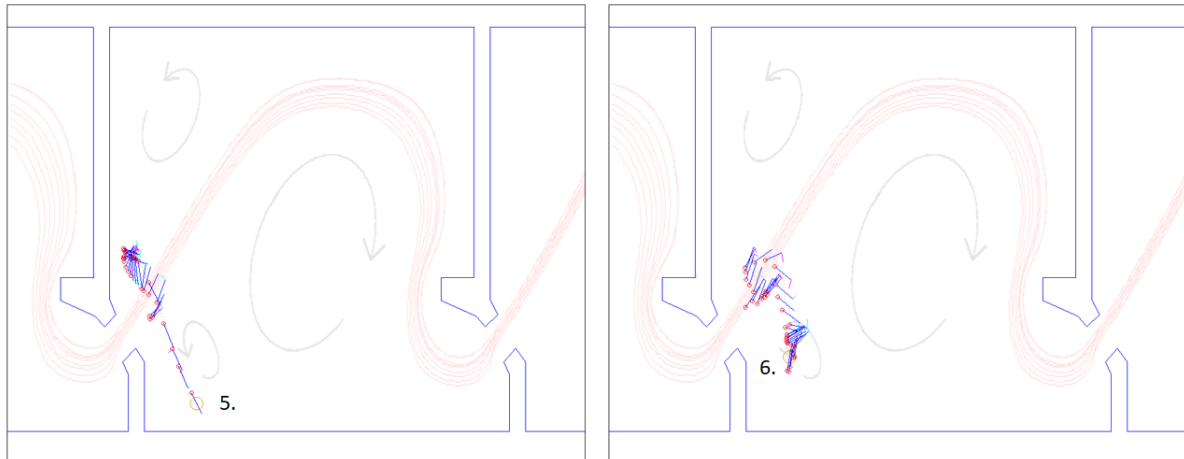


FIGURE 6.15 – Trajectoires de chevaines entamant le franchissement de l'échancrure

Le deuxième type de trajectoire (figure 6.15) correspond au moment qui précède le franchissement de l'échancrure. Le poisson a tendance à ne pas se lancer d'un coup, mais traverse d'abord (parfois plusieurs fois) le courant principal avant d'entamer son effort final pour passer l'échancrure.

6.3.4 Profondeur de nage au droit de l'échancrure

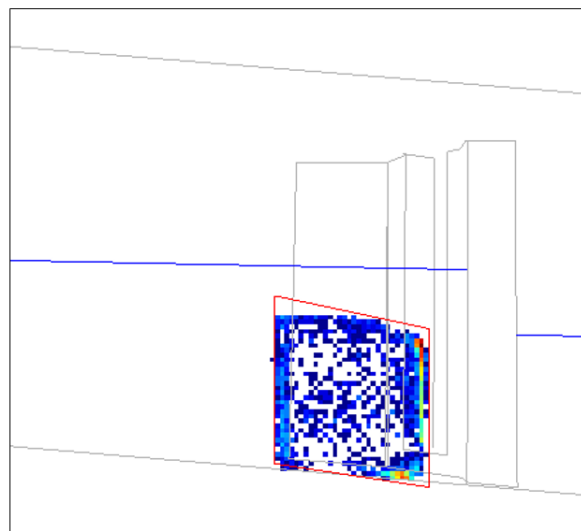


FIGURE 6.16 – Densité de présence des chevaines au droit de l'échancrure

Par analogie avec ce qui a été fait pour les ablettes, la figure 6.16 représente la densité de

présence des chevaines au droit de l'échancrure se trouvant entre les bassins 5 et 6. Les bords de gauche, de droite et supérieur de la ROI présente une densité plus élevée. Vu la non-continuité avec le reste des données, il s'agit probablement pour la plupart d'erreurs. Le coin en bas à droite semble être une zone de forte présence. Pour conclure, remarquons qu'aucune trajectoire bien définie du passage des chevaines dans l'échancrure ne se démarque sur ce graphe. Nous pouvons supposer que les poissons ne passent pas d'une seule traite pour aller jusqu'à leur destination finale, mais ont une trajectoire un peu "brouillon", comme c'était le cas avec les ablettes.

6.4 Les chabots (*Cottus gobio*)

La dernière espèce de poisson que nous allons étudier dans ce chapitre est le chabot. Par son habitat naturel, qui diffère beaucoup des conditions rencontrées dans le modèle réduit, et par sa petite taille et ses mauvaises capacités de nage, nous verrons que le comportement du chabot au sein de la passe est fort différent des autres espèces.

6.4.1 Zones de présence préférentielle

Vu qu'aucune remontée n'a été observée lors des tests "classiques" effectués avec les chabots, nous avons décidé de réaliser des tests visant uniquement à étudier leur comportement au sein d'un bassin. Pour ce faire nous avons, pour rappel, injecté manuellement les poissons dans le dernier bassin amont et nous avons filmé leurs mouvements. Comme attendu, les chabots ne manifestaient pas l'envie de se déplacer et restaient collés les uns aux autres le long des parois au fond du bassin ou derrière les antennes RFID. Cette attitude rend le traitement d'images automatisé très complexe, car les poissons sont difficilement distinguables. Nous avons donc opté pour un traitement manuel des données. Le processus consiste à tracer le centre de chaque poisson sur une sélection d'une image par minute.

Les six lots ont été utilisés et ont fourni des résultats similaires qui sont résumés et présentés à la figure 6.17. Les graphes représentant chaque lot de chabots individuellement se trouvent en annexe D.3.

Une constatation peut être faite en regardant le graphe de la figure 6.17, mais surtout en observant les poissons en temps réel : la préoccupation première des chabots semble être de trouver un endroit plus tranquille dans le bassin et d'y rester en attendant de meilleurs jours. Ils se collent donc au fond du bassin, le long des parois verticales (zones 3, 4 et 5), les uns aux autres (zone 1) ou derrière les antennes RFID (zone 2), afin d'être un maximum protégé du courant. De temps en temps, les poissons se font tout de même emporter et tentent de trouver un autre endroit où se mettre à l'abri des vitesses élevées de l'écoulement. Ce phénomène s'observe d'avantage chez les jeunes chabots, dont la résistance à l'écoulement est plus faible.

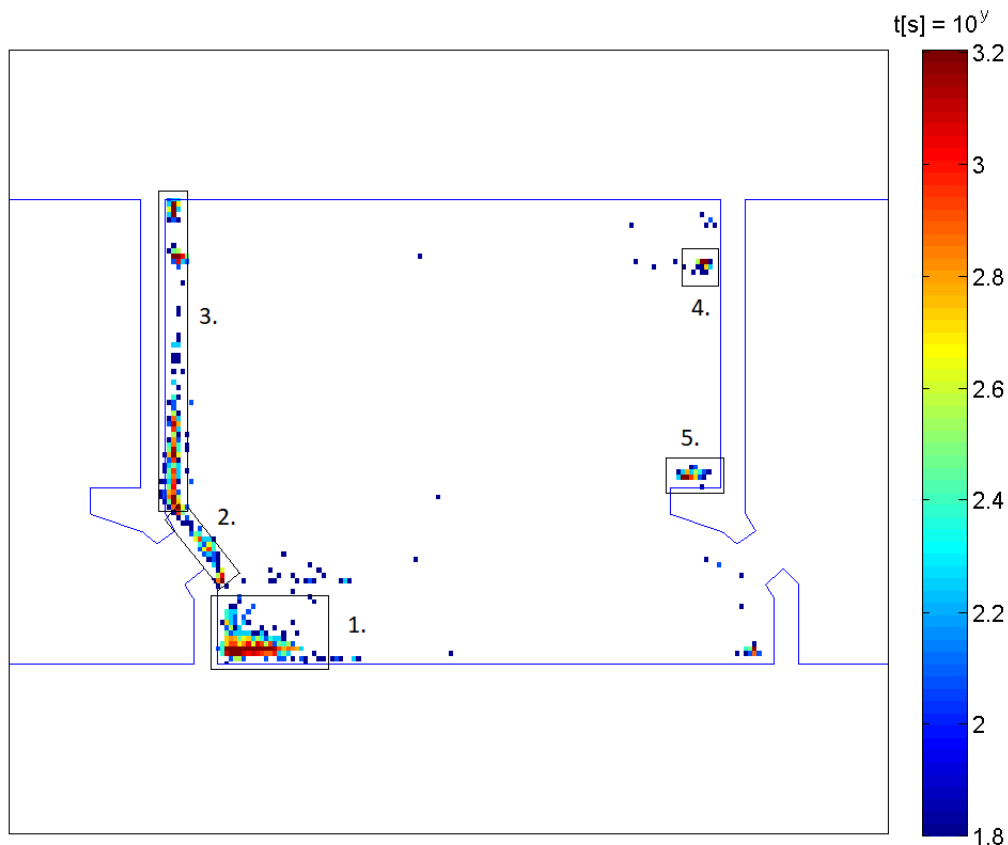


FIGURE 6.17 – Représentation graphique des zones de présence préférentielle des chabots

Il n'est pas étonnant que les zones qui ressortent sur le graphique de densité de présence soient toutes localisées le long des parois. Dans le cas des chabots, nous ne pouvons clairement pas parler de "zones de repos". Effectivement, les poissons se logent dans les zones du bassin qui les incommode le moins possible et puis ils tentent d'y rester sans bouger. Et ce, contrairement aux autres espèces de poissons qui se reposent dans les zones de courants faibles avant de tenter le franchissement des échancrures. Une observation qui confirme notre analyse est la différence de comportement entre les trois classes de taille. C'est une tendance qui est difficile à détecter graphiquement, mais visuellement nous avons remarqué que les gros chabots, qui se font moins vite emporter et qui sont moins incommodés par les courants, restent plus longtemps immobiles que les petits individus. Cette constatation confirme que si le poisson a le choix, il préfère rester immobile dans la passe. Cela s'explique par le comportement du chabot dans son milieu naturel. C'est un poisson benthique qui préfère rester caché sous les rochers ou contre un sol rugueux pour se protéger des courants rapides, et qui tente l'exploration de son environnement uniquement lorsqu'il n'est pas en condition de stress.

6.4.2 Vitesses

Pour rappel, les détections des poissons dans le bassin ont été faites manuellement avec un intervalle d'une minute entre chaque image analysée. La précision des données est donc trop faible que pour pouvoir obtenir un graphique représentatif des vitesses de déplacement des poissons. Comme déjà mentionné précédemment, nos observations ont cependant mené à une conclusion concernant les vitesses : le chabot reste principalement immobile, comme collé au fond ou aux parois, sauf lorsqu'il se fait emporter par le courant ou qu'il cherche simplement à rejoindre un endroit plus tranquille au sein de la passe.

6.4.3 Trajectoires empruntées

Dans cette section, trois trajectoires de chabots issus de la classe de petites tailles vont être présentées. Ce sont en effet les seuls chabots à avoir changé de position lors des expériences visant à étudier le comportement de cette espèce dans les bassins.

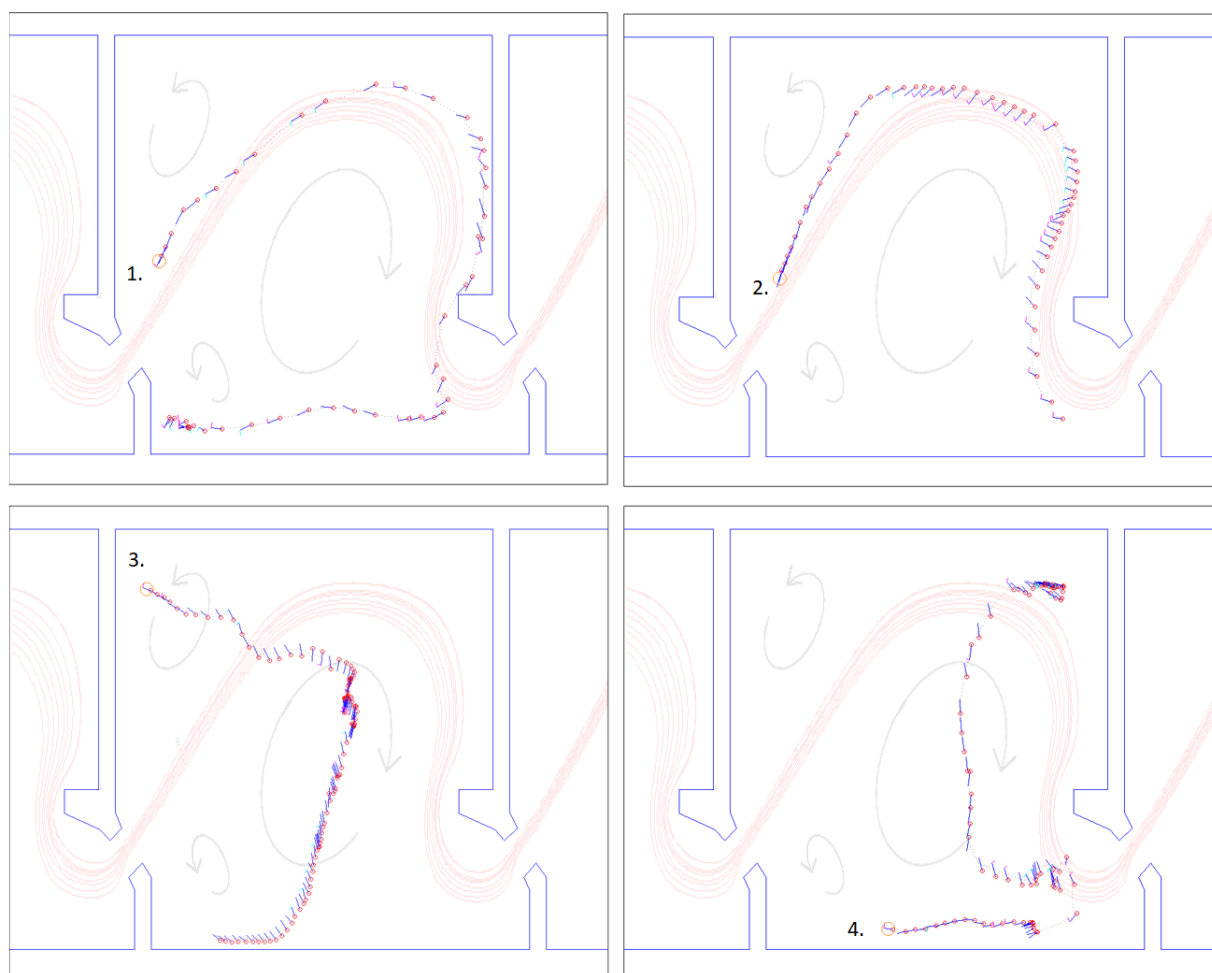


FIGURE 6.18 – Modélisation de petits chabots le long de quatre trajectoires différentes

La première et la seconde trajectoire montrent clairement que ces deux petits chabots se font emporter par l'écoulement. En effet, les poissons suivent exactement les lignes de courant principales. Le premier poisson arrive à la fin à contrôler son déplacement et atteint une zone de vitesses d'eau plus faibles, tandis que le deuxième se fait emporter vers le bassin aval suivant. Les trajectoires 3 et 4 montrent que les chabots sont capables, non sans difficultés, de se déplacer vers une autre zone en espérant probablement y trouver un écoulement plus calme. Sur la trajectoire 4, il est remarquable que le poisson a le plus de difficultés lorsqu'il s'approche de l'échancrure côté aval. C'est en effet à cet endroit du bassin que la turbulence de l'écoulement se fait le plus ressentir. En guise de conclusion à cette section, il peut être affirmé que les petits chabots n'ont pas la puissance musculaire nécessaire pour se déplacer facilement dans les bassins de la passe.

6.4.4 Profondeur de nage au droit de l'échancrure

Aucun chabot n'a franchi l'échancrure filmée de l'aval vers l'amont. Seuls des poissons se faisant emporter d'un bassin vers un autre ont pu être observés lors des expériences. Ce qui a pour conséquence qu'aucune trajectoire de franchissement valable n'a été enregistrée.

La question de la capacité des chabots à franchir les échancrures peut dès lors être posée. Une comparaison rapide entre les vitesses de l'écoulement au droit des échancrures et des capacités de nages de cette espèce servira à répondre à cette question. Selon le tableau 3.5, les vitesses maximales de l'écoulement rencontrées dans les échancrures sont comprises entre 0,89 et 1,34 m/s. Or, les chabots peuvent seulement atteindre des vitesses de sprint de 0,71 m/s pour les plus petits chabots et 1,07 m/s pour les plus grands chabots (voir tableau 4.5). Nous en déduisons donc que les petits individus n'ont pas la puissance musculaire nécessaire pour franchir les échancrures. Les plus gros chabots sont quant à eux susceptibles de passer les échancrures. Nous avons d'ailleurs observé des remontées partielles de la passe lors des tests de franchissabilité. Ce qui confirme qu'ils ont les capacités de dominer les vitesses maximales de l'écoulement. Cependant, rappelons que ces chabots de grande taille ne sont pas à l'échelle du modèle réduit et n'auront probablement pas la puissance nécessaire pour remonter l'échelle à taille réelle. C'est d'ailleurs ce que les déductions faites suite à la lecture de l'ouvrage écrit par Baudoin et al. (2014) avaient prédit (voir section *Présentation du modèle réduit* dans le chapitre 3).

6.5 Comparaisons interspécifiques

Les résultats qui viennent d'être présentés pour chaque espèce vont être comparés dans cette section. À la comparaison, nous intégrerons également les résultats des salmonidés obtenus lors de l'étude réalisée par Pype (2015) et présentés dans la section *État de l'art* du chapitre 3. Cela permettra de mettre en avant les différences entre les très bons nageurs (les salmonidés), les assez bons nageurs (les ablettes et les chevaines) et les mauvais nageurs (les chabots).

6.5.1 Zones de présence préférentielle

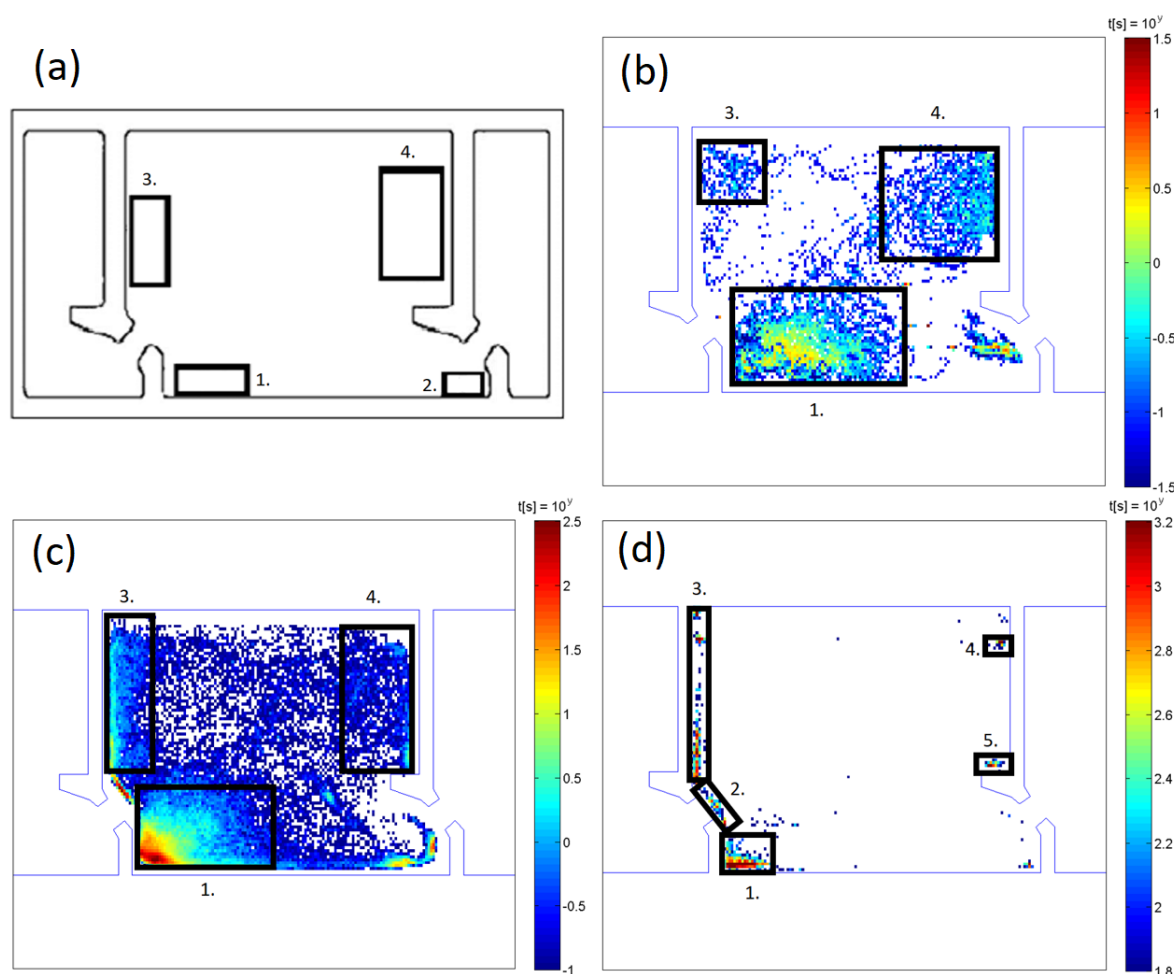


FIGURE 6.19 – Illustration des zones de présences préférentielles pour chacune des espèces étudiées dans le modèle réduit de la passe à bassin de Rivière. De gauche à droite, de haut en bas : (a) salmonidés (Pype, 2015), (b) ablettes communes, (c) chevaines et (d) chabots.

La figure 6.19 met en parallèle les résultats concernant les zones de présence préférentielle de chaque espèce. Notons tout de même que les zones ayant été reconnues comme étant des erreurs ne sont plus considérées à ce stade des discussions. Elles étaient situées en amont de l'échancrure aval, tout comme la zone 2 mise en avant pour les salmonidés. La question se pose de savoir si Pype n'aurait pas également fait une erreur en incluant cette région du bassin dans les résultats. Vu que Wang et al. (2010) obtiennent des résultats similaires lors de l'étude d'un lot de truites dans un autre modèle réduit de passe à bassins, aucune conclusion ne peut être tirée.

Une constatation générale peut être faite à la vue des résultats. Les densités de présences élevées se trouvent toutes hors du jet principal. Il y a toutefois une exception, notamment la zone 2 des chabots qui se trouve juste en aval de l'échancrure de sortie de la passe. Comme décrit plus haut dans le texte, les chabots sont des poissons benthiques, qui souvent, dans leur milieu

naturel, tentent de se cacher sous des rochers. Ici, ils le font sous l'antenne placée à cet échancrure.

A l'exception des zones 2, les autres zones se trouvent plus ou moins aux mêmes endroits du bassin pour chacune des espèces. Elles ont cependant souvent des formes et des tailles différentes en fonction de l'espèce considérée. Par exemple, la zone 1 est de taille similaire pour les chevaines et les ablettes, mais elle est beaucoup plus petite pour les salmonidés. Rappelons toutefois que les résultats pour les salmonidés ne sont pas quantifiés et ont été obtenus à partir d'un lot contenant un nombre restreint de poissons. La zone 1 des chabots est également plus petite, comme d'ailleurs toutes les autres zones de forte densité de présence des chabots. Ils sont quasi exclusivement restés le long des parois.

Une comparaison peut être faite entre les résultats obtenus pour les chevaines dans le modèle réduit de la passe de Rivière et ceux obtenus par Cornu et al. (2012). Pour rappel, cette étude utilise également des lots de chevaines ayant une taille respectant l'échelle géométrique de leur modèle. Les trois zones de stagnations mises en avant sont localisées exactement aux mêmes endroits que se que montre notre étude. Nous en déduisons qu'il est possible de généraliser nos résultats à d'autres passes similaires présentant un écoulement comparable à celui du modèle réduit de Châtelet.

Finalement, remarquons une dernière différence entre le graphe des ablettes et celui des chevaines. Les ablettes utilisent l'entièreté des zones de courant faibles dues à la recirculation de l'écoulement, tandis que les chevaines s'immobilisent principalement le long des parois. Avec les connaissances que nous avons, il est difficile d'expliquer ce phénomène.

6.5.2 Étude de la vitesse et mise en relation avec les caractéristiques de l'écoulement

Pour les lots que nous avons utilisés, les capacités de nage des chevaines sont supérieures à celles des ablettes, qui sont elles-mêmes supérieures à celles des salmonidés. Le tableau 6.1 récapitule les vitesses de croisière maximale. Nous n'avons pas d'informations concernant le lot de salmonidés étudié par Pype.

Dans les zones de repos, les vitesses absolues calculées pour les lots d'ablettes et de chevaines se trouvent en grande partie entre 0 et 0,1 m/s. Dans ces zones coïncidant avec la recirculation de l'écoulement, les vitesses d'eau minimales sont de 0,13 m/s (tableau 3.5). Cela signifie que les poissons nagent à une vitesse relative comprise entre 0,13 et 0,23 m/s, suivant qu'ils vont respectivement dans le sens du courant ou à contre-courant. Ces vitesses sont aussi bien pour les ablettes que pour les chevaines inférieures à leur vitesses de croisière minimale. Cela signifie que ces poissons ont l'occasion de récupérer leur potentiel musculaire. Nous n'avons pas pu obtenir des résultats de vitesses pour les chabots, mais en extrapolant ce raisonnement nous remar-

TABLE 6.1 – Tableau récapitulatif des vitesses de croisière maximale des lots utilisés d’ablettes, de chevaines et de chabots. Inspiré des tableaux 4.2, 4.4 et 4.5.

Espèce	Limite inférieure	Limite supérieure
Ablettes	0,3 m/s	0,47 m/s
Chevaines	0,33 m/s	0,52 m/s
Chabots	0,17 m/s	0,32 m/s

querons que les petits chabots doivent nager à une vitesse proche de leur vitesse de croisière maximale afin de se maintenir dans leur position. S’ils étaient amenés à le faire sur une durée prolongée, ils s’épuiseraient probablement.

Dans le futur, il serait intéressant de calculer les vitesses relatives des poissons par rapport à l’écoulement. Cela permettrait de mieux étudier la relation entre les capacités de nage des poissons et les vitesses auxquelles ils évoluent dans la passe, entre autre dans le courant principal.

6.5.3 Trajectoires empruntées

Pour rappel, une étude systématique des trajectoires n’est pas encore possible. Il faudra pour cela améliorer le processus de prise et de traitement des images. Cependant, plusieurs observations peuvent tout de même être mises en avant. Tout d’abord, les ablettes et les chevaines sont capables de traverser le bassin, et donc le jet principal, afin de migrer d’une zone de repos à une autre. Les petits chabots, quant à eux, n’ont pas beaucoup de liberté de mouvement, car ils sont susceptibles de se faire emporter par l’écoulement à tout moment et peinent alors à sortir des lignes de courant principales.

Pype a mis en avant trois catégories de trajectoires pour les salmonidés (voir figure 3.2). La première suit le jet principal à contre courant et une deuxième trajectoire longe la paroi se trouvant entre les deux échancrures. Lors de ces deux types de trajets, le poisson traverse d’une seule traite le bassin. Les extraits de trajectoires présentées pour les ablettes et les chevaines, ainsi que les observations faites pendant les expériences, indiquent que ces poissons suivent rarement, pour ne pas dire jamais, ces chemins directs. Tout au plus, les poissons vont d’un coup jusqu’à la première zone de repos, puis ils y restent un certains temps. Généralement, les chevaines et les ablettes explorent ensuite le bassin, en passant aussi bien par le centre que le long des parois du bassin, tout en semblant éviter les vitesses de courant élevées. Cela est également en contradiction avec la troisième trajectoire emprunter par les salmonidés. Celle-ci longe effectivement exclusivement les parois du bassin.

Ces différences de comportement entre les différentes espèces s’explique par le fait que leur

capacités de nage ne sont pas égales. Les salmonidés semblent avoir plus de liberté dans le choix de leur trajectoire, grâce à leur puissance natatoire supérieure. Le caractère direct des trajectoires des salmonidés peut aussi avoir sa source dans le fait que ce type d'espèces de poisson est territorial, contrairement aux autres espèces présentées.

6.5.4 Profondeur de nage au droit de l'échancrure

A nouveau, l'étude de la profondeur de nage des salmonidés lors du passage de l'échancrure a mis en avant une trajectoire quasi directe et très précise (voir figure 3.3). Les résultats obtenus pour les chevaines et les ablettes semblent montrer une trajectoire beaucoup plus "brouillon" (voir figure 6.7). Effectivement, aucune trajectoire nette n'a été décelée. Les poissons semblent avoir du mal à choisir une profondeur de nage dans la colonne d'eau et ils oscillent de façon irrégulière aussi bien dans le sens vertical que horizontal.

Il faut cependant garder en tête que ces observations ne sont que des tendances. La qualité du traitement de données n'a pas permis de faire une étude rigoureuse de la profondeur de nage. Cette même remarque peu être faite pour les résultats obtenus par Pype, qui au final ne présentent qu'un seul exemple de trajectoire de salmonidé.

Conclusions et perspectives

co-écrit par Estelle Courtois et Loïc Van Audenhaege

7.1 Conclusions

Cette section répond point par point aux objectifs fixés au début de ce document.

La recherche bibliographique a permis de mettre en avant les différents types de migrations et leurs nécessités. Il en ressort que la migration de reproduction n'est pas l'unique facteur à considérer dans l'objectif de préservation des populations piscicoles. Par exemple, un autre type de migration se produit lors des fortes crues d'été. Après avoir été emporté, le poisson retourne généralement dans son habitat initial.

Dans l'optique de considérer la variabilité interspécifique de la capacité de nage, plusieurs facteurs d'influence ont été mis en évidence, comme la physiologie, la morphologie, la dynamique de nage du poisson et les paramètres externes. Ensuite, afin d'appréhender concrètement les capacités de nage des poissons, plusieurs modèles ont été présentés. Il semblerait que les modèles empiriques permettent une meilleure simulation des capacités de nage et une meilleure prise en compte des caractéristiques interspécifiques par rapport aux modèles analytiques.

Toutes ces informations théoriques ont finalement été appliquées aux espèces utilisées dans cette étude afin de caractériser leur comportement attendu au sein de la passe.

La littérature est aussi une source d'informations concernant les critères de design des dispositifs de franchissement. Nous avons remarqué qu'une évolution est en cours dans ce domaine. Aupa-

ravant, les experts tenaient compte de critères généraux, qui faisaient uniquement la distinction entre les salmonidés et les espèces plus petites. Actuellement, la tendance est de prendre en compte plus de facteurs pour distinguer les nécessités particulières de chaque espèce ciblée.

Après avoir fait cette revue bibliographique, la fiabilité d'une étude introduisant du matériel vivant dans un modèle réduit a été étudiée. La loi d'échelle semble s'appliquer aux capacités de nage des poissons avec le même rapport d'échelle géométrique que celui de l'écoulement. Par conséquent, choisir pour l'expérimentation des poissons qui ont une longueur à échelle 1/5 de leur taille adulte semble pertinent. Cependant, pour des raisons pratiques, il est parfois difficile de respecter ce rapport de longueur. Il faut alors trouver un compromis entre la faisabilité de la collecte des données et le respect de la loi d'échelle. De plus, plusieurs autres biais sont introduits en travaillant dans un modèle en laboratoire. Le stress causé par les manipulations et l'environnement en est un exemple parmi d'autres. Ces biais ne sont cependant pas quantifiables et leur influence exacte sur les expériences est difficile à déceler. Pour ces raisons, les résultats sont uniquement discutés selon leurs tendances.

Afin de pouvoir comparer les différents résultats de notre étude et d'études futures, il est nécessaire d'élaborer un protocole standardisé et reproductible sur différents lots et espèces de poissons. Il s'avère cependant que ce n'est pas toujours évident. Effectivement, les caractéristiques des différents lots rendent souvent nécessaire une adaptation du protocole, comme lorsque les poissons ne sont pas PIT taguables.

Le développement du traitement de données a permis de faire une avancée dans l'exploitabilité des résultats, ainsi que dans la possibilité de quantifier de multiples indicateurs. Toutefois, il reste beaucoup de limitations et d'améliorations possibles. Une première limitation concerne le système RFID et plus particulièrement son application aux chabots. Effectivement, leur façon de se coller aux antennes provoque un dysfonctionnement du système de détection. Une deuxième limitation concerne les erreurs qui surviennent lors du traitement des images. Différents filtres ont été mis en place afin de diminuer le nombre d'erreurs, mais les paramétrer reste difficile. L'idéal serait d'arriver à acquérir des données qui ne nécessitent pas de post-traitement (avec *MATLAB*) ultérieur au traitement d'image.

Faisant référence aux conclusions tirées dans le chapitre 5, certaines constations peuvent être faites quant à la capacité des poissons à remonter le modèle réduit. Les taux importants de franchissement montrent que les chevaines ont l'endurance nécessaire pour accomplir une remontée complète de la passe. Concernant les ablettes et les saumons, les échantillons de données collectées sont assez restreints. Il est donc difficile de tirer des conclusions définitives. Pour les saumons, les résultats de Pype (2015) permettent cependant de confirmer leur capacité à remonter. Pour les ablettes, ce constat doit être interprété avec prudence, même si des individus ont bel et bien été retrouvés à l'amont de la passe. Quant aux chabots, aucune remontée n'a

été observée. Sur base de ce résultat, il n'est donc pas possible de poser un diagnostic final par rapport à leur capacité à franchir la passe.

Malgré le fait que statistiquement aucun résultat n'est significatif, plusieurs tendances ont tout de même été mises en avant. Premièrement, concernant l'influence de la photopériode, les chevaines semblent privilégier les mouvements durant la nuit. Deuxièmement, pour les saumons et les chevaines, la première remontée semble durer plus longtemps que les suivantes.

Finalement, le dernier chapitre du corps de ce mémoire avait pour objectif de mettre en avant les caractéristiques comportementales des poissons dans un bassin de dimension standard et de faire le lien avec l'écoulement. La comparaison interspécifique montre que les ablettes et les chevaines ont un comportement assez similaire et sont tous deux capables de se mouvoir librement dans l'entièreté du bassin. Leurs trajectoires et les zones de forte densité de présence montrent toutefois que les individus restent majoritairement hors du jet principal de l'écoulement, dans trois endroits préférentiels du bassin. En comparant les trajectoires de ces poissons avec celles obtenues par Pype (2015) pour les salmonidés, il est observable que les ablettes et les chevaines suivent un chemin moins direct. Ce phénomène est particulièrement visible lors du franchissement d'une échancrure. Pour les chabots, le constat est tout autre. Ils sont tous restés, dans la mesure du possible, plaqués contre le fond du bassin, le long des parois ou derrière les antennes RFID. Les seuls mouvements enregistrés sont ceux de certains petits chabots qui se faisaient emporter par les courants trop puissants. Par une comparaison avec les vitesses de l'écoulement, il a aussi été démontré que ces petits chabots n'avaient pas la capacité de nage nécessaire pour franchir les échancrures.

Pour rappel, l'objectif général de recherche était de vérifier le caractère multispécifique de la passe à bassins de Rivière. En se basant sur l'entièreté des résultats obtenus avec le modèle réduit et les interprétations qui ont pu être faites, la conclusion générale est que la passe est adaptée aux salmonidés, considérés comme de très bons nageurs. La passe est aussi empruntable par les ablettes et les chevaines, qui sont aussi d'assez bons nageurs. Finalement, la passe semble ne pas convenir pour les mauvais nageurs que sont les chabots.

Avant de terminer cette section, la présente étude démontre que, pour être menée à bien, il est nécessaire de prendre en compte des facteurs relatifs à des domaines scientifiques bien distincts (biologie, éthologie, génie civil). Notre collaboration de recherche a permis d'apporter un caractère plus réaliste en considérant, par exemple, la dimension biologique qui est souvent négligée.

De plus, la réponse aux questions de recherche a pu être approfondie grâce à l'apport de chacun. Par exemple, la quantification de certains résultats comportementaux grâce au traitement d'images n'avait pas encore été réalisée dans le cadre d'une étude sur ce modèle.

7.2 Perspectives

Tout d'abord, la particularité de la présente étude est qu'elle comporte un aspect expérimental important tant dans la définition d'un protocole, de la variabilité spécifique du comportement des poissons que dans la collecte des données. Il est donc nécessaire de proposer certaines alternatives méthodologiques réalistes et flexibles qui permettront d'améliorer la fiabilité des résultats obtenus. Les études futures pourront alors être orientées vers certaines composantes qui ne sont pas prise en compte dans ce travail.

7.2.1 Matériel

Les résultats obtenus à l'aide des caméras et du système RFID sont prometteurs. Ils permettent de chiffrer et de démontrer de nombreuses tendances. Cependant, les limitations de traitement des données ont montré qu'il est nécessaire, à l'avenir, de sélectionner des lots et des espèces adaptés à l'expérimentation. Les poissons utilisés doivent être PIT taguables et détectables par les caméras.

Par ailleurs, bien qu'il soit encore peu envisageable de lier les données RFID aux résultats des caméras, la mise en commun de ces deux types de données permettra de mieux appréhender les données et d'en tirer plus d'informations.

D'autre part, la tendance scientifique montre actuellement un intérêt pour les systèmes non-intrusifs de collecte des données. Il est donc primordial de continuer à développer parallèlement les outils de reconnaissance d'image. Ce constat est appuyé par le fait que le système RFID a montré ses limites dans le cadre d'expérimentations avec des chabots. De plus, bien que facile à implémenter, le système RFID ne permet pas de récolter beaucoup d'informations au sein d'une passe réelle. Le comportement spécifique des poissons dans ces dispositifs de franchissement reste donc bien souvent une boîte noire très peu abordée dans la littérature scientifique.

Le fait de placer les caméras sous la surface transparente du modèle pourrait diminuer certaines interférences optiques au niveau de l'écoulement. Ce qui améliorerait probablement la qualité des images à traiter.

Finalement, durant cette étude, une tentative infructueuse d'utilisation de projecteurs infrarouges a été réalisée pour permettre la collecte de données durant la phase nocturne. Dans le but de souligner des différences comportementales induites par la photopériode, l'utilisation de ce type de matériel est une piste intéressante.

7.2.2 Matériel vivant

Les poissons pélagiques (saumons (Pype, 2015), truites (Pype, 2015), chevaines et ablettes) ont montré leur capacité à remonter la passe. Cependant, ces espèces sont considérées comme

assez durables. Il pourrait donc être intéressant d'utiliser des espèces possédant une endurance plus faible. Des poissons adoptant une stratégie basée sur des sprints ponctuels (ex. le brochet) sont de bons exemples.

De même, certaines familles de poissons comme les percidés n'ont pas été utilisées dans la présente étude. Les différences morphologiques sont donc une justification pour l'utilisation d'espèces autres que celles appartenant aux familles des cyprinidés ou des salmonidés.

Par ailleurs, l'utilisation d'autres espèces benthiques que le chabot peut assurément être motivée par le fait qu'elles possèdent généralement des capacités de nage bien plus faibles que les poissons pélagiques. De plus, le comportement des poissons de fond est plus difficile à appréhender que dans le cas de poissons pélagiques.

D'autre part, l'expérimentation avec des espèces possédant une nage anguilliforme paraît aussi pertinente, car beaucoup de ces poissons ont vu leur population diminuer ces dernières années (ex. l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), la lamproie fluviatile (*Lampetra fluviatilis*), la lamproie de Planer (*Lampetra planeri*)).

Finalement, l'utilisation d'individus sauvages permet de se rapprocher au mieux de la réalité de terrain. Cependant, il est probable que les biais expérimentaux (stress, privation de nourriture, etc.) soient plus nombreux et plus impactants que chez des individus d'aquaculture. Par conséquent, réaliser une comparaison de résultats obtenus à partir de lots sauvages et provenant d'aquaculture pour une même espèce semble intéressant. Le but est de pouvoir valider l'utilisation d'espèces d'aquaculture qui sont plus « manipulables » d'un point de vue expérimental.

7.2.3 Méthode

Premièrement, pour évaluer la franchissabilité de la passe, répéter plusieurs fois les expérimentations avec des lots différents permet d'obtenir des résultats significatifs. Néanmoins, il est compliqué de définir un protocole généralisé dans le cadre d'une étude portant sur la variabilité interspécifique. Pour rappel, la méthodologie doit en effet souvent être adaptée aux particularités comportementales spécifiques. C'est pourquoi nous encourageons les futurs chercheurs à réaliser une expérience préliminaire afin d'ajuster préalablement les paramètres expérimentaux selon les besoins de l'espèce utilisée.

Les chabots ont montré un manque de motivation à réaliser des remontées dans la passe. Remarquons que dans ce cas précis, certains paramètres tels que la faible rugosité de fond du modèle réduit ont probablement influencé ces résultats. Faciliter la remontée des espèces benthiques en plaçant un substrat rugueux ou des éléments protégeant les individus du courant peut être une piste d'étude dans le cadre du développement de passes à poissons adaptées aussi pour les poissons de fond.

Ensuite, les expérimentations réalisées sur le débit d'attrait ont mis en avant des remontées. Cependant, l'écoulement vers le bassin aval ne permet pas de simuler correctement les conditions réelles de la passe de Rivière. Néanmoins, comme cela a été mentionné précédemment, le débit d'attrait peut être un facteur limitant considérablement l'efficacité d'une passe. Il est donc primordial de réviser les paramètres de simulation pour permettre d'approfondir ce type de recherche.

La période expérimentale joue un rôle important dans l'état sanitaire des poissons. Par exemple, Pype avait observé une mortalité élevée durant la période de smoltification (avril). De même, une mortalité élevée des chabots est observée durant la période de reproduction (mars à juin). Tant pour les salmonidés que les cyprinidés, la période d'expérimentation idéale semble donc être de septembre à février. Rappelons nous toutefois qu'il est impossible de réaliser une pêche électrique durant les mois d'hiver.

Par ailleurs, il a été observé que certains éléments non-standards de la passe comme l' « escalier » du bassin 3 (figure 3.5) peuvent freiner les remontées des poissons. Il est donc pertinent d'orienter certaines expérimentations futures sur les bassins 1, 2 et 3 autour de cet escalier afin d'évaluer leur impact sur l'efficacité de la franchissabilité de la passe. Pour ce faire, des antennes RFID doivent être disposées à chaque échancrure afin de quantifier un « retard » par rapport au franchissement des bassins standards.

Finalement, dans le cadre de l'évaluation avec des espèces grégaires, comprendre l'effet de « banc » au niveau de la dynamique de remontée est un enjeu majeur. En effet, l'étude approfondie de l'impact sur la remontée en banc peut permettre d'éclaircir certains phénomènes qui n'avaient pas été pris en compte jusqu'à lors. Par exemple, la dislocation des bancs d'ablettes lors de leur remontée dans les passes peut induire une fragilisation à long terme de cette population de poissons.

Bibliographie

- Aigoui F., Dufour M. (2008). *Guide passes à poisson*. Voies navigables de France. p. 78.
- Alexander R. McN. (1966). *Physical Aspects of Swimbladder Function*. Biol. Rev., 41, pp. 141-176.
- Baudoin J.M., Burgun V., Chanseau M., Larinier M., Ovidio M., Sremski W., Steinbach P., Voegtle B. (2014). *Informations sur la Continuité Ecologique : Evaluer le franchissement des obstacles par les poisson. Principes et méthode*. Office national de l'eau et des milieux aquatiques, p. 204.
- Baugnée 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), p. 178.
- Beach M. H. (1984). *Fish pass design - criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fish in rivers*. Fisheries Research Technical Report, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, N° 78, p. 44.
- Blanchard E. (1866). *Les poissons des eaux douces de la France*. pp. 656.
- Bone Q. (1966). *On the function of the two types of myotomal muscle fibre in elasmobranch fish*. J. mar. biol. Ass. U.K., 46, pp. 321-349.
- Bonnetain F. (2013). *Evaluation des méthodes d'analyses appliquées aux sciences de la vie et de la santé- Comparaison de Moyennes et de Variances*. Unité de méthodologie & de qualité de vie en cancérologie, CHU Besançon, p. 63.

- Borcherding J., Bauerfeld M., Hintzen D., Neumann D. (2002). *Lateral migrations of fishes between floodplain lakes and their drainage channels at the Lower Rhine : diel and seasonal aspects*. Journal of Fish Biology, 61, pp. 1154-1170.
- Bourguignon S. (2016). *Apports de suivis comportementaux par biotélémétrie pour évaluer l'efficacité de l'échelle à poissons du barrage du Maka sur le Bocq*. Université de Liège, p. 59.
- Brainbridge R. (1957). *The speed of swimming of fish as related to size and amplitude to the frequency and amplitude of the tail beat*. The Zoological Laboratory, Cambridge, J. Exp. Biol. 35, pp. 109-133.
- Bruyndoncx L., Knaepkens G., Meeus W., Bervoets L., Eens M. (2002). *The evaluation of passive integrated transponder (PIT) tags and visible implant elastomer (VIE) marks as new marking techniques for bullhead*. Journal of Fish Biology, 60, pp. 260-262.
- Bushnell P. G., Steffensen J. F., Johansen K. (1984). *Oxygen Consumption and Swimming Performance in Hypoxia-acclimated Rainbow Trout Salmo Gairdneri*. Journal of experimental Biology, 113, pp. 225-235.
- Claireaux G., Courturier C., Groison A.L. (2006). *Effect of temperature on maximum swimming speed and cost of transport in juvenile European sea bass (Dicentrarchus labrax)*. Journal of experimental Biology, 209, pp. 3420-3428.
- Cornu V., Baran P., Calluau D., David L. (2012). *Effects of various configurations of vertical slot fishways on fish behaviour in an experimental flume*. International Symposium on Ecohydraulics (ISE), Vienna, 9, p. 7.
- Cowx I. G., Welcomme R. L. (eds) (1998) *Rehabilitation of Rivers for Fish*. FAO and Fishing News Books, Blackwell Science Ltd, Oxford.
- Crisp D. T., Mann R. H. K. (1991). *Effects of impoundment on populations of bullhead Cottus gobio L. and minnow, Phoxinus phoxinus (L.), in the basin of Cow Green Reservoir*. Journal of Fish biology, 38, pp. 731-740.
- De Leeuw J. J., Winter H. V. (2008). *Migrations of rheophilic fish in the large low-land rivers Meuse and Rhine*. The Netherlands, Fisheries Management and Ecology, 15, pp. 409-415.
- Epler P., Bartel R., Wozniowski M., Duc M., Olejarski D. (2004). *The passage of fish through the fishway at Roznów dam in the 1997-2003 period*. Archives of Polish Fisheries, Vol. 12, N° 2, pp. 177-186.
- Fausch K. D., Torgersen C. E., Baxter C. V., Li H. W. (2002). *Landscapes to Riverscapes : Bridging the Gap between Research and Conservation of Stream Fishes*. American Institute of Biological Sciences, BioScience, Vol. 52, N° 6, pp. 483-498.
- Fredrich F., Ohmann S., Curio B., Kirschbaum F. (2003). *Spawning Migrations of the chub in the River Spree, Germany*. Journal of Fish Biology 63, pp. 710-723.
- Freon P. (n.d.). *Relations, Tailles-Poids, Facteurs de Condition et Indices de Maturité Sexuelle : Rappels Bibliographiques, Interprétations, Remarques et Applica-*

- tions. I.S.R.A., Centre de Recherches océanographiques de Dakar-Thiaroye, pp. 143-171.
- Freyhof J., Kottelat M., Nolte A. (2005). *Taxonomic Diversity of European Cottus with Description of Eight New Species (Teleostei : Cottidae)*. Ichthyological Exploration of Freshwaters 16, pp. 107-172.
- Freyhof J., Kottelat M. (2008). *Alburnus alburnus*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2008*. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, p. 7.
- Freyhof J. (2014). *Squalius cephalus*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2014*. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, p. 8.
- Garner P. (1999). *Swimming ability and differential use of velocity patches by 0+ cyprinids*. Ecology of Freshwater Fish, 8, pp. 55-58.
- Genotte V. (2003). *Etude de l'organisation des mouvements de nage au cours de l'ontogenèse de Clarias (Teleostei, Clariidae) : nouvelle approche cinématique*. Université de Liège, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix de Namur, p. 50.
- Godinez, E. A., Alonso, F. M., Blanco, M. C., Domínguez, Á. L. (2014). *Investigación sobre el comportamiento de los peces en una escala existente en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Conclusiones de las campañas de ensayos 2009-2012*. Ingeniería Civil, 173, pp. 33 - 42.
- Gouskov A., Reyes M., Wirthner-Bitterlin L., Vorbürger C. (2016). Evolutionary Applications, Vol. 9, Issue 2, pp. 394-408.
- Groot C. (2010). *Physiological Ecology of Pacific Salmon*. UBC Press, Nature, p. 515.
- Guillaume J., Kaushik S., Bergot P., Metailler R. (1999). *Nutrition and Feeding of Fish and Crustaceans*. INRA-IFREMER, XXIV, p. 408.
- Johnston I. A. (1981). *Structure and Function of Fish Muscles*. Symp. zool. Soc. Lond., N° 48, pp. 71-113.
- Johnston I. A., Van Leeuwen J. L., Davies M. L. F., Beddow T. (1995). *How Fish Power Predation Fast-Starts*. The Journal of Experimental Biology 198, pp. 1851-1861.
- Johnston I. A., Ball D. (1996). *Thermal stress and muscle function in fish*. Society for Experimental Biology Seminar Series 61 : Global Warming : Implications for freshwater and marine fish, pp. 79-104.
- Johnston I. A., Goldspink G. (1973). *Some Effects of Prolonged Starvation on the Metabolism of the Red and White Myotomal Muscles of the Plaice Pleuronectes platessa*. Springer-Verlag, Marine Biology 19, pp. 348-353.
- Kapoor B.G., Bhavna Khanna (2004). *Ichthyology Handbook*. Springer Science Business Media, p. 1059.
- Kapur J. N., Sahoo, P. K., Wong, A. K. (1985). *A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram*. Computer vision, graphics, and

- image processing, 29(3), pp. 273-285.
- Katopodis C., Gervais R. (1991). *Ichthyomechanics*. Freshwater Institute, Central and Arctic Region, Department of Fisheries and Ocean, p. 46.
- Katopodis C. (1992). *Introduction to fishway design*. Freshwater Institute, Central and Arctic Region, Department of Fisheries and Oceans.
- Katopodis C., Gervais R. (2012). *Ecohydraulics Analysis of Fish Fatigue Data*. River Research and Applications, 28, pp. 444-456.
- Katopodis C., Gervais R. (2016). *Fish swimming performance database and analyses*. Central and Arctic Region, Fisheries and Ocean, Canada, p. 550.
- Knaepkens G., Bruyndoncx L., Eens M. (2004). *Assessment of residency and movement of the endangered bullhead (Cottus gobio) in two Flemish rivers*. Ecology of Freshwater Fish, 13, pp. 317-322.
- Knaepkens G., Backelandt K., Eens M. (2005). *Fish pass effectiveness for bullhead (Cottus gobio), perch (Perca fluviatilis) and roach (Rutilus rutilus) in a regulated lowland river*. Ecology of Freshwater Fish, 15, pp. 20-29.
- Knaepkens G., Baekelandt K., Eens M. (2005). *Assessment of the movement behaviour of the bullhead (Cottus gobio) an endangered European freshwater fish*. Animal Biology, Vol. 55, N° 3, pp. 219-226.
- Knaepkens G., Maerten E., Tudorache C., De Boeck G., Eens M. (2007). *Evaluation of passive integrated transponder tags for marking the bullhead (Cottus gobio), a small benthic freshwater fish : effects on survival, growth and swimming capacity*. Ecology of Freshwater Fish, 16, pp. 404-409.
- Koç H. T., Erdoğan Z., Bulgen K. (2014). *Observations on biological properties of the chub, Leuciscus cephalus and environment conditions in the Çaparlıpatlak Pond (Balıkesir), Southern Marmara Region, Turkey*. Biologija, Vol. 60, N° 3, pp. 165-174.
- Kotusz J., Witkowski A., Baran M., Blachuta J. (2006). *Fish migrations in a large lowland river (Odra R., Poland) - based on fish pass observations*. Folia Zoologica, 55(4), pp. 386-398.
- Larinier, M. (1983). *Guide pour la conception des dispositifs de franchissement des barrages pour les poissons migrateurs*. Bulletin Français de Pisciculture, p. 39.
- Larinier M. (1987). *Les passes à poisson : méthodes et techniques générales*. La Houille Blanche, N° 1/2, p.7.
- Larinier, M., Porcher, J. P., Travade, F., Gosset, C. (1994). *Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement*. CSP.
- Larinier M. (2001). *Environmental issues, dams and fish migration*. Dans Dams, Fish and Fisheries, Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp.45-90
- Liao J. C. (2007). *A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows*. Philosophical Transactions of the Royal Society B, p. 21.
- Lindsey C. C. (1979). *Form, function, and locomotory habits in fish*. Fish Physiology,

- Vol. 7, pp. 1-100.
- Lucas M. C., Baras E. (2001). *Migration of Freshwater Fishes*. Blackwell Science Ltd, p. 440.
- Mann R. H. K. (1976). *Observations on the age, growth, reproduction and food of the chub *Squalius cephalus* (L.) in the River Stour, Dorset*. Journal of Fish Biology, 8, pp. 265-288.
- Martínez M., Guderley H., Dutil J.D., Winger P. D., He P., Walsh S. J. (2003). *Condition, prolonged swimming performance and muscle metabolic capacities of cod *Gadus morhua**. The Journal of Experimental Biology, 206, pp. 503-511.
- McLeod, A.M., Nemenyi, P. (1940). *An investigation of fishways*. Bull. Iowa St. Univ., Ames, Iowa, 24, pp. 1-72.
- Mills C. A., Mann R. H. K. (1983). *The Bullhead *Cottus gobio*, a Versatile and Successful Fish*. Freshwater Biological Association, Ambleside, Annual Report, 51, pp. 76-88.
- Noonan M. J., Grant J. W. A., Jackson C. D. (2011). *A quantitative assessment of fish passage efficiency*. Fish and Fisheries, p. 15.
- Ovidio M., Philippart J.C. (2007). *Élaboration de recommandations pratiques pour la préservation-restauration d'éléments de l'habitat hydraulique du chabot dans les cours d'eau non navigables de Wallonie*. Université de Liège (ULg), Région Wallonne, p. 117.
- Ovidio M., Philippart J.C. (2014). *Convention relative à la Réhabilitation du Saumon Atlantique dans le Bassin de la Meuse*. Service Public de Wallonie, Région Wallonne, p. 159.
- Panfili J., de Pontual H., Wright P.J. (2002). *Manuel de sclérochronologie des poissons*. Eds Quae, p. 463.
- Pearson M. P., Spriet L. L., Stevens E. D. (1990). *Effect of Sprint Training on Swim Performance and White Muscle Metabolism during Exercise and Recovery in Rainbow Trout (*Salmo Gairdneri*)*. Journal of Experimental Biology, 149, pp. 45-60.
- Peldster B. (1997). 5 Buoyancy at Depth. *Fish Physiology*, Vol. 16, pp. 195-237.
- Philippart J.C. (1989). *Ecologie des Populations de Poissons et Caractéristiques Physiques et Chimiques des Rivières dans le Bassin de la Meuse Belge*. Bulletin de la Société Géographique de Liège, 25, pp. 175-198.
- Philippart J.C. (2005). *Le voyage périlleux des poissons grands migrateurs dans la Meuse*. APAMLg asbl, Liège, 56 pp.
- Philippart J.C. (2007). *Biodiversité et caractéristiques physiques des cours d'eau*. Université de Liège, p.13.
- Pollux B.J.A., Korosi A., Verberk W.C.E.P., Pollux P.M.J., van der Velde G. (2006). *Reproduction, growth, and migration of fishes in a regulated lowland tributary : potential recruitment to the River Meuse*. Springer, Hydrobiologia, 565, pp. 105-120.

- Prchalová M., Slavík O., Bartoš L. (2006). *Patterns of cyprinid migration through a fishway in relation to light, water temperature and fish circling behaviour*. International Journal of River Basin Management, 4 :3, pp. 213-218.
- Prchalová M., Vetešník L., Slavík O. (2006). *Migrations of juvenile and subadult fish through a fish pass during late summer and fall*. Folia Zoologica, 55(2), pp. 162-166.
- Prignon C., Micha J.C., Gillet A. (1998). *Biological and Environmental Characteristics of Fish Passage at the Tailfer Dam on the Meuse River, Belgium : Fish Migration and Fish Bypasses*. Fishing, News Books, pp. 69-84.
- Pype J.C. (2015). *Passes à poissons - Etude comportementale expérimentale en modèle réduit*. Université catholique de Louvain, Ecole polytechnique de Louvain (EPL), p. 107.
- Randall D., Brauner C. (1991). *Effects of Environmental Factors on Exercise in Fish*. Journal of experimental Biology, 160, pp. 113-126.
- Région Wallonne (n.d.). *Poissons de Wallonie - Les eaux calmes*. p. 2.
- Région Wallonne (n.d.). *Poissons de Wallonie - Les eaux vives*. p. 2.
- Rényi, A. (1961). *On measures of entropy and information*. In *Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1 : Contributions to the Theory of Statistics*. The Regents of the University of California.
- Roscoe D. W., Hinch S. G. (2010). *Effectiveness monitoring of fish passage facilities : historical trends, geographic patterns and future directions*. Fish and fisheries, 11, pp.12-33.
- Rytwinski T., Algera D. A., Taylor J. J., Smokorowski K. E., Bennett J. R., Harrison P. M., Cooke S. J. (2017). *What are the consequences of fish entrainment and impingement associated with hydroelectric dams on fish productivity ? A systematic review protocol*. The official journal of the Collaboration for Environmental Evidence, 6 :8, p.9.
- Sagnes P., Statzner B. (2009). *Hydrodynamic abilities of riverine fish : a functional link between morphology and velocity use*. Aquatic Living Resources, 22, pp. 79-91.
- Schulte P. M., Moyes C. D., Hochachka P. W. (1992). *Integrating Metabolic Pathways in Post-Exercise Recovery of White Muscle*. Journal of EXperimental Biology, 166, pp. 181-195.
- Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies B. C. (1999). *Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion*. IEEE Journal of Ocean Engineering, Vol. 24, N° 2, pp. 237-252.
- Slavík O., Horký P., Bartoš L. (2009). *Occurrence of cyprinids in fish ladders in relation to flow*. Institute of Zoology, Slovak Academy of Sciences, Biologia, 64, N° 5, pp. 999-1004.
- Smyly W. J. P. (1956). *The Life-History of the Bullhead or Miller's Thumb (Cottus*

- gobio L.*). Freshwater Biological Association, Ambleside, Proceedings, Vol. 128, Part 2, pp. 431-453.
- Sottiaux B. (2007). *Chapitre I : Notions d'anatomie interne et externe du poisson*. Cours de pêche, Cours industriels et commerciaux Couillet, p.10.
- Taguchi M., Liao J. C. (2011). *Rainbow trout consume less oxygen in turbulence : the energetics of swimming behaviors at different speeds*. The Journal of Experimental Biology 214, pp. 1428-1436.
- Taylor E. W., Egginton S., Taylor S. E., Butler P. J. (1966). *Factors which may limit swimming performance at different temperatures*. Society for Experimental Biology Seminar Series, 61, pp. 105-133.
- Tien J. H., Levin S. A., Rubenstein D. I. (2004). *Dynamics of fish shoals : identifying key decision rules*. Evolutionary Ecology Research, 6, pp. 555-565.
- Tomlinson M. L., Perrow M. R. (2003). *Ecology of the Bullhead*. Conserving Natura 2000 Rivers Ecology Series, English Nature, Peterborough, N° 4, p.19.
- Tritico H. M., Cotel A. J. (2010). *The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (Semotilus atromaculatus)*. The Journal of Experimental Biology 213, pp. 2284-2293.
- Tudorache C., Viaene P., Blust R., Vereecken H., De Boeck G. (2008). *A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species*. Ecology of Freshwater Species, 17, pp. 284-291.
- Videler J. J. (1993). *Fish Swimming*. Springer Science & Business Media, p. 260.
- Vion F. (2005). *Analyse des projets d'introduction, d'extension, de réintroduction et de restauration du saumon atlantique (Salmo salar L.) dans le monde*. Université de Metz - Paul Verlaine, p. 115.
- Wang, R. W., David, L., Larinier, M. (2010). *Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes*. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, (396), 02, p. 23.
- Wardle C. S. (1975). *Limit of fish swimming speed*. Nature, Vol. 255, pp. 725-727.
- Webb P. W. (1994). *Chapter 4 - The biology of fish swimming*. pp. 45-62 dans Mad-dock L., Bone Q., Rayner J. M. V. (1994). *The Mechanics and Physiology of Animal Swimming*. Marine Biological Association of the United Kingdom, Society for Experimental Biology (Great Britain), Cambridge University Press, p. 250.
- Williams J. G., Armstrong G., Katopodis C., Larinier M., Travade F. (2012). *Thinking like a fish : A key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions*. River Research Applications, 28, pp. 407-417.
- Wirz L., Gründler S. (2011). *La diversité dans nos eaux - Le chabot*. Fédération Suisse de Pêche FSP, p.2.
- Wolter C., Arlinghaus R. (2003). *Navigation impacts on freshwater fish assemblages : the ecological relevance of swimming performance*. Reviews in Fish Biology and Fisheries, pp 63-89.

- Zhou Y. (1982). *The swimming behaviour of fish in towed gears ; A reexamination of the principles*. Department of Agriculture and Fisheries for Scotland, Working Paper N°4/82, p. 50.
- Zorzan, G., Bousmar, D., Libert, Y. (2016). *Modernisation de l'échelle à poissons du barrage de Rivière (Haute-Meuse)*. Service Public de Wallonie, DGO2, DO.222, p. 49.

Webographie

- Dunbar P. (2010). *La biodiversité en Wallonie. Saumon atlantique (Salmo salar)*. Image en ligne sur le portail WALLONIE.BE (DGARNE), <http://biodiversite.wallonie.be/fr/salmo-salar.html?IDD=50334040&IDC=296>, consulté le 16 avril 2017.
- Dunbar P. (2010). *La biodiversité en Wallonie. Ablette commune (Alburnus alburnus)*. Image en ligne sur le portail WALLONIE.BE (DGARNE), <http://biodiversite.wallonie.be/fr/alburnus-alburnus.html?IDD=50334000&IDC=302>, consulté le 16 avril 2017.
- Farnham Angling Society (2010). *Bullhead - AKA Millers Thumb*. Image en ligne sur <http://www.farnhamanglingsociety.com/species/bullhead.php>, consulté le 20 avril 2017.
- Genevois (1958) cité par Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (2012). *Photopériode*. En ligne sur <http://www.cnrtl.fr/definition/tacon>, consulté le 14 août 2017.
- IECBW (2016). *Paramètres et normes*. En ligne sur <https://www.iecbw.be/parametres-et-normes>, consulté le 23 juillet 2017.
- ImageJ. (2017). *ImageJ*. En ligne <https://imagej.net/ImageJ>, consulté le 5 août 2017.
- ImageJ WIKI. (2012). *Gaussian Blur*. En ligne <http://imagejdocu.tudor.lu/doku.php?id=gui:start>, consulté le 5 août 2017.
- Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea) (2014). *Les poissons migrateurs amphihalins*. En ligne sur <http://www.irstea.fr/lespace-jeunesse/decouvrir/les-poissons-migrateurs-amphihalins>, consulté le 15 août 2017.
- Jones M. (2004). *Programme d'Information sur les espèces aquatiques cultivées. Salmo salar*. FAO, Département des pêches et de l'aquaculture de la FAO, image en ligne sur http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Salmo_salar/fr, consulté le 06 août 2017.
- Linternaute. (s.d.). *Macro*. En ligne sur <http://www.linternaute.com/dictionnaire/fr/definition/macro/>, consulté le 5 août 2017.

- Luna S. M., modifié par Bailly N. (2007). *Alburnus alburnus*. En ligne sur FishBase, <http://www.fishbase.org/summary/Alburnus-alburnus.html>, consulté le 15 juin 2017.
- Luna S. M., modifié par Torres A. G. (2010). *Gasterosteus aculeatus*. En ligne sur FishBase, <http://www.fishbase.org/summary/Gasterosteus-aculeatus.html>, consulté le 2 juillet 2017.
- Luna S. M., modifié par Torres A. G. (2010.) *Perca fluviatilis*. En ligne sur FishBase, <http://www.fishbase.org/summary/Perca-fluviatilis.html>, consulté le 2 juillet 2017.
- Luna S. M., modifié par Torres A. G. (2014). *Cottus gobio*. En ligne sur FishBase, <http://www.fishbase.se/summary/Cottus-gobio.html>, consulté le 10 juillet 2017.
- Paquer F., Philippart J.C. (2006). *Saumon Meuse*. En ligne sur <http://www.saumon-meuse.be/index.html>, consulté le 25 avril 2017.
- Reggio, M. (2014) *Notes de cours de Mécanique des fluides de l'École Polytechnique de Montréal*. En ligne <https://fr.scribd.com/document/353629450/MecaFlu2014-5a-pdf>, consulté le 15 juillet 2017.
- Région Wallonne. (2010). *La biodiversité en Wallonie. Saumon atlantique (Salmo salar)*. En ligne sur le portail WALLONIE.BE (DGARNE), <http://biodiversite.wallonie.be/fr/salmo-salar.html?IDD=50334040&IDC=296>, consulté le 16 avril 2017.
- Sante-Medecine (2014). *Rythme circadien - Définition*. En ligne sur <http://sante-medecine.journaldesfemmes.com/faq/definitions-237#23690>, consulté le 14 août 17.
- Union Européenne (2011). *Qualité des eaux piscicoles*. En ligne sur <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:l28010&from=FR>, consulté le 07 août 2017.
- Vetofish (2017). *otolithes*. En ligne sur <https://www.vetofish.com/definition/otolithes>, consulté le 16 août 2017.
- Vetofish (2017). *smoltification*. En ligne sur <https://www.vetofish.com/definition/smoltification>, consulté le 14 août 2017.
- Villemin P. (1975) cité par Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (2012). *Photopériode*. En ligne sur <http://www.cnrtl.fr/definition/photop%C3%A9riode>, consulté le 14 août 2017.

Annexes

ANNEXE A

Annexe se rapportant aux parties bibliographiques (chapitres 2 et 3)

A.1 Caractérisations migratoire et natatoire des poissons

Comparaison des courbes de vitesse maximale d'un poisson selon sa taille déterminées à partir des relations empiriques mises au point par Wolter C. et Arlinghaus R. et par Katopodis C. et Gervais R.

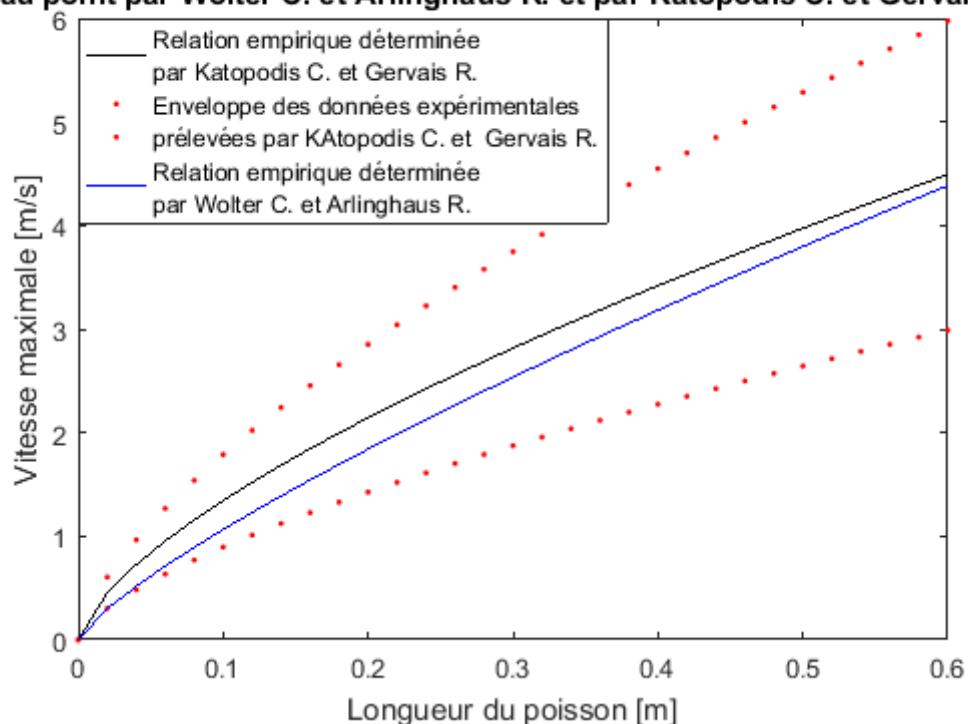


FIGURE A.1 – Comparaison des courbes simulées de vitesse maximale selon la longueur du poisson définies sur base des données collectées par Katopodis et Gervais (1991) et par Wolter et Arlinghaus (2003)

Comparaison des courbes de vitesse maximale de croisière d'un poisson selon sa taille déterminées à partir des relations empiriques mises au point par Wolter C. et Arlinghaus R. et par Katopodis C. et Gervais R.

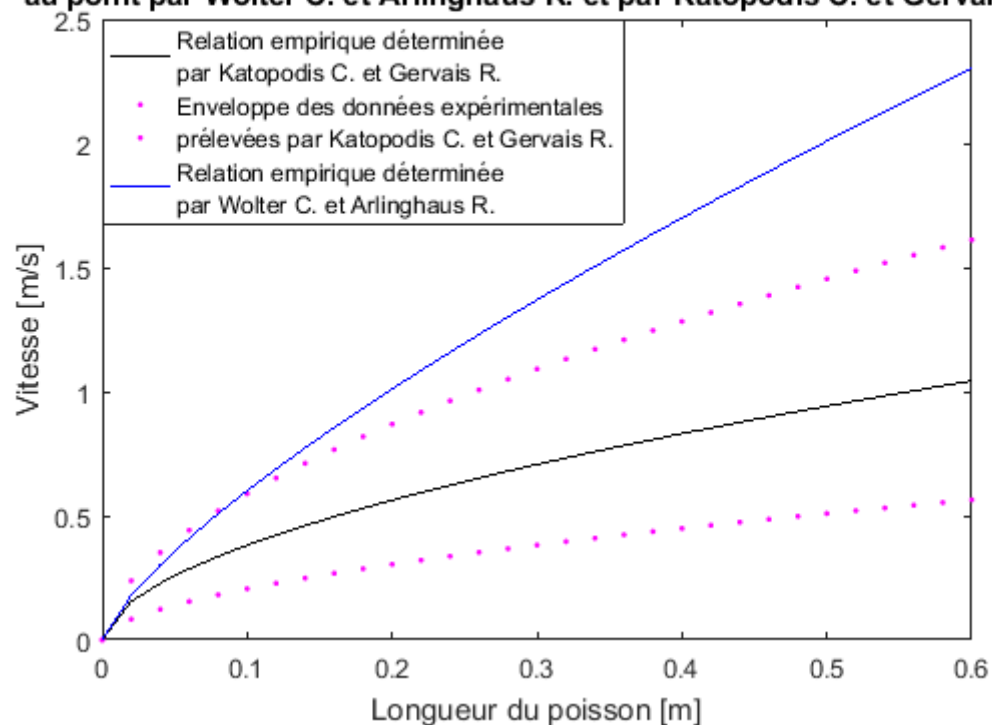


FIGURE A.2 – Comparaison des courbes simulées de vitesse maximale de croisière selon la longueur du poisson définies sur base des données collectées par Katopodis et Gervais (1991) et par Wolter et Arlinghaus (2003)

A.2 Présentation du modèle réduit

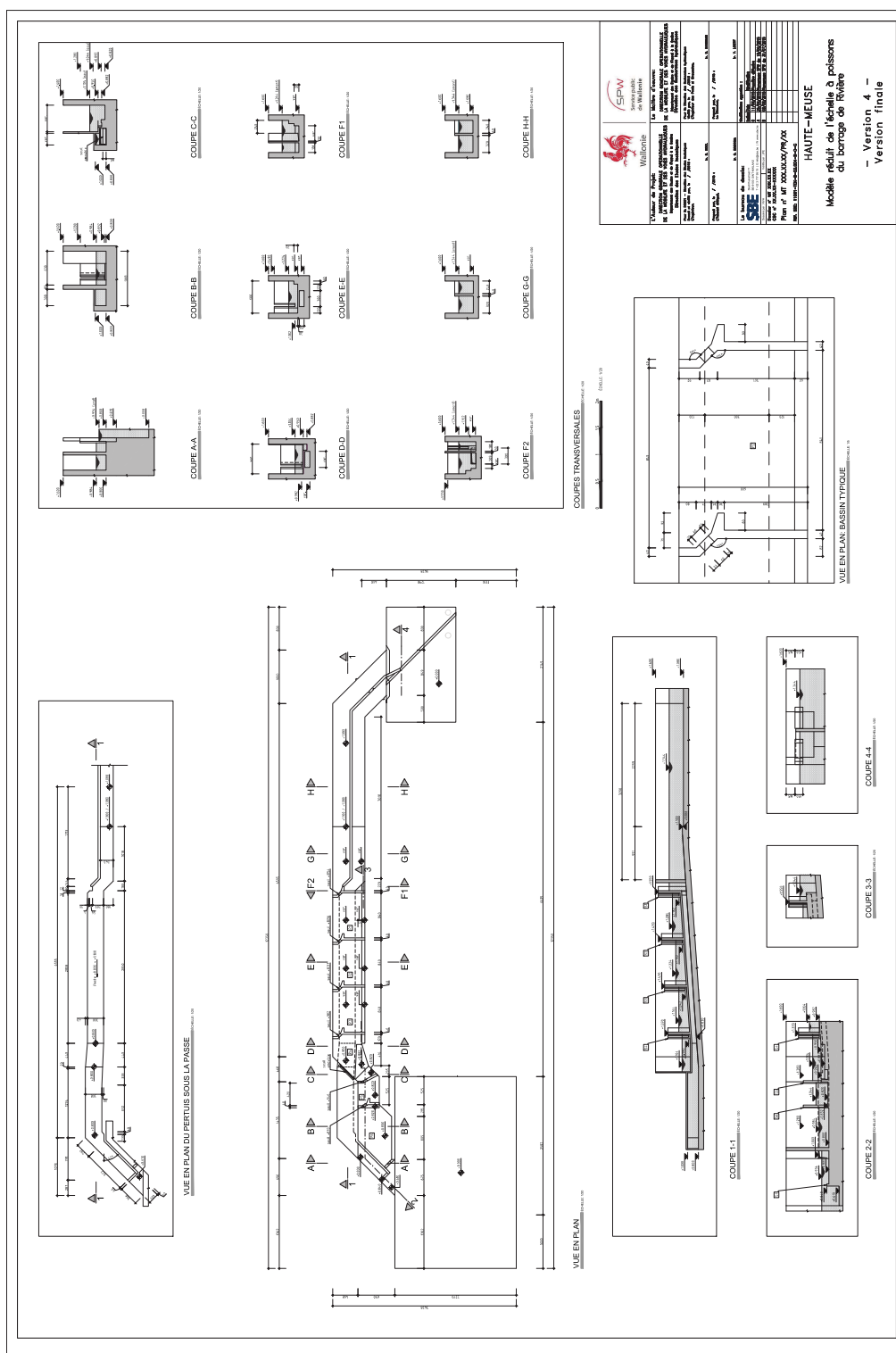


FIGURE A.3 – Plan de la situation finale du modèle réduit (échelle 1/5) de la passe à poisson de Rivière construit au Laboratoire de Recherches Hydraulique à Châtelet, Belgique (Zorzan, 2016)

Annexe se rapportant aux matériels et méthodes (chapitre 4)

B.1 Matériel vivant

TABLE B.1 – Tableau de comparaison des coefficients paramétrisant les relations taille-poids pour des données de la littérature et les données de chaque lot

Régression : $y = a.x^b$	Valeur prise dans la littérature	Valeur déterminée à partir du lot
Pour le coefficient a,		
Saumon	0,012 (Fishbase.org, n.d.)	0,0074
Ablette	0,0076 (Fishbase.org, n.d.)	0,0088
Chevesne	0,0087 (Fishbase.org, n.d.)	0,0083
Chabot	0,0066 (Fishbase.org, n.d.), 0,0097 (Treer T. et al., 2008)	0,0064
Pour le coefficient b,		
Saumon	3 (Fishbase.org, n.d.)	3,1863
Ablette	2,99 (Fishbase.org, n.d.)	2,8544
Chevesne	3,12 (Fishbase.org, n.d.)	3,3555
Chabot	3,304 (Fishbase.org, n.d.), 3,128 (Treer T. et al., 2008)	3,2842

B.2 Système caméra

TABLE B.2 – Caractéristiques des caméras utilisées

Type de caméra	Marlin F-131B
Caractéristiques de l'objectif	Distance focale : 8,5 mm Ouverture maximale : 1 :1,5

Le tableau B.3 explique la disposition des caméras par rapport au sol et aux barres métalliques sur lesquels elles sont fixées à l'aide d'un bras. Les photos de la figure B.1 illustrent cette disposition grâce à plusieurs angles de vue.

TABLE B.3 – Tableau indiquant la disposition exacte de caméras accrochées aux barres métalliques prévues à cet effet le long du modèle réduit de la passe de Rivière

Caméra	Emplacement	Mesure	Valeur
CAM 1	Au dessus du bassin 6 (amont)	Hauteur (sol - boîtier)	335 cm
		Distance verticale prà la barre	34 cm
CAM 2	Au dessus du bassin 5	Hauteur (sol - boîtier)	335 cm
		Distance verticale prà la barre	34 cm
CAM 3	Devant l'échancrure entre bassins 5 et 6	Hauteur (sol - boîtier)	125 cm
		Distance pylône - boîtier	29 cm
		Distance passe - boîtier	130 cm
CAM 4	Au dessus du bassin 1 (aval)	Hauteur (sol - boîtier)	335 cm
		Distance prà la barre	46 cm



FIGURE B.1 – Illustration de la disposition des caméras le long du modèle réduit

B.3 Protocole de marquage par PIT tag, de mesurage et de pesée

Matériel

- Gants de latex
- Trois grands seaux
- Tableau à trois colonnes à remplir
- Anesthésiant (Ether monophénylique de l'éthylèglycol [M])
- Lame de scalpel de type 11
- Scanner de PIT tag mobile
- PIT tags

Pour la pesée,

- Balance (précision : $\pm 0,1$ g)

Pour la mesure de la longueur,

- Planche adaptée à la mesure des poissons (précision : $\pm 0,1$ cm)

Méthode

Pour réaliser cette opération, il est conseillé d'être deux personnes pour augmenter l'efficacité des manipulations et diminuer ainsi la durée pendant laquelle le poisson restera hors de l'eau.

Une dizaine de PIT tags sont d'abord référencés selon leur code (hexadécimal ou décimal) grâce au lecteur.

Un seau contenant un volume d'eau connu est placé sur la table d'opération. Dans celui-ci sont versés 2,3 mL d'anesthésiant/L d'eau. Attention à bien diluer l'anesthésiant qui est peu soluble.

Une dizaine de poissons préalablement pêchés et stockés dans un seau sont ensuite placés dans le seau. Après quelques minutes, les poissons sont endormis. Leur comportement est hagard. Chaque poisson peut être mesuré et pesé avec plus de facilité.

Une fois un individu pesé et mesuré, le ventre du poisson est incisé sur quelques millimètres. La position et la taille de l'incision dépendent de l'espèce et de la taille du PIT tag. Ce dernier est alors inséré après avoir lié les dimensions morphologiques mesurées à l'identifiant du PIT tag dans le tableau à trois colonnes.

Le poisson est ensuite relâché dans un autre seau contenant de l'eau fraîche et brassée sans anesthésiant pour stopper l'anesthésie.

Une période d'observation et calme de quelques jours permet ensuite de vérifier la qualité de l'opération tant au niveau du taux de survie des poissons qu'au niveau de la perte du PIT tag avant la cicatrisation.

B.4 Résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques l'eau

TABLE B.4 – Résultats de l'analyse de l'eau du laboratoire de Châtelet

		Normes européennes de qualité des eaux (europa.eu, 2006)		
Paramètre	Valeur	salmonicoles	cyprinicoles	Normes belges de potabilité des eaux (IECBW, 2016)
Paramètres chimiques				
DBO5 [mg O2/L]	<3	<3	<6	
Chlorures [mg Cl/L]	103			<250
Dureté [°F]	16,8			Pas de limite
Azote ammoniacal [mg N/L]	<0,04	<0,04	<0,2	<0,5
Nitrates [mg N/L]	4,4			<50
Nitrites [mg N/L]	<0,003	<0,01	<0,03	0,1
Azote total [mg N/L]	4,4			
Phosphore total [mg P/L]	<0,06			Pas de limite
Paramètres microbiologiques				
Coliformes [nombre/100 mL]	46			0
Escherichia coli [nombre/100 mL]	1			0
Salmonelles [Présence/1 L]	Absence			

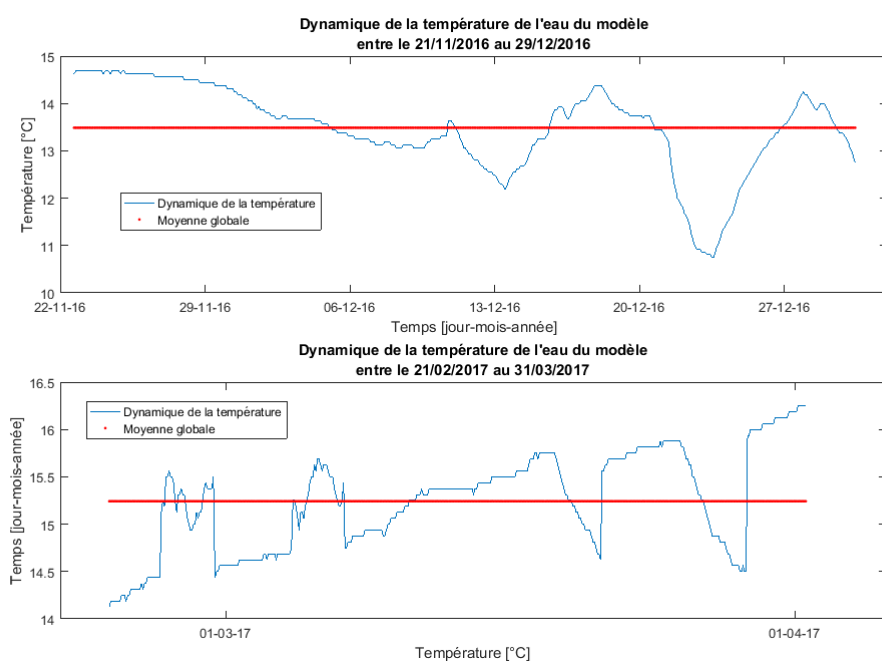


FIGURE B.2 – Figures présentant l'évolution de la température de l'eau du sous-sol du laboratoire en fonction du temps pour deux périodes différentes de l'année (A, du 21/11/16 au 29/12/16; B, du 21/02/16 au 31/03/17)

B.5 Traitement des données RFID

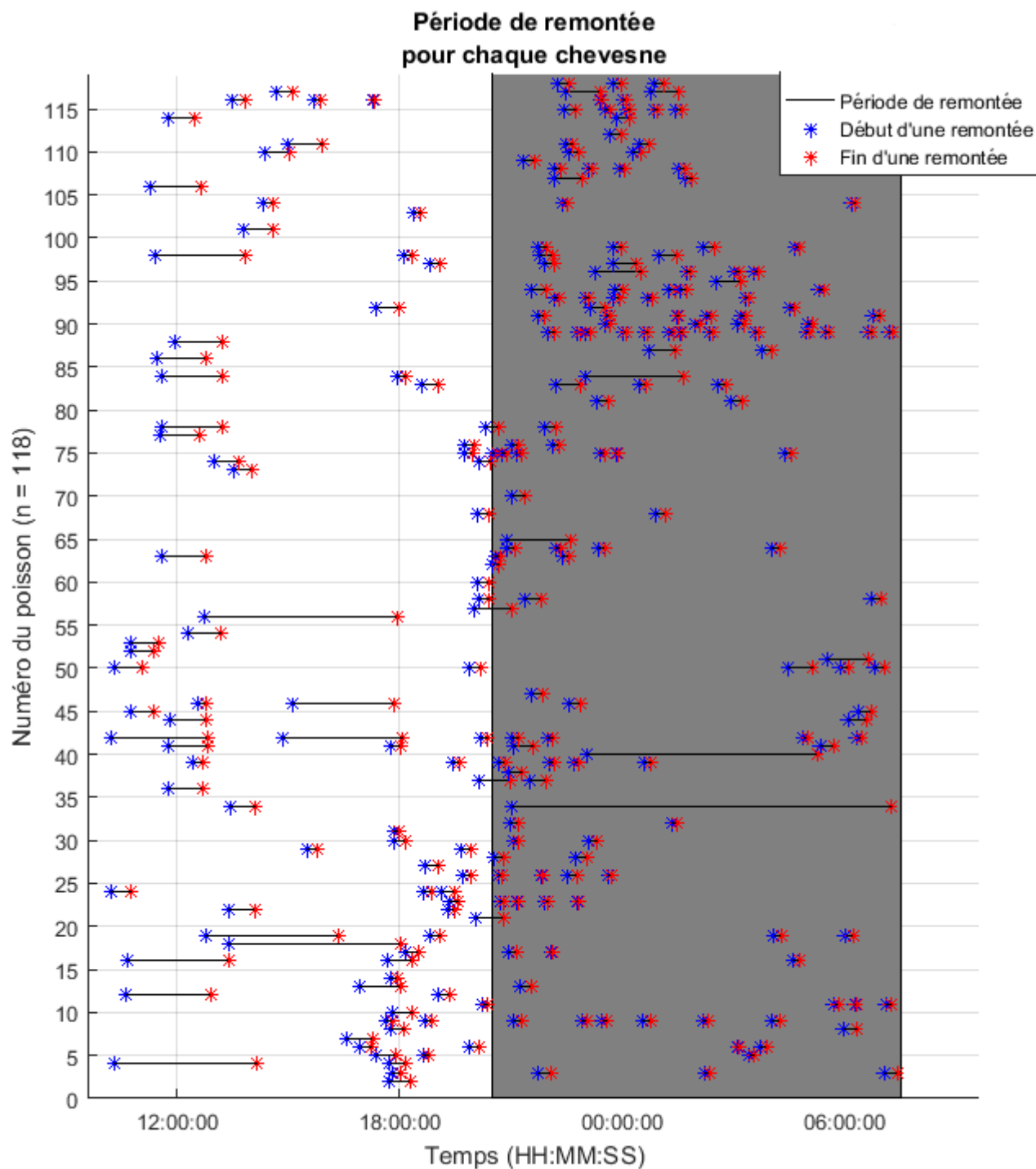


FIGURE B.3 – Périodes des phases remontées des chevesnes en fonction du temps expérimental

B.6 Traitement des images

B.6.1 Définitions des ROI

Les polygones qui délimitent la ROI (Region of Interest) pour chaque "type" d'image sont définis comme suit sur le programme ImageJ.

Pour les caméras 1 et 2 filmant les bassins 5 et 6 de dimension standard :

— Bassin standard : *makePolygon(600,129,120,128,120,190,209,221,208,241,158,241,158,472,646,482,646,248,598,204)* ;

Pour la caméra verticale filmant l'échancrure entre le bassin 5 et 6 :

— Bassin entier : *makePolygon(351,268,351,405,0,374,0,232,156,236)* ;

— ROI réduite : *makePolygon(188,125,188,261,319,272,318,146,262,126)* ;

B.6.2 Paramètres ImageJ

Le tableau B.5 donne la valeur des paramètres pour chaque lot d'image traité avec ImageJ.

TABLE B.5 – Tableau reprenant la valeur de chaque paramètre défini dans le programme ImageJ, pour chaque lot d'image traité

Lot d'image	Gaussian Blur Sigma	Threshold lower limit	Size limit	Circularity
Ablettes				
CAM1 - Test1	1	16	10 - 70	0.00 - 0.35
CAM1 - Test2	1	23	0 - 250	0.00 - 0.50
CAM3 - Test1	2	7	150 - inf	-
CAM3 - Test2	2	7	150 - inf	-
Chevaines				
CAM1 - Tous les lots	2	10	250 - inf	-
CAM2 - Tous les lots	2	14	150 - inf	-
CAM3 - Tous les lots	2	10	150 - inf	-

B.6.3 Définition Threshold RenyiEntropy

Cette section tente d'expliquer le fonctionnement de la méthode de threshold RenyiEntropy. Le choix de cette méthode a été fait purement par l'analyse des résultats obtenus en comparaison avec d'autres méthodes adaptatives de thresholding.

Le processus de *thresholding* consiste à extraire sur une image un objet (clairement distinguable) de son environnement. Concrètement, une valeur de l'histogramme des échelles de gris de l'image sera choisie permettant d'isoler l'objet en également toutes les valeurs sous cette valeur seuil à la couleur noir (0) et toutes les valeurs de l'histogramme au dessus de ce seuil à la couleur blanche (255). Lorsque l'histogramme est bimodal (deux pics), il peut être intéressant de choisir ce seuil comme étant le creux de l'histogramme. Si ce n'est pas le cas, d'autres méthodes adaptatives à l'histogramme peuvent être utilisées, comme par exemple la méthode de RényiEntropie.

WIKIPEDIA - L'entropie est définie dans la théorie de l'information comme étant : quantification du manque d'information. - Entropie de Rényi : fonction mathématique qui correspond à la quantité d'information contenue dans la probabilité de collision d'une variable aléatoire

Dans la théorie de l'information, l'entropie permet de quantifier le manque d'information. L'entropie de Rényi est donnée par une fonction mathématique correspondant à la quantité d'information contenue dans la probabilité de collision d'une variable aléatoire. En adaptant la déclaration des variables de la fonction écrite par Rényi (1961), nous obtenons l'expression suivante :

$$H_n = \frac{1}{1-n} \log \sum_{i=1}^s (p_i)^n$$

où n est le nombre d'échelle de gris (256) et $p_i = f_i/N$ où f_i est la valeur de l'échelle de gris de chaque pixel et N correspond au nombre de pixels.

Le développement permettant d'arriver au critère de décision pour choisir la valeur de seuil du threshold a été développée par Kapur, Sahoo et Wong (1985) pour une autre fonction d'entropie. Le lecteur pourra se référer à ce document afin de comprendre le fonctionnement exacte de cette méthode de thresholding.

Annexe se rapportant aux résultats de franchissement (chapitre 5)

TABLE C.1 – *Temps des remontées totales pour les saumons*

Temps des remontées totales [min]								
6	23,6	33	37,6	58	72,7	93,7	218,8	628,9

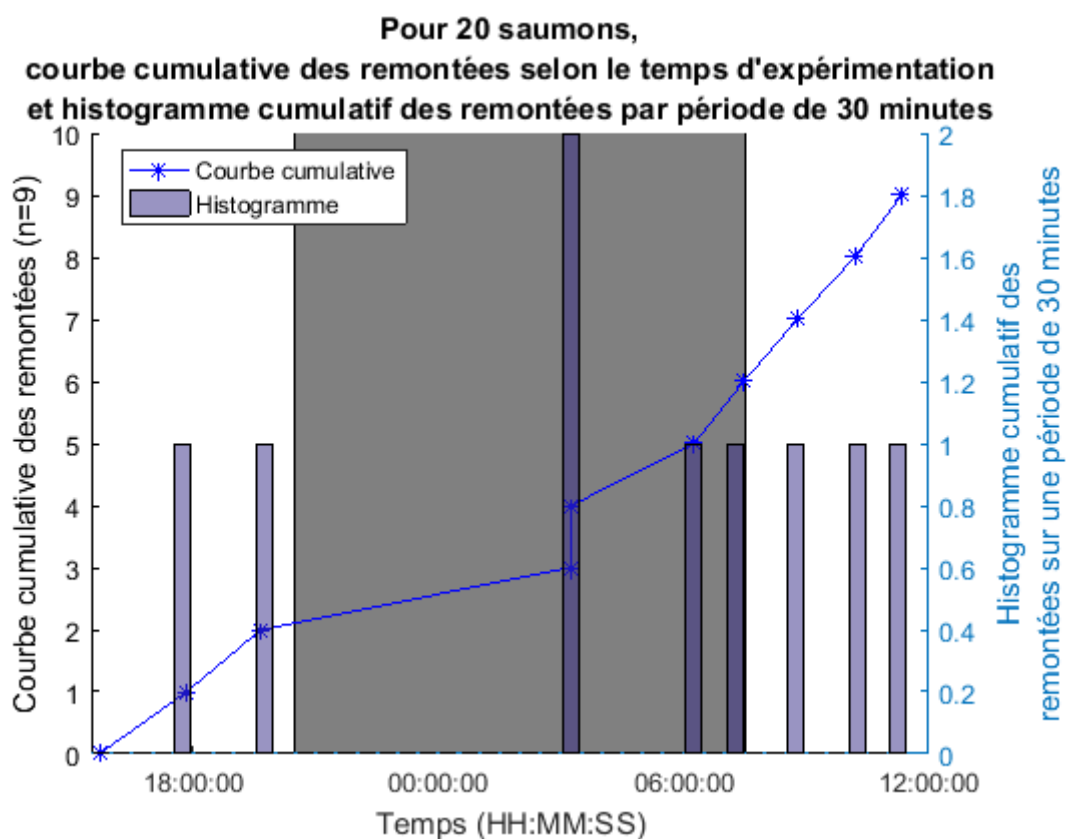


FIGURE C.1 – Figure de la répartition temporelle des remontées des saumons cumulées par pas de temps de 30 minutes et par une courbe cumulative selon le temps

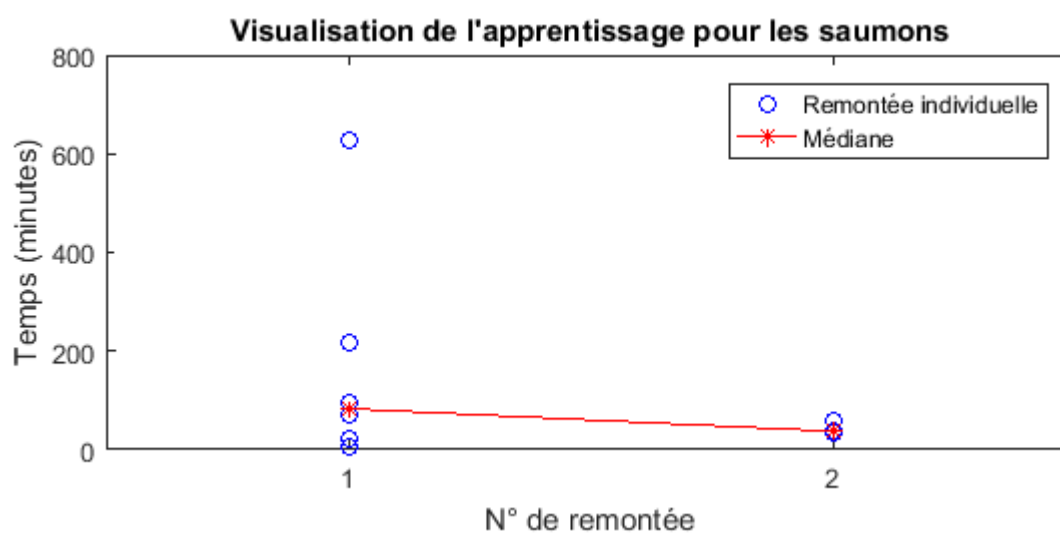


FIGURE C.2 – Visualisation de l'effet des successions des remontées en considérant les résultats de temps de remontées pour les saumons

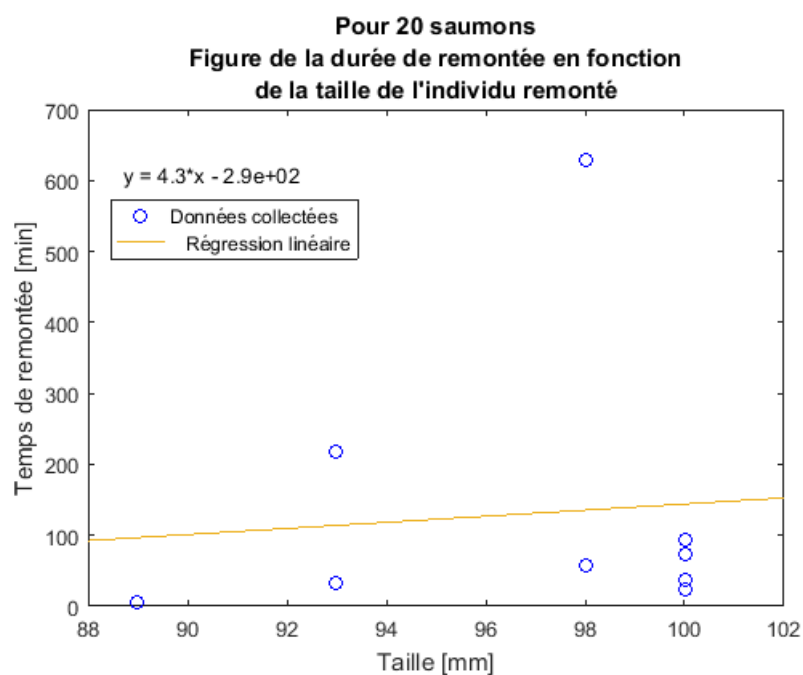


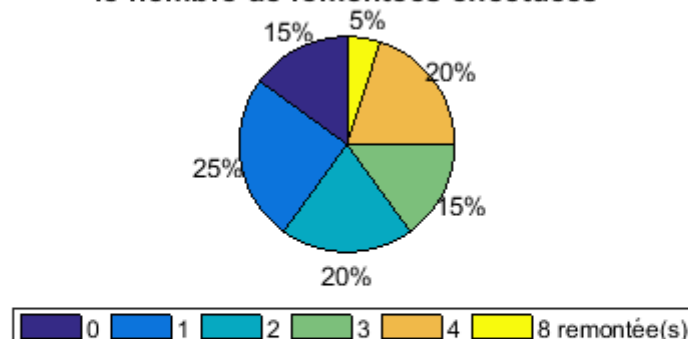
FIGURE C.3 – Figure de la régression linéaire associée aux observations de temps de remontées selon la taille du saumon remonté

TABLE C.2 – Tableau reprenant la quantité d'individu ayant réalisé une certaine quantité de remontées selon chaque lot expérimental pour les chevesnes

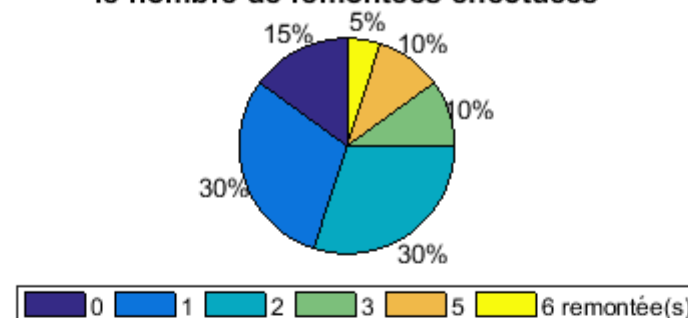
Nombre de remontées réalisées	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	13
Nombre d'individus les ayant réalisées (n=nombre de chevesnes du lot)											
Lot 1 (n=20)	3	5	4	3	4	0	0	0	1	0	0
Lot 2 (n=20)	3	6	6	2	0	2	1	0	0	0	0
Lot 3 (n=20)	5	8	2	2	1	1	0	1	0	0	0
Lot 4 (n=20)	8	5	2	3	1	0	0	1	0	0	0
Lot 5 (n=20)	3	3	2	3	5	2	1	0	0	0	1
Lot 6 (n=20)	3	5	2	5	1	2	0	0	0	0	0

Lot 1 (n=20)

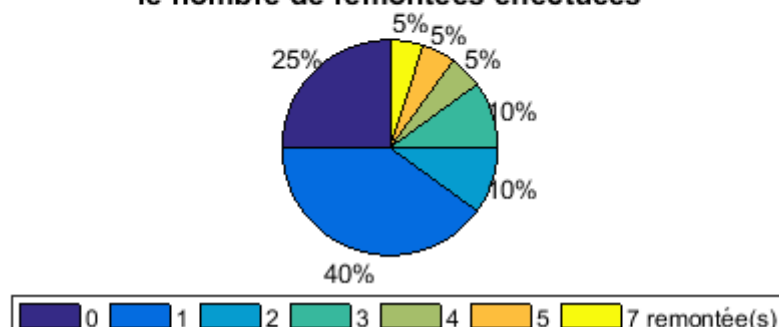
**Proportion de chevesnes regroupées selon
le nombre de remontées effectuées**

**Lot 2 (n=20)**

**Proportion de chevesnes regroupées selon
le nombre de remontées effectuées**

**Lot 3 (n=20)**

**Proportion de chevesnes regroupées selon
le nombre de remontées effectuées**



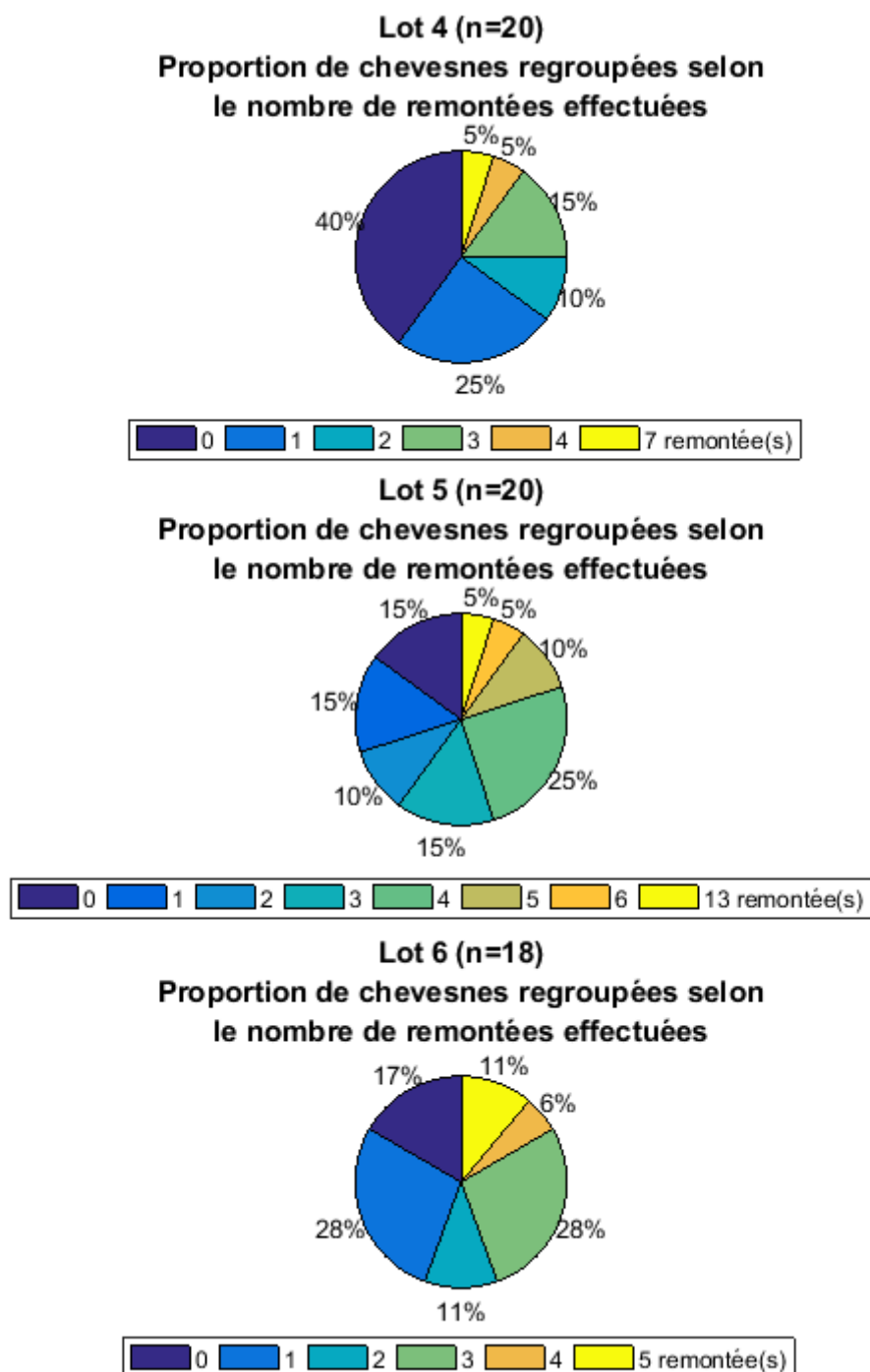


FIGURE C.4 – Diagrammes circulaires de la proportion de chevesnes selon le nombre de remontées réalisées pour chaque lot

TABLE C.3 – Résultats détaillés des indicateurs de remontées pour les 6 lots de chevesnes

Lot (n=nombre d'individus du lot)	Taux de franchissement [%]	Fréquence moyenne de franchissement [remontées/heure]
Lot 1 (n=20)	75	2
Lot 2 (n=20)	70	1,7
Lot 3 (n=20)	75	1,5
Lot 4 (n=20)	60	1,3
Lot 5 (n=20)	85	2,9
Lot 6 (n=18)	83	1,7
Moyenne	75	1,85
Ecart-type	9	0,56
Lot (n=nombre d'individus du lot)	Taux de franchissement par heure [%/heure]	Taux de répétition des remontées [%]
Lot 1 (n=20)	3,3	70
Lot 2 (n=20)	3	65
Lot 3 (n=20)	3,3	47
Lot 4 (n=20)	2,6	58
Lot 5 (n=20)	3,7	82
Lot 6 (n=18)	3,6	70
Moyenne	3,25	65
Ecart-type	0,4	12

TABLE C.4 – Taux de remontées partielles détaillés pour les 6 lots de chevesnes

	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4	Lot 5	Lot 6
Nombre de remontées totales	46	40	34	29	65	38
Nombre de remontées partielles	25	14	18	31	39	18
Taux de remontées partielles [%]	54	35	53	107	60	47
Moyenne des taux [%]	59	Ecart-type des taux [%]			24,84	

TABLE C.5 – Détails des résultats statistiques pour un seuil de 0,05 pour déterminer l'influence de la succession des remontées pour les chevesnes

Comparaison entre	n	Δ_μ [min]	var_Δ [min ²]	t_{obs}	t_{table}
Remontées 1 et 2	61	13,45	8481,81	1,1409	1,671
Remontées 2 et 3	43	5,64	1889,22	0,8509	1,684
Remontées 3 et 4	25	5,41	2330,58	0,5608	2,064

Régression linéaire entre le temps de remontée et la taille

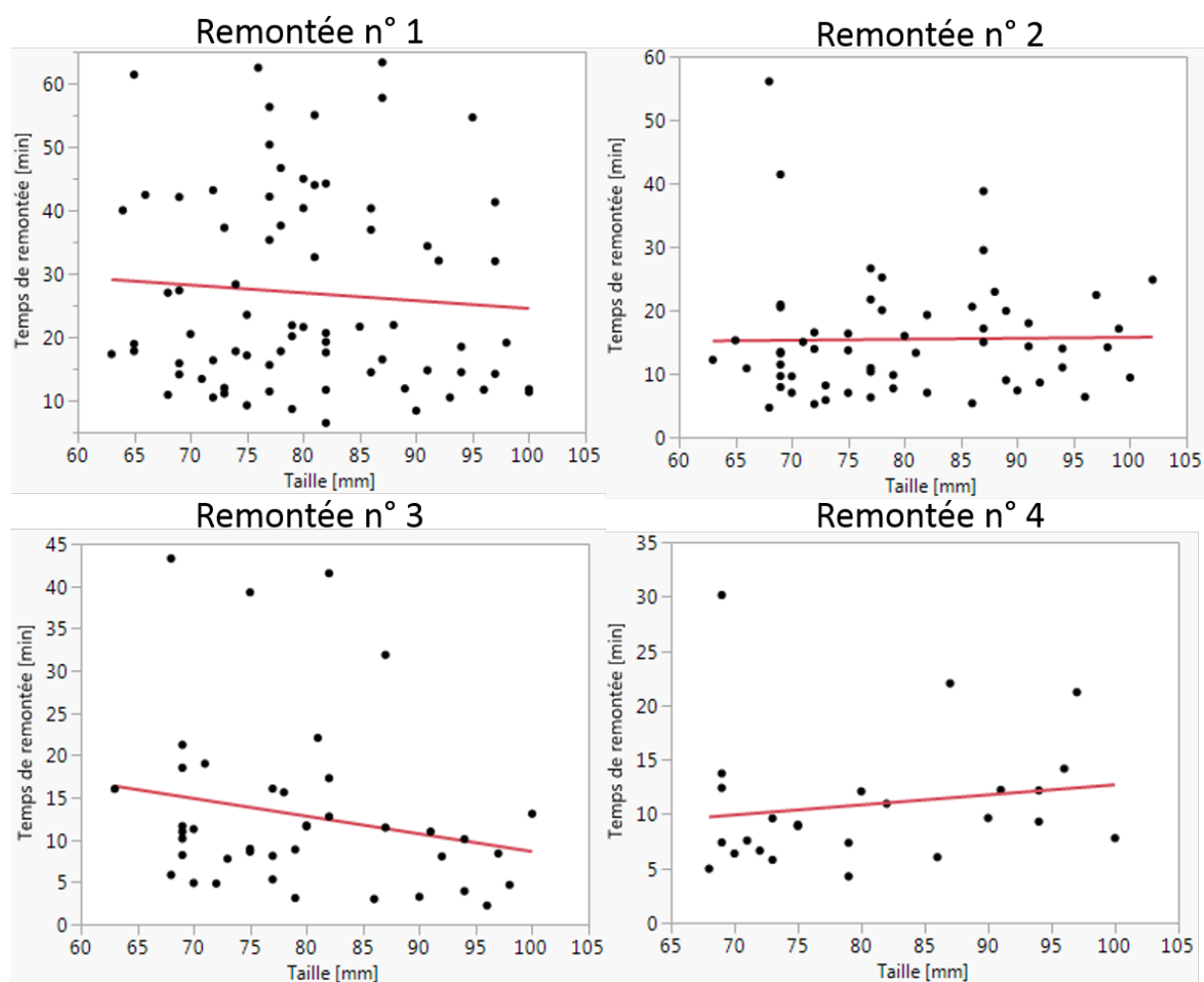


FIGURE C.5 – Régression linéaire entre le temps de remontée et la taille pour chaque numéro de remontée

Régression linéaire entre le temps de remontée et le facteur de condition

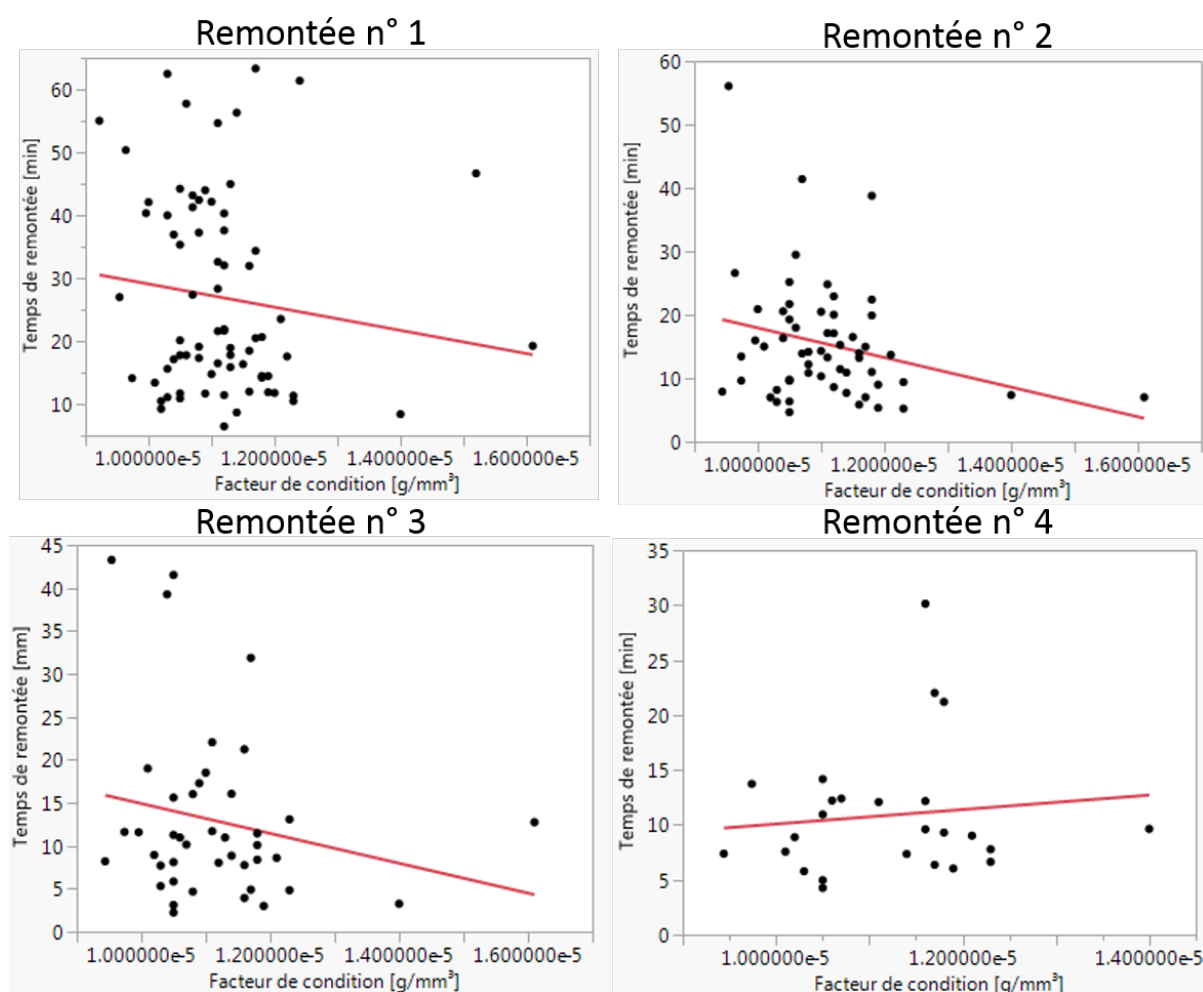


FIGURE C.6 – Régression linéaire entre le temps de remontée et le facteur de condition pour chaque numéro de remontée

Annexe se rapportant aux résultats de comportement (chapitre 6)

D.1 Les ablettes communes (*Alburnus alburnus*)

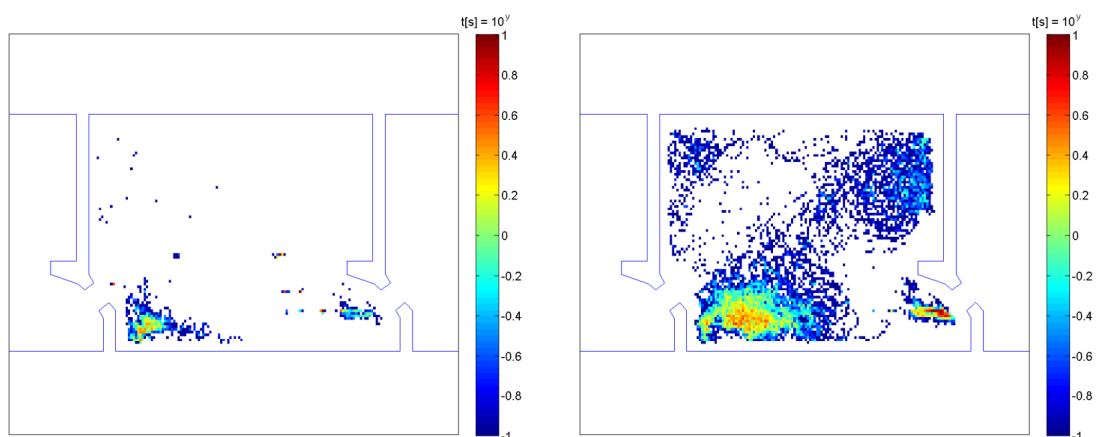


FIGURE D.1 – Densité des présences (temps cumulé de présence) extraits des tests 1 (gauche) et 2 (droite) des ablettes, exprimé en seconde

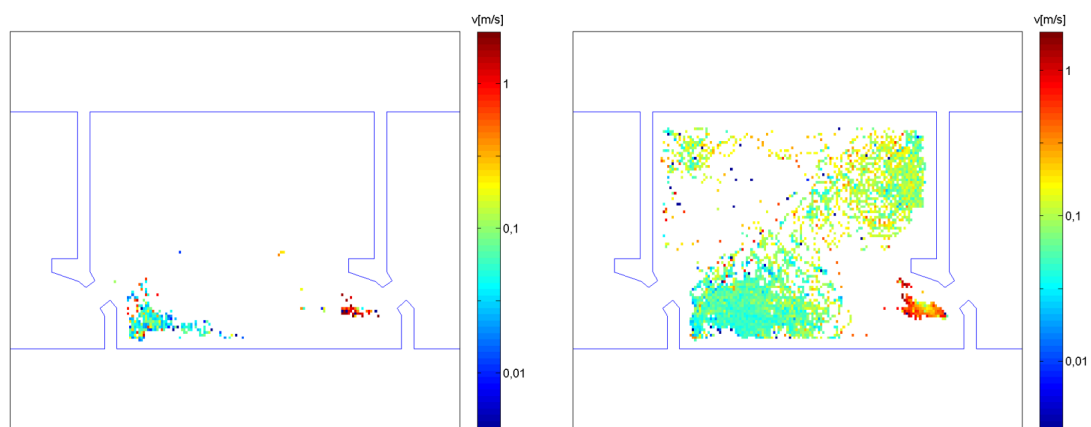


FIGURE D.2 – Moyennes des vitesses extraites des tests 1 (gauche) et 2 (droite) des ablettes, exprimées en m/s

D.2 Les chevaines (*Squalius cephalus*)

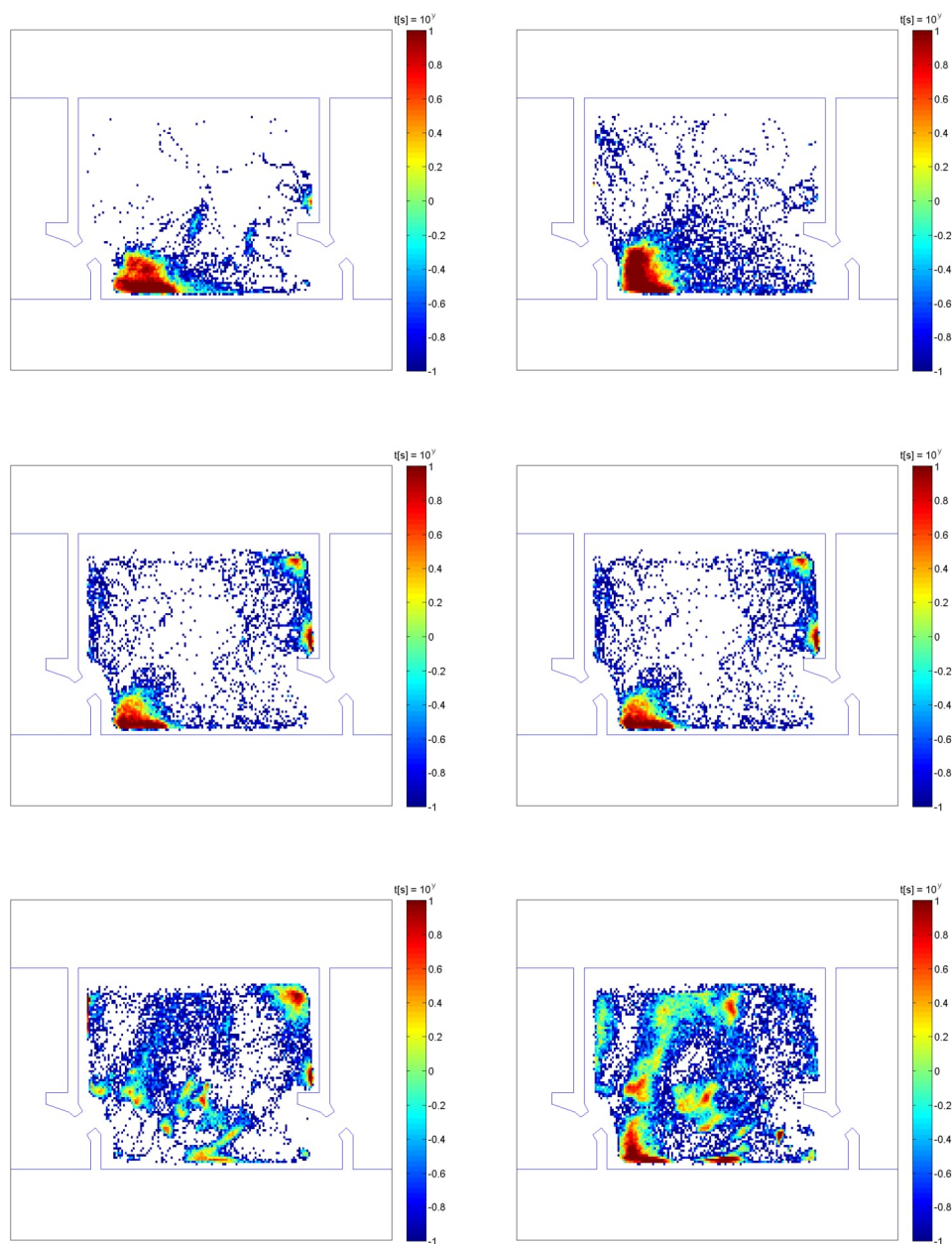


FIGURE D.3 – Densité de présence de chaque lot de chevaines pris séparément, dans le bassin 5, exprimé en secondes

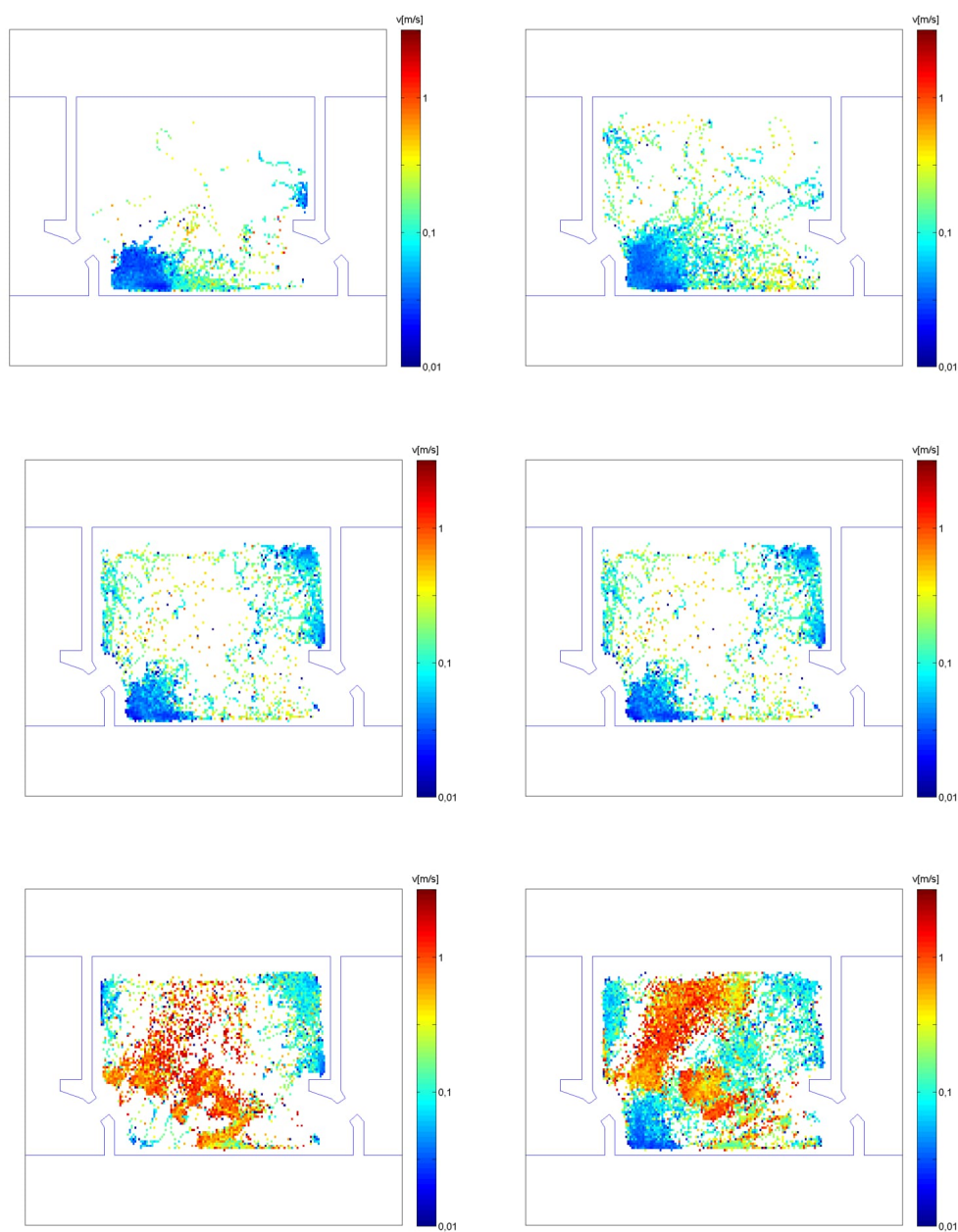


FIGURE D.4 – Moyennes de vitesses de chaque lot de chevaines pris séparément, dans le bassin 5, exprimé en m/s

D.3 Les chabots (*Cottus gobio*)

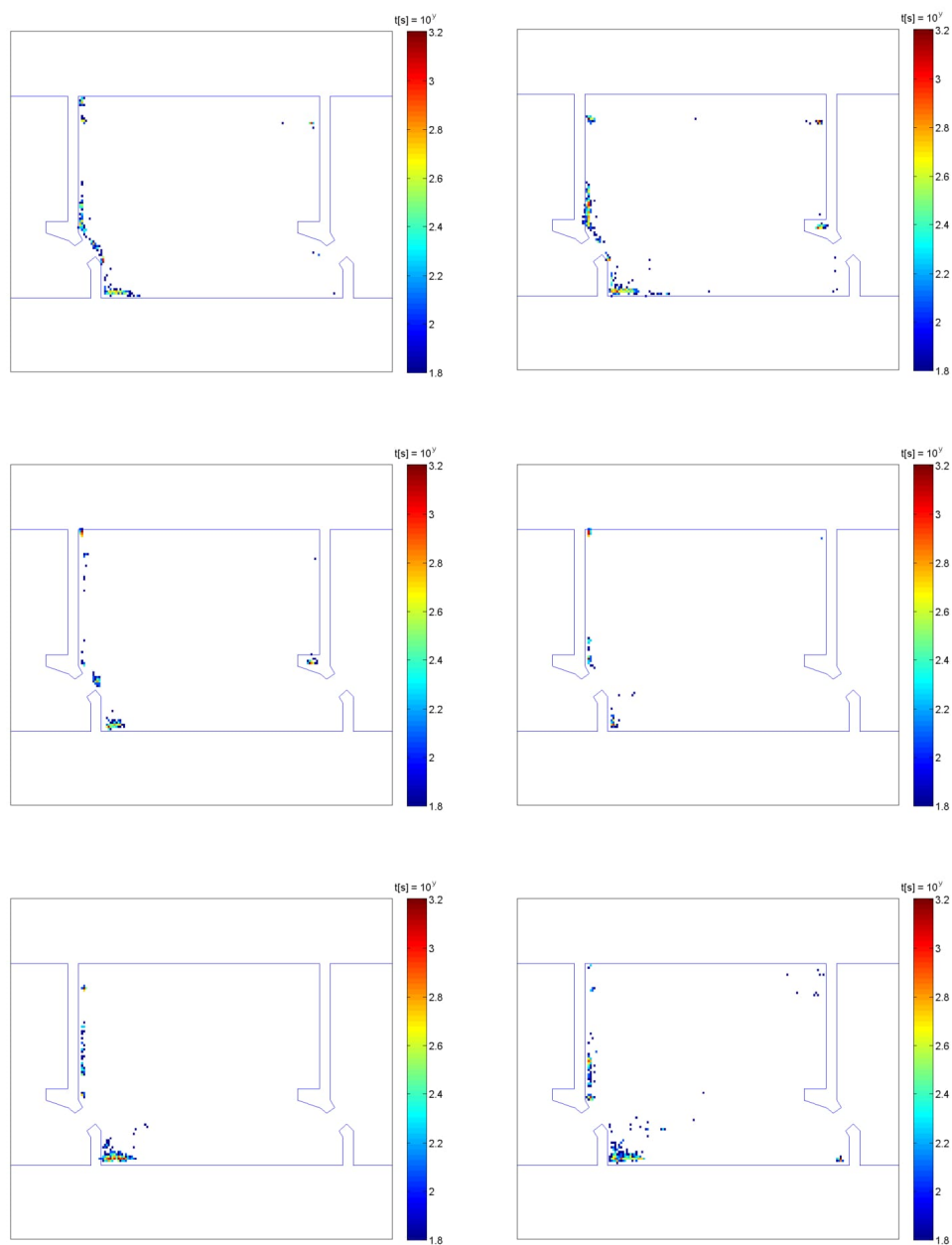


FIGURE D.5 – Densité de présence de chaque lot de chabot pris séparément, exprimé en seconde

Codes *MATLAB* traitant les données RFID

Cette section contient le script *MATLAB* utilisé pour traiter les données RFID récoltées à l'aide du programme *Putty*.

Une liste des matrices d'intérêt est présentée à la fin du traitement RFID

E.1 Évaluation de franchissabilité

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  %E.1.1. Traitement Excel pour obtenir un fichier compatible avec ce script
3  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4
5  %Avant toute chose, il faut traiter les donnees RFID obtenue par Putty sur
6  ...Excel.
7  %1. La colonne I, ctrl+H en ayant tout selectionne et on remplace
8  %les . par des 0.
9  %2. On peut supprimer la premiere colonne A contenant des D et les
10 %colonnes D (00:00:00) et E (format des identifiants).
11 %3. On remplace dans la nouvelle colonne D, les _ par rien
12 %(SI le format des identifiants est en hexadecimale). (ctrl+H)
13 %4. On remplace dans la nouvelle colonne E, les A par rien.(ctrl+H)
14
15 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16 %E.1.2. Traitement des donnees RFID
17 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

18
19 %1. Il faut d'autre part sortir la matrice de dates a partir du fichier
20 %RFID traite et par l'interface MatLab (double clic dessus sur Matlab) qui
21 %sera nommee automatiquement VarName1 (utilisation a la ligne 33)
22 %Et enregistree dans le fichier 'Workspace.mat'.
23 %2. Il faut faire un fichier avec les ID de pit tags nomme ici 'ID_PITTAG'.
24 %3. Les pourcents indiquent la presence de choses a changer par rapport au
25 %nom d'entree des fichiers excel.
26 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
27 %Chargement des donnees
28 clc
29 clear all
30 load('Workspace');%
31 res=xlsread('Lot.xlsx');%
32 formatIn='dd/mm/yyyy';
33 date=datenum(VarName1,formatIn);%
34 date=(date+res(:,1));
35 resultats=[date,res(:,2:4)];
36 ID_PITTAG=xlsread('ID_PITTAG');%
37 accumulation_num=[];
38 save('Workspace');%
39
40 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
41 %E.1.2.1. Isolation des detections pour chaque poisson.
42
43 for z=1:length(ID_PITTAG);
44 num=find(resultats(:,2)==ID_PITTAG(z,1));
45 %La matrice temporaire num va stocker les lignes pour chaque identifiant.
46 accumulation_num=[accumulation_num;num];
47 %La matrice accumulation_num va stocker les lignes extraites afin de voir
48 %par la suite si elles ont toutes ete extraites des donnees.
49 eval(['ID_' num2str(z) '=[resultats(num,:)]');];
50 %Les matrice ID_(z) vont contenir les detections pour chaque poisson.
51
52 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
53 %E.1.2.2. Isolation du passage d'un poisson a une nouvelle antenne.
54
55 ID_replace=eval(['ID_' num2str(z) ' ';'']);
56 %On cree une matrice temporaire ID_replace qui va nous faciliter la tâche
57 %lors de la boucle.

```

```

58 O=[0 0 0 0]; %Necessaire pour respecter les dimensions de la boucle.
59 ID_replace=[0;ID_replace];
60 s=length(ID_replace)-1;
61 newdetect=[];
62 for i=1:s;
63     if ID_replace(i+1,3)~=ID_replace(i,3);
64         %La condition dit que si l'antenne i+1 est differente de l'antenne
65         %i, alors il y a passage et stockage des donnees
66         %dans la matrice temporaire newdetect.
67         newdetect=[newdetect;i+1];
68     else
69         continue
70     end
71 end
72 clear O
73 clear num
74 eval(['passage_' num2str(z) '=ID_replace(newdetect,:);']);
75 %On cree la matrice passage_(z) qui va contenir les passages a une nouvelle
76 %antenne.
77 clear ID_replace
78 clear newdetect
79 end
80
81 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
82 %E.1.2.3. Verification de l'utilisation de l'entierete des lignes utilisables
83
84
85 %Le but ici est d'accumuler les lignes extraites pour chaque ID de pittag
86 ...en une matrice.
87 %Ainsi, en retriand ces lignes par ordre de croissance, on va faire une
88 ...boucle pour cette matrice pour retrouver s'il y a un endroit ou il y a
89 ...un trou et s'il manque une donnee qui serait alors potentiellement
90 ...occupee par un ID errone.
91 %Apres, en etant sûr que cette matrice est
92 ...exempte de toutes donnees erronees, on compare ses dimensions avec la
93 ...matrice des resultats et si elles sont egales, il n'y a pas eu d'erreur.
94
95 accumulation_num_sorted=sort(accumulation_num);
96 %On trie par ordre croissant la matrice contenant les lignes extraites
97 ...par le traitement de donnees.

```

```

98  disturbed_line=[];
99  for k=1:(length(accumulation_num_sorted)-1);
100      if accumulation_num_sorted(k+1,1)~=accumulation_num_sorted(k,1)+1;
101          %Cette condition dit que s'il y a un trou dans les lignes
102          %extraites, on la stocke dans la matrice disturbed_line.
103          disturbed_line=[disturbed_line;k+1];
104      else
105          continue
106      end
107  end
108
109  %La boucle qui suit va ressortir un message d'erreur qui pourra etre
110  %interpreter par l'utilisateur selon ces 3 cas.
111  if length(disturbed_line)~=0
112      %Si il y a des lignes non extraites par le traitement de donnees.
113      if length(res)==length(accumulation_num_sorted)+length(disturbed_line);
114          disp({'Error data but all the usefull data have been used'
115              'Please check the error data matrix disturbed_data to ensure this.'});
116          %Il y a des ID non fonctionnelles mais toutes
117          ...les donnees utiles sont utilisees.
118      else length(res)~=length(accumulation_num_sorted)+length(disturbed_line);
119          disp('Error data. Unfortunately, not all the usefull data have been used.');
```

%Il y a des ID non fonctionnelles, seulement il y a des donnees qui
 %n'ont ni ete integrees dans les matrices separant chaque PITtag et qui
 %n'ont pas ete non plus integrees dans la matrice reprenant les donnees
 %non fonctionnelles.

```

124
125  %On va donc verifier que ce qui sort n'est pas l'ID d'un poisson.
126      usefull_but_not_used=[];
127      for u=1:length(ID_PITTAG)
128          usefull_find=find(ID_PITTAG(u,1)==disturbed_data(:,2));
129      %On cherche ici les donnees qui n'auraient pas ete potentiellement ete
130      %reprises par le traitement de donnees sur base des ID.
131          usefull_but_not_used=[usefull_but_not_used;usefull_find];
132      %Les lignes utiles mais pas utilisees sont integrees dans cette matrice.
133      end
134      if length(usefull_but_not_used)==0
135          disp({'Error data have been checked and there are not'
136              'usefull informations in it'});
137      else length(usefull_but_not_used)~=0
```

```

138         ID_usefull_but_not_used=disturbed_data(usefull_but_not_used,:);
139         disp({'Error data have been checked and there are usefull'
140             'informations in it. Please, check them and make sure'
141             'that the ID in ID_PITTAG.xlsx are correct in comparison'
142             'to the ID in distrubed_data.'});
143 %Il arrive que si ce cas se presente, il y a eu un probleme quant a la
144 %reecriture des ID dans le fichier ID_PITTAG. Il y a alors tellement de
145 %donnees fausses que le script de verification d'erreurs ne s'applique plus
146 %correctement.
147     end
148 end
149 else length(disturbed_line)==0
150 %Il n'y a pas de lignes non extraites.
151     if length(accumulation_num_sorted)==length(res);
152 %Si les dimensions sont les memes, alors il n'y pas d'erreurs.
153         disp('No error data and all the usefull data have been used');
154     else length(accumulation_num_sorted)~=length(res);
155         disp({'Problems in the script : none of the three possibilities is'
156             'respected. Please check the difference between'
157             'length(accumulation_num_sorted) & length(res) compared to'
158             'disturbed ID into the Excel file by filtering the ID column.'});
159 %Si on a ce message d'erreurs, il y a un probleme dans le script car on ne
160 %peut logiquement se retrouver en-dehors des trois cas mentionnes par les
161 %3 messages d'erreurs ci-dessus.
162     end
163 end
164
165 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
166 %E.1.3. Extraction des remontees
167 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
168
169 %Pour des raisons d'organisation des matrices, on renomme les matrices de
170 %detections avec un indice l.
171 for z=1:length(ID_PITTAG);
172     eval(['ID_1_' num2str(z) '= ID_' num2str(z) ';' ]);
173     eval(['clear ID_' num2str(z) ';' ]);
174     eval(['clear passage_' num2str(z) ';' ]);
175 %On supprime les matrices inutiles pour mieux s'y reperer dans le workspace.
176 end
177

```

```

178 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
179 %E.1.3.1. Isolation des remontees a l'antenne amont (A4)
180
181 %On definit par "remontee a l'antenne 4", l'ensemble des detections
182 %s'etalant depuis une derniere detection a l'antenne 1 jusqu'a une premiere
183 %detection a l'antenne 4.
184
185 u=1:length(ID_PITTAG);
186 for x=[1:50];
187 %on choisit le nombre de 50 par default car il semble peu probable qu'il y
188 %ait plus de 10 remontees pour un poisson.
189 %x sera donc le numero de remontees successives.
190     eval(['A4_' num2str(x) '_Individus_remontes=[];']);
191 %A4_(x)_Individus_remontes sera la matrice contenant les individus ayant
192 %execute une x ieme remontee.
193     for z=[(u)];
194 %z est le numero du poisson remonte.
195         eval(['A4_' num2str(x) '_ID_remontee=ID_' num2str(x) '_' num2str(z) ';;']);
196         A4=find(eval(['ID_' num2str(x) '_' num2str(z) '(:,3)==4;']));
197 %On cherche toutes les occurences a l'antenne 4 dans les detections que
198 %l'on stocke dans une matrice temporaire A4.
199
200         if isempty(A4)==0;
201 %Cette condition demande si le poisson est au moins
202 %arrive une fois a l'antenne 4, donc si les dimensions de [antenne4]=0,
203 %la reponse est 1 et inversement. Si la matrice est non nulle, ça veut dire
204 %que cette x ieme remontee a ete realisee.
205 eval(['A4_' num2str(x) '_remontee_reussie_' num2str(z) '=[A4_' num2str(x)
206 .. '_ID_remontee(1:(A4(1,1)),:);']);
207 %Ici, on demande a matlab de conserver toutes les lignes jusqu'a la
208 %premiere detection a l'antenne 4 dans la matrice
209 %A4_(x)_remontee_reussies_z.
210 %Remarquons que pour une deuxieme remontee par exemple, la matrice
211 %de detections a ete rabotee de la premiere remontee et de la deuxieme
212 %devalaison ce qui permet de ne plus prendre en compte ces dernieres.
213         eval(['A4_' num2str(x) '_Individus_remontes=[A4_' num2str(x)
214 .. '_Individus_remontes;z;']);
215 %On stocke le numero des individus qui sont remontes.
216 %Rappelons que le numero correspond a un ID de PITtag car correspondant
217 %a un numero de la ligne de la matrice 'ID_PITTAG'.

```

```

218     else
219         continue
220     end
221 end
222 %Ensuite, on va evaluer la devalaison afin de pouvoir apres isolation de
223 %celle-ci, isoler la remontee x+1 ieme.
224 eval(['A1_' num2str(x) '_Individus_devaies=[];']);
225 eval(['b=A4_' num2str(x) '_Individus_remontes;']);
226 %On va rechercher les individus devales uniquement a partir des individus
227 %remontes en reassignant des nouvelles valeurs a la matrice u.
228 u=(b)';
229 for z=[(u)];
230     size_A4=size(eval(['A4_' num2str(x) '_remontee_reussie_' num2str(z) ';'
231         ..]));
232 %On determine la taille de la matrice comprenant la remontee pour un poisson
233 %afin de considerer les donnees apres la x ieme remontee que l'on ne veut
234 %plus prendre en compte.
235     A=find(eval(['ID_' num2str(x) '_' num2str(z) '(:,3)==1 & ID_' num2str(x)
236         .. '_' num2str(z) '(:,1)>ID_' num2str(x) '_' num2str(z) '(size_A4(1,1),1);'
237         ..]));
238 %Pour la matrice temporaire A, on recherche les detections a l'antenne 1
239 %qui font suite a la x ieme remontee selon le principe de devalaison.
240     if isempty(A)==0;
241 %Si A n'est pas vide, il y a une devalaison et donc potentiellement
242 %montaison x+1 ieme.
243     eval(['ID_' num2str(x+1) '_' num2str(z) '=ID_' num2str(x) '_' num2str(z)
244         .. '(A(1,1):length(ID_' num2str(x) '_' num2str(z) '),:);']);
245 %On recree une matrice ID_(x+1) qui va comprendre les donnees a partir de
246 %la fin de la x ieme devalaison.
247     eval(['A1_' num2str(x) '_Individus_devaies=[A1_' num2str(x)
248         .. '_Individus_devaies,' num2str(z) '];']);
249 %On conserve les numeros des individus ayant devale.
250     else
251         continue
252 %A est vide, l'individu n'est pas devale, il ne peut donc plus y avoir de
253 %remontee par la suite et l'individu est exclu de la boucle.
254     end
255 eval(['u=A1_' num2str(x) '_Individus_devaies;']);
256 %On reenregistre u comme les individus retournes en 1 pour recommencer
257 %la boucle en conservant seulement les individus etant redescendus en 1.

```

```

258 %En reimplémentant u de cette manière, on s'affranchit des individus
259 %ne pouvant plus remonter.
260 end
261 if eval(['isempty(A1_' num2str(x) '_Individus_devaies')==1;']);
262 %Cela a pour but d'arrêter la boucle si le dernier poisson conserve par la
263 %boucle n'est pas redescendu en bas.
264     break
265 else
266     continue
267 end
268 end
269 clc
270
271 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
272 %E.1.3.2. Determination du nombre de remontées par individus
273
274 %On va maintenant faire une matrice contenant le nombre de remontées
275 %totales pour chaque individu.
276 Remontees_reussies_par_individus=zeros(length(ID_PITTAG),1);
277 for k=1:x;
278     for j=eval(['A4_' num2str(k) '_Individus_remontes']);
279 %Chaque numero de poisson etant remonte est utilise pour ajouter une k ieme
280 %remontee et finalement, obtenir une matrice Remontees_reussies_par_individus
281 %qui contiendra le nombre total de remontees pour les n individus.
282         Remontees_reussies_par_individus(j,1)=Remontees_reussies_par_
283         ..individus(j,1)+1;
284     end
285 end
286 max_remontee=max(Remontees_reussies_par_individus);
287 %On cherche le nombre maximum de remontées individuelles.
288 Remontees_reussies_cumulees=zeros(max_remontee,1);
289 for k=1:max_remontee;
290 %On cumule tout les individus pour le nombre maximal de remontées.
291     for i=0:(max_remontee-1)
292         if Remontees_reussies_par_individus(k,1)==i;
293 %Si l'individu a fait i remontee, on va rajouter 1 a la i+1 ieme ligne de
294 %la matrice Remontees_reussies_cumulees. Ainsi, la premiere ligne de cette
295 %matrice sera alors le nombre d'individus ayant realise 0 remontee.
296         Remontees_reussies_cumulees(i+1,1)=Remontees_reussies_cumulees(i+1,1
297         ..)+1;

```

```

298     else
299         continue
300     end
301 end
302 end
303 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
304 %E.1.4. Calcul des temps de remontees
305 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
306
307 if isempty(eval(['A4_' num2str(x) '_Individus_remontes']))==0;
308 %Si la derniere matrice contenant les individus n'est pas vide, c'est que
309 %les remontees se sont bien arretees a la x ieme remontee car le(s)
310 %dernier(s) individu(s) remontes n'a(ont) pas devale.
311 a=x;%On change le nom de x qui est le nombre maximal de remontees realisees.
312 %Pour la premiere boucle, nous allons determiner le temps de remontee
313 %depuis la derniere detection a l'antenne 1 jusqu'a la premiere detection a
314 %l'antenne 4. Nous allons aussi detecter le temps de qu'a mis le poisson
315 %avant de commencer sa montaison.
316 elseif isempty(eval(['A4_' num2str(x) '_Individus_remontes']))==1;
317 %Si aucun individu n'est remonte a la derniere session de remontee
318 %consideree par le script, c'est que la derniere
319 %matrice contenant les individus remontes est vide. Cela decoule du fait
320 %que le(s) dernier(s) individu(s) a etre remonte(s) a devale mais n'est (ne
321 %sont) plus remonte(s) par la suite.
322     a=x-1;
323 %Par consequent, on peut retirer 1 a la valeur de x pour ne considerer que
324 %les remontees reellement realisees.
325 end
326 for x=1:a;
327     A4_individus_remontes=eval(['A4_' num2str(x) '_Individus_remontes']);
328 %On met dans la matrice temporaire A4_individus_remontes les numeros des
329 %individus ayant fait une x-ieme montee.
330     eval(['T_' num2str(x) '=[];']);
331     for z=(A4_individus_remontes)';
332 %On fait les operations de la boucle pour chaque poisson qui doit etre
333 %considere pour avoir effectuer cette x-ieme remontee.
334         A4_remontee_replace=eval(['A4_' num2str(x) '_remontee_reussie_'
335             .. num2str(z) ';'']);
336 %Ici, on va simplement remplacer la matrice temporaire
337 %A4_remontee_reussie_(z) pour ne plus dependre de z qui est une variable et

```

```

338 %non un string.
339     A1_detection_lines=find(A4_remontee_replace(:,3)==1);
340 %On cherche les lignes pour lesquels A1 est detecte.
341     size_A1_detection_lines=size(A1_detection_lines);
342 %On determine la taille de A1_detection_lines pour prendre sa derniere
343 %valeur qui est la valeur de la derniere detection.
344     Last_A1=A4_remontee_replace(A1_detection_lines(size_A1_detection_lines(
345         ..1,1)),:);
346 %On determine la derniere detection en A1 qui sera le debut de la remontee.
347     eval(['S=size(A4_' num2str(x) '_remontee_reussie_' num2str(z) ');'])
348     diff=A4_remontee_replace(S(1,1),1)-Last_A1(1,1);
349 %On soustrait la valeur de temps de la derniere ligne de
350 %A4_(x)_remontee_reussie_(z) (premiere detection en A4) connaissant la taille
351 % (S) de cette matrice et de la premiere ligne (derniere detection en A1).
352     T_add_data=[z,diff];
353     %On relie le numero du poisson avec son temps de montee.
354     eval(['T_' num2str(x) '=[T_' num2str(x) ';T_add_data;']]);
355 %On incorpore tout dans une matrice T.
356 %On va maintenant determiner le temps mis avant d'entamer une montaison et
357 %qui se commencera soit a partir du debut de l'experience, soit a partir de
358 %la fin de la devalaison.
359     eval(['Temps_delimites_' num2str(x) '_' num2str(z) '=[;]'])
360     eval(['Temps_delimites_' num2str(x) '_' num2str(z) '=[Temps_delimites_'
361 .. num2str(x) '_' num2str(z) '; Last_A1(1,1); A4_remontee_replace(S(1,1),1)
362 ..];'])
363     if x==1;
364 %Il faut faire une condition pour x=1 car il faut prendre le debut de
365 %l'experience (on considerera le debut comme etant la premiere detection).
366     eval(['Temps_attente_' num2str(x) '_' num2str(z) '=Last_A1(1,1)-
367         ..date(1,1);'])
368 %date(1,1) contient la donnee temporelle de la premiere detection.
369     else
370     eval(['Temps_attente_' num2str(x) '_' num2str(z) '=(Last_A1(1,1)-ID_'
371 .. num2str(x) '_' num2str(z) '(1,1));'])
372     end
373 end
374
375 %Pour les temps de montaisons,
376 eval(['T_min_Lot1_' num2str(x) '=[T_' num2str(x) '(:,1),T_' num2str(x)
377 .. '(:,2)/(1/1440)];'])

```

```

378 %On convertit en minutes (1 jour = 1 en langage MatLab, 1 minute =
379 %1/14400). On obtient donc des temps en minutes.
380 eval(['Mean_time_' num2str(x) '=mean(T_' num2str(x) '(:,2));']);
381 %On fait une moyenne.
382 end
383 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
384 %E.1.5. Quantification des anomalies de franchissement
385 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
386
387 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
388 %E.1.5.1. Quantification des sauts d'antenne
389
390 %Dans cette partie, nous allons quantifier le nombre d'anomalies.
391 %Pour ce faire, nous allons regarder successivement le passage d'une
392 %antenne a une autre et verifier qu'il n'y ait pas un saut au niveau des
393 %antennes en devalaison et en montaison. Autrement dit, une anomalie c'est
394 %lorsque le poisson ne passe de l'antenne 1 a l'antenne 3 par exemple.
395 %Pour cela, on peut utiliser les matrices passage_(z) qui ont ete
396 %determinees durant le traitement de donnees.
397 clear all
398 run('traitement_RFID_chevesnes_lot1.m');%%
399 close all
400 clc
401 lignes_anomalies=[];
402 Nombre_anomalies=[];
403 for z=1:length(ID_PITTAG);
404     lignes_anomalies=[];
405     ID_replace=eval(['ID_' num2str(z)]);
406     for j=(1:length(ID_replace)-1);
407         if ID_replace(j+1,3)==ID_replace(j,3)+1;
408 %Si le numero d'antenne augmente de 1, il n'y a pas d'anomalie.
409             continue
410         elseif ID_replace(j+1,3)==ID_replace(j,3)-1;
411 %Si le numero d'antenne diminue de 1, il n'y a pas d'anomalie.
412             continue
413         elseif ID_replace(j+1,3)==ID_replace(j,3)
414 %Si le numero est le meme, il n'y a pas de passage.
415             else
416                 lignes_anomalies=[lignes_anomalies;j;j+1];
417 %On accumule dans une matrice les lignes ou il y a saut d'antenne.

```

```

418         end
419     end
420     if isempty(lignes_anomalies)==0;
421         eval(['lignes_anomalies_' num2str(z) '=[lignes_anomalies]']);
422         Nombre_anomalies=[Nombre_anomalies;z];
423     else
424         continue
425     end
426     clc
427 end
428
429 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
430 %E.1.5.2. Quantification des anomalies sur base des durees de passage
431
432 %On peut aussi prendre un critere de temps pour evaluer le type d'anomalie,
433 %si c'est super rapide, on considere que ce n'est pas une devalaison ni une
434 %montaison, la donnee est inutilisable (bug magnetique).
435 %S'l y a par contre beaucoup de temps qui se passe entre les deux
436 %detections et/ou que l'individu a ete detecte de nombreuses autres
437 %fois a l'antenne 1 et a l'antenne 4 par exemple, on peut considerer que
438 %cette donnee est recevable. Il faudra alors retracer cela dans les
439 %matrices ID_(z).
440 %Tout d'abord, il faut verifier si ces erreurs sont des bugs magnetiques ou
441 % si elles sont des manquements de detection.
442 for a=(Nombre_anomalies)';
443     eval(['Donnees_anomalies_' num2str(a) '=[ID_' num2str(a)
444 .. '(lignes_anomalies_' num2str(a) '(:,1),:)]']);
445 end
446 clc
447 if isempty(Nombre_anomalies)==0;
448     display('There is at least one passage anomaly.')
449 else
450     display('There is no passage anomaly.')
451 end
452
453 %On va d'abord verifier les anomalies dans la matrice passage sur base des
454 %temps de detection.
455 for x=1:(length(ID_PITTAG));
456     eval(['Time_anomalies_' num2str(x) '=[];'])
457     for i=eval(['1:(length(passage_' num2str(x) ')-1)']);

```

```

458         if eval(['(passage_' num2str(x) '(i+1,1)-passage_' num2str(x)
459 .. '(i,1))<=(5*1.1574e-05);'])
460 %On cherche les transitions d'antenne qui se font avec moins de 5 secondes.
461         eval(['Time_anomalies=[passage_' num2str(x) '(i,:); passage_'
462 .. num2str(x) '(i+1,:);]'])
463         eval(['Time_anomalies_' num2str(x) '=[Time_anomalies_' num2str(x)
464 .. '; Time_anomalies];'])
465 %Toutes les transitions d'antenne en moins de 5 secondes sont stockees
466 %par deux lignes dans la matrice Time_anomalies_(x).
467         else
468             continue
469         end
470     end
471 end
472 clc
473 for x=1:(length(ID_PITTAG));
474     eval(['A=size(Time_anomalies_' num2str(x) ');'])
475 %On calcule la taille de la matrice anomalie pour trier les cas de figure
476 %dans le traitement.
477     if A(1,1)>2;%Premier cas, la taille de la matrice est plus grande que 2.
478         eval(['Time_anomalies_corrected_' num2str(x) '=[];'])
479 %On cree la matrice vide qui reprendra les donnees cherchees.
480         for i=1:2:A(1,1);
481 %On implemente un pas de 2 qui permettra de traiter separement chaque couple.
482             eval(['B=find((Time_anomalies_' num2str(x) '(i,3)+Time_anomalies_'
483 .. num2str(x) '(i+1,3))>3);'])
484 %Si la somme des numeros d'antenne d'un couple est superieure a 3,
485 %on ne se trouve pas dans un cas de figure ou il y a passage de 1 a 2 ou 2 a 1.
486             if B==1;
487                 eval(['Time_anomalies_corrected_' num2str(x)
488 .. '=[Time_anomalies_corrected_' num2str(x) '; Time_anomalies_' num2str(x)
489 .. '(i,:); Time_anomalies_' num2str(x) '(i+1,:);]']);
490 %On concatene les donnees respectant la condition si dessus.
491             end
492         end
493         if eval(['isempty(Time_anomalies_corrected_' num2str(x) ')==1;'])
494             eval(['clear Time_anomalies_corrected_' num2str(x) ])
495             %Si la matrice est vide, on la supprime pour plus de clarte.
496         end
497     elseif A(1,1)==2;

```

```

498 %On refait la meme chose pour une matrice de dimension 2 etant donne que
499 %le pas de temps de 2 n'est pas applicable pour ce cas de figure.
500     eval(['Time_anomalies_corrected_' num2str(x) '=[;']])
501     for i=1;
502         eval(['B=find((Time_anomalies_' num2str(x) ' (i,3)+Time_anomalies_'
503 .. num2str(x) ' (i+1,3))>3);']);
504         if B==1;
505             eval(['Time_anomalies_corrected_' num2str(x) '=[Time_anomalies_'
506 .. corrected_' num2str(x) '; Time_anomalies_' num2str(x) ' (i,:);
507 ..Time_anomalies_' num2str(x) ' (i+1,:)];']);
508         end
509         if eval(['isempty(Time_anomalies_corrected_' num2str(x) ')==1;'])
510             eval(['clear Time_anomalies_corrected_' num2str(x) ';'])
511         end
512     end
513 end
514 end
515 for x=[1:length(ID_PITTAG)]
516     if isempty(eval(['Time_anomalies_' num2str(x)]))==0;
517         eval(['A4_lines_time_anomalies_' num2str(x) '=find(Time_anomalies_'
518 ..num2str(x) ' (:,3)==4);'])
519     else
520         continue
521     end
522     if isempty(eval(['A4_lines_time_anomalies_' num2str(x)]))==1;
523         eval(['clear A4_lines_time_anomalies_' num2str(x)])
524     else
525         continue
526     end
527 end

```

Matrices d'intérêt

Traitement des données RFID

1. resultats (? x 4) : matrice contenant successivement par colonnes :
 - les données temporelles en langage *MATLAB* (temps+date sommé),
 - l'identifiant du poisson détecté,
 - le numéro de l'antenne de détection,
 - Le temps de détection.
2. ID_PITTAG (n x 1) : contient la liste des identifiants PITTAG des n poissons utilisés.

On va l'utiliser pour nommer

3. `accumulation_num` (? x 1) : contient les numéros des lignes extraites par le script vers les matrices `ID_(n)`. Elle ne contient donc pas les lignes non utilisées.
4. `ID_(n)` (? x 4) : contient les lignes où il y a eu détection du poisson n.
5. `passage_(n)` : contient les lignes où il y a eu détection à une nouvelle antenne.

3. Extraction des remontées

1. `A4_(z)_Individus_remontes` : numéros des individus remontés une z ième fois à l'antenne 4.
2. `A4_(z)_remontee_reussie_(n)` : matrice contenant les détections après la dernière détection en A1 (antenne la plus en aval) jusqu'à la première détection en A4 (la plus en amont) concernant la z ième remontée et le n ième poisson.
3. `ID_(z+1)_(n)` : Pour le n ième poisson, on détermine la matrice après avoir supprimé les lignes à la fin de la z ième remontée. Cette matrice peu utile est surtout utilisée pour déterminer une dévalaison suivante.
4. `A1_(z)_individus_devalais` : matrice reprenant les individus ayant dévalé une z ième fois.
5. `Remontees_reussies_par_individus` (n x 1) : matrice synthétique reprenant le nombre de remontées réalisées pour un individu selon le nombre n de lignes de la matrice.
6. `Remontees_reussies_cumulees` (i x 1) : matrice synthétique contenant à la i ème ligne le nombre d'individus ayant réussi la i ème remontée (i=[0, nombre maximum de remontées réalisées])

4. Calcul des temps de remontées

1. `T_(z)` : contient les temps de remontées des poissons ayant réalisé une z ième remontée en langage *MATLAB*.
2. `Temps_delimites_(z)_(n)` (2 x 1) : contient le début de la remontée et la fin de la remontée en temps (langage *MATLAB*) pour la z ième remontée et le n ième poisson.
3. `T_min_(z)` : même principe que la matrice `T_(z)` mais une conversion en minutes a été réalisée.
4. `Mean_time_(z)` : contient le temps de remontée moyen pour la z ième remontée.

E.2 Évaluation de l'efficacité du débit d'attrait

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  %Pour l'antenne 4
3  clear all
4  run('Attraction_flow.m'); %%
5  close all

```

```

6  clc
7
8  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
9  %Pour des raisons d'organisation des matrices, on renomme les matrices de
10 %détections avec un indice 1.
11 for z=1:length(ID_PITTAG);
12     eval(['ID_1_' num2str(z) '= ID_' num2str(z) ';'']);
13     eval(['clear ID_' num2str(z) ';'']);
14     eval(['clear passage_' num2str(z) ';'']);
15 %On supprime les matrices inutiles pour mieux s'y repérer dans le workspace.
16 end
17 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18 %E.2.1.Extraction des entrées dans la passe (à l'antenne 3)
19 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
20
21 u=1:length(ID_PITTAG);
22 tentatives=resultats;
23 for x=[1:50];%on choisit le nombre de 50 par défaut car il semble peu
24 %probable qu'il y ait plus de 10 remontées sur 4 jours.
25     eval(['A3_' num2str(x) '_Individus_remontes=[];']);
26     for z=[u];
27         eval(['A3_' num2str(x) '_ID_remontee=ID_' num2str(x) '_' num2str(z) ';'
28             '..]);
29         A3=find(eval(['ID_' num2str(x) '_' num2str(z) '(:,3)==3;']));
30 %On cherche toutes les occurences à l'antenne 3
31         if isempty(A3)==0;%on demande si le poisson est au moins arrivé une
32 %fois à l'antenne 3, donc si les dimensions de [antenne3]=0,
33 %la réponse est 1 et inversement.
34             eval(['A3_' num2str(x) '_remontee_reussie_' num2str(z) '=[A3_' num2
35                 '..str(x) '_ID_remontee(1:(A3(1,1)),:);']);
36 %Ici, on demande à matlab de conserver toutes les lignes avant et à la
37 %première détection à l'antenne 3.
38             eval(['A3_' num2str(x) '_Individus_remontes=[A3_' num2str(x)
39                 '..'_Individus_remontes;z;'];']);%On stocke le numéro des individus
40 %qui sont remontés
41             eval(['Lot1_' num2str(x) '_individus_remontes=A3_' num2str(x)
42                 '..'_Individus_remontes;']);
43             eval(['find_rejet=find(A3_' num2str(x) '_remontee_reussie_'
44                 '..num2str(z) '==1;')]);
45             size_find_rejet=size(find_rejet);

```

```

46         if isempty(find_rejet)==0
47             A=find_rejet(size_find_rejet,:);
48             eval(['A_find=find(A3_' num2str(x) '_remontee_reussie_' num2str(z)
49                 ..'(:,1)>=A(1,1));'])
50             eval(['rejet=A3_' num2str(x) '_remontee_reussie_' num2str(z)
51                 ..' (A_find,:);'])
52             size_rejet=size(rejet);
53             for i=1:size_rejet(1,1);
54                 data_rejet=find(tentatives==rejet(i,1));
55                 tentatives(data_rejet,:)=NaN;
56             end
57             else continue
58             end
59         else
60             continue
61         end
62     end
63
64     eval(['A1_' num2str(x) '_Individus_devalues=[];']);
65     eval(['b=A3_' num2str(x) '_Individus_remontes;']);
66     u=(b)';
67     for z=[(u)];
68         size_A3=size(eval(['A3_' num2str(x) '_remontee_reussie_' num2str(z) ';'
69             ..]));%On détermine la taille de la matrice comprenant la remontée pour un
70             %poisson.
71         A=find(eval(['ID_' num2str(x) '_' num2str(z) '(:,3)
72             ..==1 & ID_' num2str(x)
73             .. '_' num2str(z) '(:,1)>ID_' num2str(x) '_' num2str(z)
74             ..' (size_A3(1,1),1);']));
75         %Ici, on recherche les détections à l'antenne 1 en excluant les détections
76         %détections à l'antenne 1 avant la première détection à l'antenne 3 selon le
77         %moment de détection.
78         size_A=size(A);
79         if isempty(A)==0;
80             eval(['ID_' num2str(x+1) '_' num2str(z) '=ID_' num2str(x) '_'
81             .. num2str(z) ' (A(1,1):length(ID_' num2str(x) '_' num2str(z) '),:);']);
82             eval(['A1_' num2str(x) '_Individus_devalues=[A1_' num2str(x) '_Individus
83             .. _devalues,' num2str(z) '];']);
84             eval(['rejet=ID_' num2str(x) '_' num2str(z) ' (1:size_A,:);'])
85             size_rejet=size(rejet);

```

```

86     for i=1:size_rejet(1,1)
87         rejet_find=find(tentatives(:,1)==rejet(i,1));
88         tentatives(rejet_find,:)=NaN;
89     end
90     else
91         continue
92     end
93     eval(['u=A1_' num2str(x) '_Individus_devaies;']);%On réenregistre u comme
94     %les individus retournés en 1 pour recommencer la boucle avec les individus
95     %étant redescendus en 1.
96 end
97 if eval(['isempty(A1_' num2str(x) '_Individus_devaies)==1;']);
98     %cela a pour but d'arrêter la boucle si le dernier poisson
99     %n'est pas redescendu en bas.
100     break
101 else
102     continue
103 end
104 end
105 clc
106
107 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
108 %E.2.2.Détermination des tentatives d'entrée
109 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
110
111 tentatives_debit_attrait=tentatives(find(tentatives(:,3)==1),:);
112 tentatives_entree=tentatives(find(tentatives(:,3)==2),:);
113 for i=1:(length(tentatives_debit_attrait)-1)
114     if tentatives_debit_attrait(i,1)-(tentatives_debit_attrait(i+1,1))<=
115     ..(0.0208335/360) && tentatives_debit_attrait(i,2)==
116     ..tentatives_debit_attrait(i+1,2);
117         tentatives_debit_attrait(i,:)=NaN;
118     else continue
119     end
120 end
121 for i=1:(length(tentatives_entree)-1)
122     if tentatives_entree(i,1)-(tentatives_entree(i+1,1))<=(0.0208335/360)
123     ..&& tentatives_entree(i,2)==tentatives_entree(i+1,2);
124         tentatives_entree(i,:)=NaN;
125     else continue

```

```
126     end
127 end
128 %Suppression des NaN
129 tentatives_debit_attrait_reelles=find(tentatives_debit_attrait(:,1)>=0);
130 tentatives_entree_reelles=find(tentatives_entree(:,1)>=0);
131 clc
```

ANNEXE F

Code *ImageJ* traitant les images

```

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_cam1_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 unnecesary 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 processer
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 //                               Safe 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 + "Insert 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 */

```

Codes *MATLAB* traitant les images

G.1 Élimination des erreurs de détection

```
1 clear all
2
3 % Code de nettoyage de la matrice
4 % Sortie : matrice complete avec un minimum de bulles "final_fish"
5 %          matrice avec uniquement les détections uniques
6 %          "one_fish_input_v4"
7
8 tic
9
10 %% Importation du fichier Excel de départ
11 input=xlsread('Resultats_mod_lot6.xlsx',1);
12
13 % Définition des variables
14 length_input = length(input(:,1));      % Longueur vecteur input
15 %area = input(:,3);                    % Vecteur area
16 label = input(:,2);                    % Vecteur label
17 %MaxArea = max(area);                  % Valeur max de la colonne area
18
19 %% PART 1.  CREATION DE MATRICE SANS BULLES ISOLEES - fish_input
20
21
22
```

```
23
24 % Régler les paramètres statistiques de détection
25 nbr_images_analysees = 100;
26 nbr_de_detections_requises = 75;
27
28
29
30
31 %% Création d'une matrice "matr_first_detection" indiquant le
32 % nombre de détections pour chaque image
33 % et ne reprennant que la première détection de chaque image
34
35 n = 1; i = 1; % Initialisation des compteurs
36 nbr_detection = 1; % Variable qui compte le nbre de détection/image
37 matr_first_detection = zeros(length_input,12); %Initialisation
38
39
40 while n < length_input-1
41     m = n;
42     while label(m) == label(m+1)
43         nbr_detection = nbr_detection + 1;
44         m = m + 1;
45     end
46     matr_first_detection(i,1:11) = input(n,:);
47     matr_first_detection(i,12) = nbr_detection;
48     i = i + 1;
49     n = n + nbr_detection;
50     nbr_detection = 1;
51 end
52
53 % Ajuster la taille de la matrice "matr_first_detection"
54 i_last = find(matr_first_detection(:,1),1,'last');
55 matr_first_detection = matr_first_detection(1:i_last,:);
56
57 % Matrice ne reprenant que le label et le nombre de détection (colonne12)
58 detection_count = [matr_first_detection(:,2) matr_first_detection(:,2)];
59
60 %% Détection de poisson
61 % Dans la matrice qui ne contient que les premières détections, repérer
62 % lorsqu'il y a plusieurs détections successives
```

```
63
64 images_nbr = nbr_images_analysees;
65 detection_nbr = nbr_de_detections_requises;
66 label_first_detec = matr_first_detection(:,2);
67 fish_detection = zeros(size(label_first_detec));      % Initialisation
68
69 j = 1; max_plus = 0;
70 for i = 1:(length(label_first_detec)-(detection_nbr-1))
71     if label_first_detec(i+detection_nbr-1) < label_first_detec(i)+images_nbr
72         fish_detection(j) = label_first_detec(i);
73         max_plus = label_first_detec(i);
74         j=j+1;
75     else
76         if label_first_detec(i) < max_plus + images_nbr
77             fish_detection(j) = label_first_detec(i);
78             j=j+1;
79         end
80     end
81 end
82
83 % Ajuster la taille du vecteur "fish_detection"
84 i_last = find(fish_detection,1,'last');
85 fish_detection = fish_detection(1:i_last);
86
87 % Impression du fish_detection (enlever le point virgule)
88 fish_detection;
89
90 % Conclusion: le vecteur fish_detection contient uniquement les labels qui
91 % sont probablement des poissons, en ayant retiré les bulles isolées.
92 % Note: il manque les labels des "detection_nbr" dernières détections
93
94 %% Supprimer les lignes de bulles isolées de la matrice générale input
95 % Matrice de base: input, avec sa colonne 2 de labels
96 % Matrice de comparaison : fish_detection
97
98 fish_input_vector = zeros(size(label));
99 for i=1:length(fish_detection)
100     find_label = (label == fish_detection(i));
101     fish_input_vector = fish_input_vector + find_label;
102 end
```

```
103
104 fish_input = input;
105
106 for i=length(fish_input_vector):-1:1
107     if fish_input_vector(i)==0
108         fish_input(i,:)=[];
109     end
110 end
111
112 % Conclusion : la matrice "fish_input" ne contient plus les lignes de
113 % bulles isolées, seulement les poissons et les bulles détectées sur les
114 % images des poissons.
115
116 %% PART 2.  CREATION DE LA MATRICE AVEC DETECTIONS UNIQUES - one_fish_input
117
118
119
120
121 % Régler les paramètres statistiques de détection d'un poisson
122 one_nbr_images_analysees = 50;
123 one_nbr_de_detections_requises = 40;
124
125
126
127
128 %% Détection lorsqu'il n'y a que un poisson - one_fish_detection
129 % A partir de "matr_first_detection" (matrice contenant le nombre de
130 % détections par image), définir les images sur lesquels il n'y a que un
131 % poisson
132
133 % fish_nbr_of_detect - Matrice avec le nombre de détection par image (extrait
134 % de "matr_first_detection", colonne 12) uniquement pour les images qui sont
135 % listées dans "find_fish"
136 fish_nbr_of_detect_vector = zeros(length(matr_first_detection),1);
137 for i=1:length(fish_detection)
138     find_nbr = (matr_first_detection(:,2) == fish_detection(i));
139     fish_nbr_of_detect_vector = fish_nbr_of_detect_vector + find_nbr;
140 end
141
142 fish_nbr_of_detect = matr_first_detection(:,12);
```

```
143 for i=length(fish_nbr_of_detect_vector):-1:1
144     if fish_nbr_of_detect_vector(i) == 0
145         fish_nbr_of_detect(i)=[];
146     end
147 end
148
149 % One_fish_detection - On ne garde que les labels lorsque le pourcentage de
150 % de détection unique est élevé
151 one_image_nbr = one_nbr_images_analysees;
152 one_detection_nbr = one_nbr_de_detections_requises;
153 one_fish_detection = zeros(size(fish_detection)); % Initialisation
154 disp('initialisation boucle while');
155 m = 1; i=1;
156 while i<(length(fish_nbr_of_detect)-(one_image_nbr))
157     count = 0;
158     for j=i:(i+one_image_nbr-1)
159         if fish_nbr_of_detect(j) == 1
160             count=count+1;
161         end
162     end
163     if count > one_detection_nbr-1
164         one_fish_detection(m) = fish_detection(i);
165         m = m+1; i=i+1;
166     else
167         if i~=1 && m~=1 && one_fish_detection(m-1) == fish_detection(i-1)
168             for n=1:one_image_nbr-1
169                 one_fish_detection(m) = fish_detection(i+n);
170                 m = m+1;
171             end
172             i=i+one_image_nbr;
173         else
174             i=i+1;
175         end
176     end
177 end
178
179 % Ajuster la taille du vecteur "one_fish_detection"
180 i_last = find(one_fish_detection,1,'last');
181 one_fish_detection = one_fish_detection(1:i_last);
182
```

```
183 %% Création de la matrice one_fish_input
184 % Matrice qui contient uniquement les données de fish_input dont le label
185 % se retrouve dans one_fish_detection, cad supprimer de la matrice
186 % fish_input les données où il y a plusieurs poissons.
187
188 one_fish_input_vector = zeros(size(fish_input(:,2)));
189 for i=1:length(one_fish_detection)
190     find_label = (fish_input(:,2) == one_fish_detection(i));
191     one_fish_input_vector = one_fish_input_vector + find_label;
192 end
193
194 one_fish_input = fish_input;
195
196 for i=length(one_fish_input_vector):-1:1
197     if one_fish_input_vector(i)==0
198         one_fish_input(i,:)=[];
199     end
200 end
201
202 %% Création de la matrice mutli_fish_input
203 % Matrice qui est l'opposé de one_fish_input, reprend les détections de
204 % fish_input qui correspondent à des images avec plusieurs poissons.
205
206 multi_fish_input = fish_input;
207
208 for i=length(one_fish_input_vector):-1:1
209     if one_fish_input_vector(i)==1
210         multi_fish_input(i,:)=[];
211     end
212 end
213
214
215 %% PART 3. NETTOYAGE DE LA MATRICE AVEC DETECTIONS UNIQUES
216
217
218
219 % Régler les paramètres de restriction
220 upper_limit_area = 500;
221 limit_ratio_perim_area = 0.5;
222 limit_velocity = 100*15;
```

```
223
224
225
226
227 %% Elimination des taches qui sont trop grandes
228 % On enlève de la matrice "one_fish_input" les taches qui sont trop
229 % grandes, cad plus grande que la limite définie.
230
231 limit = upper_limit_area;
232 j = 1;
233 one_fish_input_v2 = zeros(size(one_fish_input));
234
235 for i=1:length(one_fish_input)
236     if one_fish_input(i,3) < limit
237         one_fish_input_v2(j,:) = one_fish_input(i,:);
238         j = j+1;
239     end
240 end
241
242 % Ajuster la taille de la matrice "one_fish_input_v2"
243 i_last = find(one_fish_input_v2(:,1),1,'last');
244 one_fish_input_v2 = one_fish_input_v2(1:i_last,:);
245
246 %% Elimination des taches qui ne respectent pas le ratio perimeter/area
247 % On enlève de la matrice 'one_fish_input_v2" les taches qui ne respectent
248 % pas un ratio perimeter/area correspondant à un poisson.
249
250 limit = limit_ratio_perim_area;
251 j = 1;
252 one_fish_input_v3 = zeros(size(one_fish_input_v2));
253
254 for i=1:length(one_fish_input_v2)
255     ratio = one_fish_input_v2(i,6)/one_fish_input_v2(i,3);
256     if ratio < limit
257         one_fish_input_v3(j,:) = one_fish_input_v2(i,:);
258         j = j+1;
259     end
260 end
261
262 % Ajuster la taille de la matrice "one_fish_input_v3"
```

```
263 i_last = find(one_fish_input_v3(:,1),1,'last');
264 one_fish_input_v3 = one_fish_input_v3(1:i_last,:);
265
266 %% Elimination des taches dont la vitesse est trop grand
267 % Cad lorsque les taches sont trop éloignées les unes des autres alors que
268 % les labels se suivent. Vu qu'à priori il n'y a qu'un seul poisson dans le
269 % bassin, cela signifierait donc que la tache éloignée est une bulle.
270
271 label_v3 = one_fish_input_v3(:,2);
272 X = one_fish_input_v3(:,4);
273 Y = one_fish_input_v3(:,5);
274 one_fish_input_v4 = zeros(size(one_fish_input_v3));
275 one_fish_input_v4(1,:) = one_fish_input_v3(1,:);
276 limit = limit_velocity;
277 limit_new_ref = 100;
278 j=2;
279
280 for i=2:length(one_fish_input_v3)
281     Xnew = one_fish_input_v4(j-1,4);
282     Ynew = one_fish_input_v4(j-1,5);
283     label_new = one_fish_input_v4(j-1,2);
284     time = (label_v3(i)-label_new)/15; %Unité: secondes
285     velocity = sqrt((X(i)-Xnew)^2 + (Y(i)-Ynew)^2)/time;
286     if label_v3(i)-1 == label_v3(i-1) || label_v3(i) == label_v3(i-1)
287         if velocity < limit
288             one_fish_input_v4(j,:) = one_fish_input_v3(i,:);
289             j=j+1;
290         end
291     else
292         label_interval = label_v3(i)-one_fish_input_v4(j-1,2);
293         if label_interval < limit_new_ref + 1
294             if velocity < limit
295                 one_fish_input_v4(j,:) = one_fish_input_v3(i,:);
296                 j = j+1;
297             end
298         else
299             one_fish_input_v4(j,:) = one_fish_input_v3(i,:);
300             j = j+1;
301         end
302     end
end
```

```

303 end
304
305 % Ajuster la taille de la matrice "one_fish_input_v4"
306 i_last = find(one_fish_input_v4(:,1),1,'last');
307 one_fish_input_v4 = one_fish_input_v4(1:i_last,:);
308
309 %% Matrice finale
310 % Création d'une matrice qui reprend "one_fish_input_v4" et
311 % "multi_fish_input", cad toutes les détections avec le moins de bulles
312 % possibles. Permettra de créer un graphe de "présence" avec toutes les
313 % détections de poisson.
314
315 final_fish = [one_fish_input_v4;multi_fish_input];
316
317 %% Sauvegarde des matrices utiles
318
319 save('Matrices_lot6','detection_count','fish_detection','fish_input',...
320      'multi_fish_input','one_fish_input_v4','final_fish');
321
322 %% Fin du code et calcul du temps d'exécution
323
324 toc

```

G.2 Construction des graphes de densité de présence et de vitesse moyenne

```

1 %% OUTPUT CAM1
2 % Ce code permet de sortir des graphes et données utiles pour
3 % l'interprétation des résultats obtenus.
4
5 clear all
6
7 tic
8
9 %% Récupération des matrices calculées par "traitement_cam1"
10 % Récupérer la sauvegarde
11
12 load('Matrices_lot1.mat')
13

```

```
14 % detection_count : matrice avec colonne 1 = label,
15 %             colonne 2 = nbr de détections de ce label
16 % fish_detection : vecteur reprenant les labels avec poisson,
17 %             sans les bulles isolées
18 % fish_input : matrice complète, sans les bulles isolées
19 % multi_fish_input : uniquement les lignes de détections
20 %             avec plusieurs poissons dans le bassin
21 % one_fish_input_v4 : uniquement les détections de poissons isolés,
22 %             avec élimination d'un max de bulles
23 % final_fish : matrice correspondant à "one_fish_input_v4"
24 %             & "multi_fish_input"
25
26 %% Ploter graphe reprennant la position de tous les points qu'on considère
27 % être un poisson
28
29 % Coordonées des points représentant des poissons
30 X_tot_fish = final_fish(:,4);
31 Y_tot_fish = final_fish(:,5);
32
33 % Coordonnées du polygone
34 X_poly=[800,632,632,640,622,610,610, 104, 104, 112, 96, 82, 82, 0, 0,...
35         131,131, 121,138,151,199,199,153,153,658,658,649,665,678,726,726, ...
36         680,680,800,800];
37 Y_poly=[125,125,175,186,198,186,125,125,175,186,198,186,125,125,480,480,...
38         241,227,217,226,240,260,260,480,480,241,227,217,226,240,260,260,480,...
39         480,125];
40
41 % Maillage et calcul de densité
42 maillage_x = 200;
43 maillage_y = 150;
44 x_max = 800;
45 y_max = 600;
46
47 x_maille = x_max/maillage_x;
48 y_maille = y_max/maillage_y;
49
50 X_poly = X_poly/x_maille;
51 Y_poly = Y_poly/y_maille;
52
53 density = zeros(maillage_y, maillage_x);
```

```

54 density_log = zeros(maillage_y, maillage_x);
55
56 for i = 1:maillage_y
57     for j = 1:maillage_x
58         find_det = find(X_tot_fish > x_maille*(j-1) & X_tot_fish <= ...
59             x_maille*(j) & Y_tot_fish > y_maille*(i-1) ...
60             & Y_tot_fish <= y_maille*i);
61         count_det = length(find_det);
62         if count_det == 0
63             count_det = NaN;
64         end
65         density(i,j) = count_det/15;
66         % density(i,j) = log10(count_det);
67         density_log(i,j) = log10(count_det/15); % /15 pour mettre en
68                                                     % échelle de temps
69     end
70 end
71
72 % Plot du graphe de la densité
73 figure()
74 plot(X_poly,Y_poly);
75 hold on
76 pcolor(density_log);
77 shading flat
78 set(gca,'Xdir','reverse');
79 set(gca,'xtick',[],'ytick',[]);
80 cmin=-1;cmx=2;caxis([cmin cmx]);
81 c=colorbar;
82 axes(c);
83 title('t[s] = 10^y')
84 print('Density_lot1','-dpng')
85
86 %% Calcul des vitesses
87 % vecteur se base uniquement sur les images avec un seul poisson, cad
88 % "one_fish_input_v4". Les trop grandes vitesses sont éliminées, car cela
89 % signifie que ce n'est probablement pas le même poisson.
90
91 % Données : one_fish_input_v4
92 label_one_fish = one_fish_input_v4(:,2);
93 X_one_fish = one_fish_input_v4(:,4);

```

```

94 Y_one_fish = one_fish_input_v4(:,5);
95
96 % Insérer des NaN là où une nouvelle séquence commence
97 % Les séquences sont définies comme des suites de labels consécutifs
98 label_one_fish_v2 = zeros(size(label_one_fish));
99 X_one_fish_v2 = zeros(size(X_one_fish));
100 Y_one_fish_v2 = zeros(size(Y_one_fish));
101 label_one_fish_v2(1) = label_one_fish(1);
102 X_one_fish_v2(1) = X_one_fish(1);
103 Y_one_fish_v2(1) = Y_one_fish(1);
104 j = 2; nbr_seq = 0;
105 for i=2:length(label_one_fish)
106     if label_one_fish(i) == label_one_fish(i-1)+1
107         label_one_fish_v2(j) = label_one_fish(i);
108         X_one_fish_v2(j) = X_one_fish(i);
109         Y_one_fish_v2(j) = Y_one_fish(i);
110         j = j+1;
111     else
112         label_one_fish_v2(j:j+1) = [NaN;label_one_fish(i)];
113         X_one_fish_v2(j:j+1) = [NaN;X_one_fish(i)];
114         Y_one_fish_v2(j:j+1) = [NaN;Y_one_fish(i)];
115         j = j+2;
116         nbr_seq = nbr_seq+1;
117     end
118 end
119
120 % Calcul des vitesses
121 t = 1/15; % Temps entre chaque image (15 images/s) - Unité: secondes
122 long = length(label_one_fish_v2);
123 velocity = zeros(long-1,1);
124 for i=1:long-1
125     delta_t = (label_one_fish_v2(i+1)-label_one_fish_v2(i))*t;
126     delta_x = sqrt((X_one_fish_v2(i+1)-X_one_fish_v2(i))^2+ ...
127         (Y_one_fish_v2(i+1)-Y_one_fish_v2(i))^2); % Unité: pixels
128     delta_x = delta_x*0.0015; % Conversion de pixels en m : 1 pixel=1,5mm
129     velocity(i) = delta_x/delta_t;
130 end
131
132 % Filtre des vitesses
133 % Le filtre exclu les vitesses qui different de la médiane de plus de deux

```

```

134 % fois la médiane de la séquence considérée.
135 find_NaN = find(isnan(velocity));
136 m = 1;
137 final_velocity = zeros(size(velocity));
138 final_X = zeros(size(velocity));
139 final_Y = zeros(size(velocity));
140 for i = 2:length(find_NaN)
141     init = find_NaN(i-1);
142     final = find_NaN(i);
143     if init~=final-1
144         sequence = final-init;
145         velocity_seq = [velocity(init+1:final-1),X_one_fish_v2(init+...
146             1:final-1),Y_one_fish_v2(init+1:final-1)];
147         med = median(velocity_seq(:,1));
148         ecart_type = std(velocity_seq(:,1));
149         for j = 1:length(velocity_seq(:,1))
150             % Filtre pour éliminer les vitesses trop élevée, càd qui
151             % s'écarte de plus de 2*écart type par rapport à la moyenne
152             if velocity_seq(j,1) >= med - 2*ecart_type && velocity_seq(j,1)...
153                 <= med + 2*ecart_type
154                 final_velocity(m) = velocity_seq(j,1);
155                 final_X(m) = velocity_seq(j,2);
156                 final_Y(m) = velocity_seq(j,3);
157                 m = m+1;
158             end
159         end
160     end
161 end
162
163 i_last = find(final_velocity,1,'last');
164 final_velocity = final_velocity(1:i_last);
165 final_X = final_X(1:i_last);
166 final_Y = final_Y(1:i_last);
167
168 %% Graphe représentant les vitesses
169 % Pour chaque élément de la maille, le code calcule la moyenne des vitesses
170 % présentent dans ce rectangle, et c'est cette moyenne qui est ensuite
171 % plotée sur le graphe.
172 % Vecteurs utiles : velocity; X_one_fish; Y_one_fish
173 %
    (ils ont tous la même dimension)

```

```

174
175
176 mean_velocity = zeros(maillage_y, maillage_x);
177 mean_velocity_log = zeros(maillage_y, maillage_x);
178
179 for i = 1:maillage_y
180     for j = 1:maillage_x
181         find_det = find(final_X > x_maille*(j-1) & final_X <= x_maille*(j)...
182             & final_Y > y_maille*(i-1) & final_Y <= y_maille*i);
183         % find_det me fournit un vecteur avec la localisation des
184         % velocity dont on va devoir faire la moyenne
185         length_find = length(find_det);
186         if length_find == 0
187             mean = NaN;
188         else
189             mean = sum(final_velocity(find_det))/length_find;
190         end
191         mean_velocity(i,j) = mean;
192         mean_velocity_log(i,j) = log10(mean);
193     end
194 end
195
196 % Plot du graphe de la densité
197 figure()
198 plot(X_poly,Y_poly);
199 hold on
200 pcolor(mean_velocity_log);
201 shading flat
202 set(gca,'Xdir','reverse');
203 set(gca,'xtick',[],'ytick',[]);
204 cmin=-2;cmx=0.5;caxis([cmin cmx]);
205 c=colorbar('YTickLabel',{'0,01','','0,1','','1',''});
206 %c=colorbar;
207 axes(c);
208 title('v[m/s]')
209 print('Velocity_lot1','-dpng')
210
211 %% Sauvegarde des matrices afin de faire le graphe cumulé
212
213 save('Lot_1','mean_velocity','density');

```

```
214
215 %% Fin du code et calcul du temps d'exécution
216 toc
217
```

G.3 Modélisation d'un poisson le long d'une trajectoire

```
1 %% Code qui génère une modélisation graphique du poisson
2
3 clear all
4 tic
5
6 %% Importation du fichier Excel de départ
7
8 % Input contient les colonnes suivantes :
9 % 1. Numéro 2. Label 3. Area 4. X 5. Y 6. Perim 7. Circ 8. Feret 9. FeretX
10 % 10. FeretY 11. FeretAngle 12. MinFeret 13. AR 14. Round 15. Solidity
11
12 %% Importation de la sauvegarde de matrice
13 load('Matrices_lot1.mat')
14
15 % Variables déterminées par "find_trajectoire", permettant de sélectionner
16 % la trajectoire souhaitée.
17 label_central = 217072; % Label d'une image de la trajectoire
18 limit_inf = 0;
19 limit_sup = 39;
20 label_min = label_central - limit_inf;
21 label_max = label_central + limit_sup;
22
23 label = fish_input(:,2);
24 find_label = find(label > label_central - limit_inf & ...
25     label < label_central + limit_sup);
26 input = fish_input(find_label,:);
27
28 %% Tracé du polygone
29
30 % Coordonnées du polygone
31 X_poly=[800,632,632,640,622,610,610, 104, 104, 112, 96, 82, 82, ...
32     0, 0,131, 131, 121,138,151,199,199,153,153,658,658,649,665,...
```

```
33     678,726,726,680,680,800,800];
34 Y_poly=[125,125,175,186,198,186,125,125,175,186,198,186,125,125,...
35     480,480,241,227,217,226,240,260,260,480,480,241,227,217,226,...
36     240,260,260,480,480,125];
37
38 plot(X_poly,Y_poly);
39 set(gca,'Xdir','reverse');
40 set(gca,'xtick',[],'ytick',[]);
41 hold on
42
43
44 %% Elimination des taches qui sont trop petites
45
46 limit = 50;
47 j = 1;
48 input_v1 = zeros(size(input));
49
50 for i=1:length(input)
51     if input(i,3) > limit
52         input_v1(j,:) = input(i,:);
53         j = j+1;
54     end
55 end
56
57 % Ajuster la taille de la matrice "one_fish_input_v2"
58 i_last = find(input_v1(:,1),1,'last');
59 input_v1 = input_v1(1:i_last,:);
60
61 %% Deuxième filtre pour quand il y a deux détections de poisson
62
63 input_v2 = zeros(size(input_v1));
64 size = size(input_v1);
65 i = 1; j = 1;
66
67 while i < size(1,1)-1
68     if input_v1(i,2) == input_v1(i+1,2)
69         if input_v1(i,3) > input_v1(i+1,3)
70             input_v2(j,:) = input_v1(i,:);
71             i = i+2; j = j+1;
72         else
```

```

73         input_v2(j,:) = input_v1(i+1,:);
74         i = i+2; j = j+1;
75     end
76 else
77     input_v2(j,:) = input_v1(i,:);
78     i = i+1; j = j+1;
79 end
80 end
81
82 % Ajuster la taille de la matrice "one_fish_input_v2"
83 i_last = find(input_v2(:,1),1,'last');
84 input_v2 = input_v2(1:i_last,:);
85
86
87 %% Tracer une ligne pointillé des centroides
88 X_poisson = input_v2(:,4);
89 Y_poisson = input_v2(:,5);
90 plot(X_poisson,Y_poisson,':','Color',[0.5,0.5,0.5])
91 hold on;
92
93 %% Ajouter un indicateur au début de la courbe
94 X_init = input_v2(1,4);
95 Y_init = input_v2(1,5);
96 plot(X_init,Y_init,'o','Color',[1,0.5,0],'MarkerSize',10)
97 %hold on;
98
99 %% Représentation graphique du poisson
100 % Plot des droites
101 for i=1:length(find_label)
102     % Tracer le segment de droite
103     poisson = input(i,:);
104     x_fish = poisson(4);
105     y_fish = poisson(5);
106     long_fish = poisson(7)*1/4;
107     x_feret = poisson(8);
108     y_feret = poisson(9);
109     angle_fish = (180 - poisson(10))*pi()/180;
110     Ax = x_fish + long_fish*cos(angle_fish);
111     Ay = y_fish + long_fish*sin(angle_fish);
112     Bx = x_fish - long_fish*cos(angle_fish);

```

```

113     By = y_fish - long_fish*sin(angle_fish);
114     plot ([Ax,Bx],[Ay,By]);
115     hold on;
116     % Tracer la tête
117     if (x_feret<x_fish && Ax>x_fish) || (x_feret > x_fish && Ax < x_fish)
118         plot(Ax,Ay,'Marker','o','MarkerEdgeColor','r','MarkerSize',3);
119         side = 1;
120     else
121         plot(Bx,By,'Marker','o','MarkerEdgeColor','r','MarkerSize',3);
122         side = 2;
123     end
124     hold on;
125     % Tracer le bout de queue
126     coefficients = polyfit([Ax, Bx], [Ay, By], 1); % Find line
127     a = -coefficients (1); % ax + by + c = 0
128     b = 1;
129     c = -coefficients (2);
130     d = (a*x_feret + b*y_feret + c)/sqrt(a^2 + b^2);
131     limit_courb = 1;
132     if d > limit_courb || d < -limit_courb
133         long_courb = 4;
134         if d > limit_courb + 2 || d < -limit_courb - 2 % Forte courbure
135             long_courb = 8;
136         end
137         angle_courb = angle_fish+90*pi()/180;
138         angle_f = angle_fish*180/pi();
139         angle = angle_courb*180/pi();
140         if side == 1 % Tracer la queue de l'autre côté de la tête
141             if d < 0
142                 Cx = Bx - long_courb*cos(angle_courb);
143                 Cy = By - long_courb*sin(angle_courb);
144                 color = 'm';
145             else
146                 Cx = Bx + long_courb*cos(angle_courb);
147                 Cy = By + long_courb*sin(angle_courb);
148                 color = 'c';
149             end
150             plot([Cx,Bx],[Cy,By],'color',color);
151         else
152             if d > 0

```

```
153         Cx = Ax - long_courb*cos(angle_courb);
154         Cy = Ay - long_courb*sin(angle_courb);
155         color = 'c';
156     else
157         Cx = Ax + long_courb*cos(angle_courb);
158         Cy = Ay + long_courb*sin(angle_courb);
159         color = 'm';
160     end
161     plot([Cx,Ax],[Cy,Ay],'color',color);
162 end
163 end
164 hold on;
165 end
166
167 print('Trajectoire','-dpng')
```