

École polytechnique de Louvain

Amélioration de la franchissabilité des passes à poissons : études comportementales sur modèles réduits

Auteurs: **Gilles DEVEEN, Elias ROBERT**
Promoteurs: **Dr Didier BOUSMAR, Dr Xavier ROLLIN**
Lecteurs: **Ir Alain GILLET, Ir Robin MEURICE**
Année académique 2019 – 2020
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

En premier lieu, nous voulons remercier nos deux promoteurs, les professeurs Dr. Didier Bousmar et Dr. Xavier Rollin pour leur grande disponibilité, leurs conseils avisés et leur soutien témoigné tout au long de ce travail compte tenu des circonstances exceptionnelles causées par la pandémie de Covid-19.

Nous remercions également l'ensemble des techniciens du Laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie à Châtelet pour leur accueil et leur bienveillance, et plus particulièrement François-Xavier Salembier pour son aide précieuse par rapport au matériel électronique et aux équipements du modèle réduit.

Nous souhaitons également remercier toutes les personnes qui nous ont aidés à marquer les poissons. Tout d'abord, le personnel du Conservatoire du Saumon Mosan à Erezée et plus particulièrement l'équipe d'Yvan Neus pour le marquage des tacons. Ensuite, Arnaud Dierckx et Jean-Philippe Benitez de l'Université de Liège pour le temps consacré au marquage des anguilles.

Nos remerciements vont aussi à nos lecteurs, Ir. Alain Gillet et Ir. Robin Meurice, pour l'intérêt marqué pour nos travaux, leurs précieuses recommandations et le temps consacré à la lecture de ce mémoire.

Enfin, nous voulons remercier nos familles et nos amis pour leur soutien sans faille tout au long de cette année et pour leurs profitables recommandations de relecture.

Résumé

Au cours des siècles derniers, la Révolution Industrielle a considérablement fragmenté les rivières, en raison notamment de la construction massive de barrages. La prise de conscience de ce problème sur l'environnement fluvial, et principalement sur les poissons migrateurs, n'est apparue que lors des dernières années. C'est dans le contexte de réhabilitation de la continuité écologique de la Meuse qu'un modèle à l'échelle 1 : 5 de la passe à bassins de Rivière a été construit par la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie.

Le travail présenté s'inscrit dans la continuité des études précédentes visant à optimiser les passes à poissons. Il cherche d'abord à étudier l'influence de l'ombrage sur les mouvements de remontée puisque la prédation ailée reste un facteur de réticence à la montaison des ouvrages de franchissement. Ensuite, il examine la possibilité d'adapter une passe à bassins à l'anguille au moyen de substrats de fond. En dernier lieu, un modèle de rampe à anguilles a été confectionné dans le but d'analyser l'impact des pentes longitudinale et transversale sur le franchissement.

Au terme de l'analyse de l'ombrage, l'influence de ce dernier n'est pas confirmée pour les franchissements réalisés en journée et l'effet escompté n'est pas atteint. En effet, il semble que le comportement crépusculaire du saumon prévale sur l'influence d'un dispositif d'ombrage. Son effet est donc discutable et l'étude d'autres paramètres devrait permettre de confirmer sa réelle plus-value.

En ce qui concerne les anguilles, des pistes d'adaptation d'une passe à bassins méritent d'être explorées dans le futur. En outre, des tendances ont pu être constatées sur l'influence bénéfique de la pente transversale sur la remontée. Le substrat de type picot présenté est utilisé par les anguilles même si des études futures sur son optimisation permettront de pouvoir quantifier son intérêt vis-à-vis des autres substrats existants.

Abstract

Over the last few centuries, the Industrial Revolution has fragmented rivers considerably, due in particular to the massive construction of dams. The awareness of this problem on the river environment, and mainly on fishes migratory, has only emerged in recent years. It is in the context of rehabilitation of the ecological continuity of the Meuse River that a 1 : 5 scale model of the pool pass of Rivière was built by the Direction des Recherches Hydrauliques (Hydraulic Research Branch) of the Service Public de Wallonie (Public Service of Wallonia).

The work presented is a continuation of previous studies aimed at optimizing fish passes. First, it seeks to study the influence of shading on the movements of upward movement since winged predation remains a factor in the reluctance to move up crossing structures. Second, it examines the possibility of adapting a pool pass for eels by means of bottom substrates. Finally an eel ramp model was built to study the impact of longitudinal and transversal slopes on the crossing.

At the end of the analysis about the shading effect, the influence of shading was not confirmed for daytime crossings and the intended effect was not met. Indeed, it appears that the crepuscular behavior of salmonids prevails over the influence of a shading device. Its effect remains an open question and the study of other parameters should make it possible to confirm its added value.

As far as eels are concerned, ways to improve pool passes deserve to be explored in the future. In addition, trends are emerging on the beneficial influence of the cross slope on upstream movement. The pinned-type substrate presented is used by eels, although future studies on its optimization will make it possible to quantify its interest with respect to other existing substrates.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contextualisation	1
1.1.1	Contexte global	1
1.1.2	Contexte particulier	4
1.2	Les ouvrages de franchissement	9
1.2.1	Définition	9
1.2.2	Types de dispositifs de franchissement	10
1.3	Objectifs et Enjeux	19
1.3.1	Travaux précédents	19
1.3.2	Objectifs	20
1.3.3	Enjeux	20
1.3.4	Commentaires généraux de l'état de l'art	21
2	Etat de l'art	23
2.1	Articles traitant de l'ombrage	23
2.2	Articles traitant des ouvrages de franchissement pour anguilles	28
2.3	Articles traitant des rampes à anguilles	33
3	Caractérisation des poissons	37
3.1	Introduction	37
3.2	Caractéristiques migratoires	38
3.2.1	But de la migration	38
3.2.2	Les types de migration	38
3.2.3	Les obstacles à la migration	39
3.3	Caractéristiques natatoires	40
3.3.1	Différentes activités natatoires	40
3.3.2	Différents types de nage	42
3.3.3	Modèles de vitesse existants	44
3.4	Application aux espèces étudiées	53
3.4.1	Caractéristiques migratoires	53
3.4.2	Caractéristiques natatoires	58
4	Modèles	61
4.1	Critères de dimensionnement d'une passe à poissons	61
4.1.1	Critères généraux	63
4.1.2	Critères d'attention d'une passe à bassins	68
4.1.3	Critères d'attention d'une passe à anguilles	70
4.2	Modèles physiques	76
4.2.1	Description du modèle de la passe à fentes verticales de Rivière	76

4.2.2	Description du modèle simplifié d'une passe à anguilles	78
4.2.3	Similitudes	80
4.3	Modèles numériques	83
4.3.1	Modélisation TELEMAC	84
4.3.2	Modélisation SolidWorks	86
5	Matériel	88
5.1	Matériel vivant	88
5.1.1	Les saumons	88
5.1.2	Les anguilles	93
5.1.3	Bien-être animal	97
5.2	Matériel logistique	105
5.2.1	Matériel d'acquisition des données	105
5.2.2	Matériel d'éclairage	109
5.2.3	Matériel de mesure de température	111
5.2.4	Matériel hydraulique	111
6	Méthodes	113
6.1	Buts recherchés	113
6.2	Protocoles d'essais	114
6.2.1	Protocole d'essai de l'influence de l'ombrage	114
6.2.2	Protocole d'essai propre à la rampe à anguilles	122
6.2.3	Protocole d'essais propre à l'adaptation du modèle de la passe à bassins de Rivière aux anguilles	129
6.3	Limitations expérimentales	137
6.3.1	Modèle réduit de la passe de Rivière	137
6.3.2	Modèle simplifié d'une rampe à anguilles	140
7	Etude de l'Ombrage	142
7.1	Résultats	142
7.1.1	Attractivité	142
7.1.2	Franchissabilité	148
7.1.3	Mortalité	160
7.2	Discussion	161
7.2.1	Attractivité	161
7.2.2	Franchissabilité	164
7.2.3	Mortalité	167
7.2.4	Pistes d'amélioration	169
8	Etude d'une rampe à anguilles	172
8.1	Résultats	172
8.1.1	Tentative de remontée	172
8.1.2	Remontée	175
8.1.3	Nombre de remontées par tentatives de remontées	184
8.1.4	Couloirs de remontée	185
8.1.5	Paramètres du lot	190
8.2	Discussion	190
8.2.1	Analyse	190
8.2.2	Pistes d'amélioration	193

9 Conclusions et perspectives	194
9.1 Conclusions	194
9.2 Perspectives	196
Bibliographie	198
Annexes	216
A Annexe se rapportant au modèle	216
A.1 Plans de la passe	217
B Annexe se rapportant au matériel	218
B.1 Distributions statistiques des lots de tacons	218
B.1.1 Compilation des paramètres mathématiques par lot	218
B.1.2 Représentations graphiques des distributions	219
B.2 Relations poids-taille des lots de tacons	222
B.2.1 Lots ayant participé au dispositif brut	222
B.2.2 Lots ayant participé au dispositif opacifié	223
B.2.3 Lots ayant participé au dispositif ombragé	224
B.3 Recensement des 200 tacons pit-tagués, mesurés et pesés à la pisciculture d'Erezée	225
B.4 Recensement des 250 anguilles pit-taguées, mesurées et pesées par l'Univer- sité de Liège	235
B.5 Certificat de formation sur le bien-être animal	236
B.6 Etiquette de la nourriture Dan-ex 0.8 des anguilles	238
B.7 Protocole expérimental du marquage des poissons	239
B.8 Résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau de Châtelet	240
C Annexe se rapportant aux méthodes	244
C.1 Détails des mesures de lumière	244
D Annexe se rapportant aux résultats	247
D.1 Attractivité de la passe en fonction de l'heure	247
D.2 Nombre de détections recensées par antenne	249

Liste des figures

1.1	Situation géographique du bassin versant de la Meuse	5
1.2	Recensement des quinze barrages de la Meuse belge	6
1.3	Situation du barrage de Rivière	8
1.4	Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à échancrures latérales et orifices de fond	10
1.5	Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à deux fentes verticales	11
1.6	Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à une fente verticale . .	11
1.7	Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à échancrures triangulaires	12
1.8	Schéma du principe de fonctionnement d'un prébarrage	13
1.9	Schéma du principe de fonctionnement d'une rampe à singularités régulière- ment réparties	13
1.10	Schéma du principe de fonctionnement d'une rampe à rangées périodiques	14
1.11	Civelles remontant des parois verticales	15
1.12	Schéma de fonctionnement d'une passe spécifique à civelles et anguillettes .	15
1.13	Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à ralentisseurs suractifs de fond	16
1.14	Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à ralentisseurs plans . .	16
1.15	Schéma du principe de fonctionnement d'une écluse à poissons	17
1.16	Schéma du principe de fonctionnement d'un ascenseur à poissons	18
2.1	Représentation des zones éclairées et de la situation du barrage de Poutès .	25
2.2	Dispositif de collecte des poissons	26
2.3	Dispositifs de remontées sans et avec brins	29
2.4	Passe à poissons Larinier avec ajout d'une chicane super active	30
2.5	Situation géographique du détroit de Judas sur la rivière Stour	31
2.6	Situation géographique du barrage de Barmby	33
2.7	Représentation des conditions d'essais utilisées pour la remontée de rampes à anguilles en Nouvelle-Zélande	34
2.8	Représentation des conditions d'essais utilisées pour la remontée de rampes à anguilles en Suède	35
2.9	Illustration des trois substrats utilisés lors des expériences menées en Suède	35
3.1	Forces verticales et horizontales s'exerçant sur un poisson en mouvement .	42
3.2	Types de nageoires utiles au déplacement	43
3.3	Types de nage présentes en Meuse	43
3.4	Représentation graphique des vitesses maximale et critique selon Videler (1993)	46
3.5	Représentation graphique de la vitesse maximale théorique selon le modèle de Wardle-Zhou (1982)	47

3.6	Représentation graphique de l'évolution de la vitesse maximale de sprint selon le modèle de Beach (1984)	48
3.7	Représentation graphique de la vitesse critique théorique selon le modèle de Wardle-Zhou (1982)	49
3.8	Illustration du modèle de vitesse de Katopodis et Eng (1992)	51
3.9	Relations de vitesse obtenues par Wolter et Arlinghaus (2004)	52
3.10	Schématisation du cycle biologique du saumon atlantique	54
3.11	Schématisation du cycle biologique de l'anguille européenne	57
4.1	Schéma illustrant l'influence de la configuration d'un obstacle sur sa franchissabilité	64
4.2	Schéma illustrant l'implantation d'une passe dans le cas d'un obstacle oblique à la rivière	65
4.3	Schémas illustrant l'implantation d'une passe dans le cas d'un obstacle perpendiculaire à l'axe de l'écoulement	66
4.4	Schémas illustrant l'implantation d'une passe au niveau d'un aménagement hydroélectrique	66
4.5	Schéma de principe d'une galerie collectrice comportant plusieurs entrées au-dessus des aspirateurs des turbines	67
4.6	Schémas du mode d'un écoulement à jet plongeant au niveau des cloisons d'une passe	69
4.7	Schémas du mode d'un écoulement à jet de surface au niveau des cloisons d'une passe	69
4.8	Exemple d'un substrat de type plot utilisé pour la passe de Monsin (Belgique).	72
4.9	Substrats synthétiques développés par Milieu Inc.	72
4.10	Substrat développé par l'entreprise Fish-Pass	72
4.11	Substrats de type plot en plastique et béton	73
4.12	Substrats de type picot et brosse	73
4.13	Substrat de type géotextile, Enkamat	74
4.14	Trap box niveau bas	75
4.15	Trap box niveau haut	75
4.16	Vue en plan de la géométrie du modèle réduit de la passe de Rivière	77
4.17	Répartition des plots dans le fond du modèle réduit de la passe de Rivière	77
4.18	Expression du débit passant dans une passe à échancrures	78
4.19	Photos du modèle simplifié d'une rampe à anguilles	79
4.20	Substrat de type picot	79
4.21	Illustration des vitesses dans le bassin 4 de la passe à poissons de Rivière, simulation 2D	84
4.22	Illustration des vitesses dans le bassin 4 de la passe à poissons de Rivière, simulation 3D	85
4.23	Illustration des lignes de courant et des zones de recirculation dans le bassin 4 de la passe de Rivière	85
4.24	Représentation numérique de l'écoulement du bassin 4 de la passe de Rivière en présence d'un substrat de fond	86
5.1	Représentation d'un saumon atlantique adulte	88
5.2	Représentation d'un saumon atlantique juvénile	89
5.3	Distributions statistiques de la taille et du poids de l'échantillon de 152 tacons.	91

5.4	Relation liant la taille et le poids de l'échantillon de 152 tacons.	92
5.5	Illustration d'une anguille européenne adulte	93
5.6	Distributions statistiques de la taille et du poids de l'échantillon de 250 anguilles.	95
5.7	Relation liant la taille et le poids de l'échantillon de 250 anguilles.	96
5.8	Photo de l'opération d'insertion des PIT-tags réalisée sur des anguilles par des employés de l'Université de Liège.	98
5.9	Photo de la pesée des individus lors de leur marquage	98
5.10	Moyens utilisés pour le transport des poissons	101
5.11	Exemple de cachettes utilisées pour le stockage des anguilles.	102
5.12	Ensemble des cinq boîtiers composant le système d'acquisition des données RFID.	106
5.13	Représentation physique de la taille d'un PIT-tag de 12mm comparé à une pièce de monnaie	106
5.14	Emplacement schématique des huit antennes fixées sur le modèle réduit . .	107
5.15	Disposition physique d'une antenne aux abords d'une fente verticale du modèle réduit	107
5.16	Exemple de sortie d'un fichier CSV des données collectées par le système RFID.	108
5.17	Système d'enregistrement vidéo	108
5.18	Vue extérieure du modèle réduit protégé de la luminosité extérieure par une bâche.	109
5.19	Positionnement des cinq spots placés autour du modèle réduit.	110
5.20	Illustration de l'appareil de mesure d'intensité lumineuse.	110
5.21	Photo du thermomètre utilisé pour les mesures de températures d'eau du modèle simplifié de rampe et du vivier de stockage	111
5.22	Photo de la pompe utilisée dans le modèle simplifié de rampe à anguilles .	112
6.1	Cliché du modèle réduit dans sa configuration brute.	115
6.2	Cliché du modèle réduit dans sa configuration opaque.	115
6.3	Cliché du modèle réduit dans sa configuration ombragée.	116
6.4	Dispositif anti-retour utilisé à l'amont.	117
6.5	Synthèse visuelle du déroulement des expériences menées sur l'ombrage. . .	119
6.6	Représentation en plan de la passe et des éléments utiles à la compréhension des manipulations réalisées.	120
6.7	Photos des substrats de fond testés lors des essais préliminaires dans le modèle simplifié d'une rampe à anguilles	123
6.8	Photos de l'amont du modèle simplifié de rampe	124
6.9	Photos de l'aval du modèle simplifié de rampe	124
6.10	Clichés des témoins à l'aval et à l'amont du modèle simplifié de rampe . . .	125
6.11	Photos du système de pompage de l'eau	125
6.12	Effet de l'introduction de la pente transversale dans la rampe spécifique à anguilles sur l'écoulement	126
6.13	Evolution de la température de l'eau du modèle simplifié de rampe	127
6.14	Anguille coincée dans une bordure du modèle réduit de Châtelet	130
6.15	Schéma des faiblesses observées pour l'accueil d'anguilles	130
6.16	Clichés des observations constatées lors des seconds tests préliminaires sur les anguilles	131

6.17	Photos de cachettes pour anguilles en demi-tubes de PVC	132
6.18	Schéma du modèle réduit de la passe à poissons de Rivière	132
6.19	Schéma d'une rampe en pied d'échancrure du modèle réduit de Châtelet . .	133
6.20	Schéma de la modification des plots dans le fond du modèle réduit de Châtelet	133
6.21	Dimensions d'un tapis picot 25 mm pour rampe à anguilles	134
6.22	Schéma de l'installation d'une équerre de plexiglass dans le bac aval du modèle réduit de Châtelet	134
6.23	Schéma des modifications réalisées sur le modèle réduit de Châtelet pour l'accueil d'anguilles	135
6.24	Tableau de la photopériode de la période du 1 mai 2020 au 5 mai 2020 . .	136
6.25	Synthèse visuelle du déroulement des expériences menées sur la franchissa- bilité des anguilles	137
7.1	Taux d'attractivité par individu en fonction du dispositif étudié.	144
7.2	Comparatif du taux d'attractivité entre la passe à bassins et le canal d'attrait.	144
7.3	Graphique de l'influence du dispositif d'ombrage sur le nombre total de passages captés au seuil S6.	145
7.4	Graphique de l'influence du dispositif d'ombrage sur le nombre d'individus différents captés au seuil S6.	146
7.5	Graphique du nombre de passages captés au seuil S6 en fonction de l'heure de la journée.	147
7.6	Graphique du nombre de passages captés par heure au seuil S6 en fonction de la période de la journée.	147
7.7	Distributions statistiques de la taille et du poids des individus attirés par la passe à bassins.	148
7.8	Nombre de tacons captés à chaque seuil de la passe en fonction du dispositif d'ombrage.	150
7.9	Nombre de détections obtenues par seuil durant la période de jour en fonction du dispositif d'ombrage.	151
7.10	Nombre de détections recensées par période de la journée pour le dispositif brut.	152
7.11	Nombre de détections recensées par période de la journée pour le dispositif opacifié.	152
7.12	Nombre de détections recensées par période de la journée pour le dispositif ombragé.	152
7.13	Nombre d'amorces de franchissements partiels en fonction de la période du jour pour chaque dispositif.	153
7.14	Proportion du nombre de montées effectuées par individu toutes dispositions confondues.	154
7.15	Représentation graphique du temps moyen de remontée en fonction du dispositif d'ombrage.	154
7.16	Représentation graphique du temps moyen de remontée sans période de repos en fonction du dispositif d'ombrage.	155
7.17	Evolution du parcours de trois individus lors de l'expérience 3 avec dispositif ombragé.	156
7.18	Evolution du parcours de deux individus lors de l'expérience 5 avec dispositif opacifié.	156

7.19	Evolution du parcours de deux individus lors de l'expérience 6 avec dispositif ombragé.	157
7.20	Evolution du parcours de quatre individus lors de l'expérience 8 avec dispositif opacifié.	157
7.21	Evolution du parcours de deux individus ayant remonté la passe par le canal d'attrait.	158
7.22	Représentation graphique du comportement exploratoire des individus. . .	159
7.23	Distributions statistiques de la taille et du poids des individus ayant franchi complètement ou partiellement la passe à bassins.	159
7.24	Distributions statistiques de la taille et du poids des individus morts au cours des expériences.	160
7.25	Cliché d'un tacon ayant smoltifié durant les expériences.	167
8.1	Nombre de tentatives de remontées en fonction du dispositif étudié	173
8.2	Distribution des temps des tentatives de remontées en fonction de la pente transversale	174
8.3	Distribution des temps des tentatives de remontées en fonction de la pente longitudinale	174
8.4	Nombre de remontées en fonction du dispositif étudié	176
8.5	Représentation graphique du temps moyen pour remonter en fonction des différentes conditions d'essais	177
8.6	Représentation graphique du temps moyen de remontée en fonction de la pente longitudinale.	178
8.7	Représentation graphique du temps moyen de remontée en fonction de la pente transversale.	178
8.8	Taux d'activité en fonction du dispositif étudié	179
8.9	Représentation graphique de la distance normalisée moyenne parcourue pour remonter la rampe en fonction des différentes conditions d'essais. . . .	180
8.10	Représentation graphique de la distance normalisée moyenne parcourue pour remonter la rampe en fonction de la pente longitudinale.	181
8.11	Représentation graphique de la distance normalisée moyenne parcourue pour remonter la rampe en fonction de la pente transversale.	181
8.12	Représentation graphique de la vitesse moyenne par body-length pour remonter la rampe en fonction des différentes conditions d'essais.	182
8.13	Représentation graphique de la vitesse moyenne par body-length pour remonter la rampe en fonction de la pente longitudinale.	183
8.14	Représentation graphique de la vitesse moyenne par body-length pour remonter la rampe en fonction de la pente transversale.	183
8.15	Illustration des différents angles formés par les anguilles dans le substrat .	184
8.16	Rapport des tentatives et des remontées en fonction du dispositif étudié . .	184
8.17	Profils transversaux des hauteurs d'eau pour chaque condition d'essais (en bleu le substrat de type picot de 5mm d'épaisseur).	185
8.18	Taux d'utilisation de chaque couloir selon le temps que l'anguille y a passé	187
8.19	Taux d'utilisation de chaque couloir selon la distance que l'anguille y a parcouru	187
8.20	Intervalles de vitesse obtenus dans le couloir I	188
8.21	Intervalles de vitesse obtenus dans le couloir II	188
8.22	Intervalles de vitesse obtenus dans les couloirs III et IV	189

8.23	Distribution statistique de la taille des anguilles ayant participé aux expériences	190
B.1	Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 1.	219
B.2	Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 4.	219
B.3	Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 7.	219
B.4	Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 2.	220
B.5	Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 5.	220
B.6	Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 8.	220
B.7	Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 3.	221
B.8	Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 6.	221
B.9	Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 9.	221
B.10	Relation liant la taille et le poids, lot 1.	222
B.11	Relation liant la taille et le poids, lot 4.	222
B.12	Relation liant la taille et le poids, lot 7.	222
B.13	Relation liant la taille et le poids, lot 2.	223
B.14	Relation liant la taille et le poids, lot 5.	223
B.15	Relation liant la taille et le poids, lot 8.	223
B.16	Relation liant la taille et le poids, lot 3.	224
B.17	Relation liant la taille et le poids, lot 6.	224
B.18	Relation liant la taille et le poids, lot 9.	224
C.1	Schéma des endroits de mesures d'intensité lumineuse prises sur le modèle réduit.	244
D.1	Nombre de passages au seuil S6, cas brut.	247
D.2	Nombre de passages au seuil S6, cas opacifié.	248
D.3	Nombre de passages au seuil S6, cas ombragé.	248
D.4	Nombre de détections obtenues par seuil durant la période de nuit.	249
D.5	Nombre de détections obtenues par seuil durant la période de l'aurore.	249
D.6	Nombre de détections obtenues par seuil durant la période de crépuscule.	249

Liste des tableaux

3.1	Synthèse des résultats expérimentaux de vitesse maximale de sprint obtenus pour les saumons atlantiques.	58
3.2	Synthèse des résultats expérimentaux de vitesse critique obtenus pour les saumons atlantiques.	59
3.3	Résultats non exhaustifs de vitesses de saumons dans la littérature.	59
3.4	Synthèse des résultats expérimentaux de vitesse maximale de sprint obtenus pour les anguilles européennes.	59
3.5	Synthèse des résultats expérimentaux de vitesse critique obtenus pour les anguilles européennes.	60
3.6	Résultats non exhaustifs de vitesses d'anguilles dans la littérature.	60
4.1	Valeurs guides des passes à bassins dites à jets de surface	70
4.2	Valeurs de dimensionnement optimales pour une passe à anguille fermée	71
4.3	Valeurs de dimensionnement optimales pour une passe à anguille à ciel ouvert	71
4.4	Valeurs cibles pour la conception de la passe à poissons de Rivière respectant les critères d'acceptabilité piscicole recommandés par la Direction des Etudes Techniques	76
4.5	Dimensions principales de la passe à poissons de Rivière	77
4.6	Dimensions principales du modèle simplifié utilisé comme rampe à anguilles et du substrat de fond de type picot.	80
4.7	Tableau récapitulatif des coefficients d'échelle utilisés.	83
4.8	Valeurs principales de l'écoulement de la passe à poissons de Rivière mises à l'échelle	83
4.9	Valeurs des vitesses obtenues via la modélisation numérique de l'écoulement de la passe de Rivière.	86
5.1	Synthèse des caractéristiques propres au saumon atlantique.	90
5.2	Valeurs caractéristiques mathématiques de l'échantillon de 152 tacons.	91
5.3	Synthèse des caractéristiques propres à l'anguille européenne.	94
5.4	Valeurs caractéristiques mathématiques de l'échantillon de 250 anguilles.	95
5.5	Paramètres physico-chimiques de l'eau de Châtelet.	103
5.6	Recensement des mortalités constatées au cours de l'ensemble des essais.	105
6.1	Synthèse des mesures d'intensité lumineuses pour les trois configurations étudiées.	116
6.2	Nombre moyen d'expériences effectué pour les tacons.	119
6.3	Dates des expériences effectuées sur l'effet de l'ombrage.	121
6.4	Dimensions principales du substrat de fond de type brosse.	123
6.5	Conditions d'essais pour étudier l'évolution d'anguilles dans une rampe spécifique à anguilles.	126

6.6	Dates et heures de début et de fin des expériences effectuées sur la rampe spécifique à anguille.	128
6.7	Pourcentage de petites anguilles utilisant des rampes avec différents substrats de type brosse à 3 pentes différentes	136
7.1	Résultats chiffrés du taux d'attractivité obtenu par individu.	145
7.2	Comparaison de l'augmentation d'attractivité en fonction du dispositif vierge pris comme référence.	145
7.3	Nombre d'individus différents captés au seuil S6 en fonction de la période du jour.	146
7.4	Valeurs caractéristiques de l'échantillon des tacons attirés par la passe. . .	148
7.5	Pourcentage du nombre de poissons ayant atteint chaque seuil selon chaque configuration étudiée.	150
7.6	Proportion du nombre de détections recensées en journée pour les trois dispositifs étudiés.	151
7.7	Comparaison du nombre de franchissements partiels amorcés en fonction du dispositif d'ombrage et de la période du jour.	153
7.8	Valeurs caractéristiques permettant d'élaborer des box-plots des temps de remontée.	155
7.9	Synthèse des temps de remontée moyens sans longue période de repos. . .	155
7.10	Proportion du nombre d'individus ayant franchi la passe via le canal d'attrait.	158
7.11	Valeurs caractéristiques de l'échantillon des tacons ayant franchi partiellement ou complètement la passe.	159
7.12	Valeurs caractéristiques des individus morts et vivants à l'issue des expériences.	160
7.13	Analyse de la perte de biomasse au cours des expériences.	161
8.1	Nombre de tentatives de remontées par condition d'essais.	173
8.2	Proportions de la distribution des tentatives de remontées par intervalle de 5 minutes.	175
8.3	Nombre de remontées par condition d'essais.	176
8.4	Valeurs caractéristiques permettant d'élaborer des box-plots des temps de remontée pour les expériences menées sur les anguilles (le temps est exprimé en minutes).	177
8.5	Valeurs caractéristiques permettant d'établir les box-plots des distances parcourues pour remonter la rampe pour les expériences menées sur les anguilles	180
8.6	Valeurs caractéristiques permettant d'établir les box-plots de la vitesse relative des anguilles pour remonter la rampe	182
8.7	Rapport entre le nombre de tentatives de remontées et le nombre de remontées elles-mêmes par condition d'essais.	185
8.8	Proportions des taux d'utilisation en termes de temps et de distance pour chaque condition d'essais.	186
8.9	Valeurs caractéristiques permettant d'établir les box-plots de la vitesse des anguilles dans le couloir I.	188
8.10	Valeurs caractéristiques permettant d'établir les box-plots de la vitesse des anguilles dans le couloir II.	189
8.11	Valeurs caractéristiques permettant d'établir les box-plots de la vitesse des anguilles dans les couloirs III et IV.	189

B.1	Valeurs caractéristiques mathématiques des 9 échantillons.	218
C.1	Synthèse des mesures d'intensité lumineuse pour la cas brut	245
C.2	Synthèse des mesures d'intensité lumineuse pour la cas opacifié	245
C.3	Synthèse des mesures d'intensité lumineuse pour la cas ombragé	246

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contextualisation

1.1.1 Contexte global

Disparition de la faune aquatique

Depuis le début de la Révolution Industrielle qui a démarré au 19^e siècle, l'Homme n'a cessé de perturber l'environnement qui l'entoure. Sa consommation d'énergies fossiles grandissante a mené la planète vers une production accrue de gaz à effets de serre qui ont eux-mêmes provoqué, au fil des décennies, un réchauffement climatique (Goodess et al., 1992; Sadatshojaie and Rahimpour, 2020). Les perturbations causées par l'Homme sur l'écosystème ambiant (déforestation, urbanisation, pollution, etc.) ainsi que la hausse des températures ont petit à petit fragilisé les espèces aquatiques et plus particulièrement les espèces migratrices. A titre d'exemples, deux espèces phares concernées par ces problématiques seront documentées : le saumon atlantique et l'anguille.

Cas particulier du saumon atlantique

Surnommé le roi des poissons (Bauernfeind, 2018) en raison de la qualité de sa chair (Malbrouck et al., 2007) et de sa valeur économique (Larinier, 2001), l'état de santé du saumon atlantique (*Salmo salar*) est considéré comme un très bon indicateur de qualité des eaux et de l'environnement (Malbrouck et al., 2007). C'est à ce titre que sa disparition est un bon exemple de celles d'un grand nombre d'espèces aquatiques. Au début du siècle, les saumons avaient disparu de plus de 300 réseaux fluviaux d'Europe et d'Amérique du Nord (Cox, 2001). Cela s'est constaté partout en Europe, c'est notamment le cas de la Grande-Bretagne où une baisse de 70% des saumons a été recensée (Doughty, 2019). Les causes de son déclin sont diverses : maladies (Okamura et al., 2011), changement climatique (Jonsson and Jonsson, 2009), pollution (Lotze and Milewski, 2004), surpêche (Mota et al., 2016) et dégradation de son habitat, principalement due à la construction de barrages (Tentelier and Piou, 2011).

Nous avons volontairement décidé de ne pas développer le cas du saumon atlantique plus en détail car il a déjà fait l'objet de plusieurs études approfondies dans des travaux précédents (Pyper, 2015; Courtois and Van Audenhaege, 2017).

Cas particulier de l'anguille

Les altérations de l'Homme sur l'environnement ont fortement impacté la disparition des anguilles. Ces changements ont aussi bien touché l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) et l'anguille japonaise (*Anguilla japonica*), signe que le problème est bien global.

L'anguille fait partie des individus à haute valeur économique (Deelder, 1985). Elle est appréciée non seulement pour sa consommation alimentaire mais également pour ses qualités de bioindicateur en termes de qualité aquatique (Amiard-Triquet et al., 1987; Belpaire and Goemans, 2007; McHugh et al., 2010). En effet, l'anguille est capable de rendre compte d'un grand nombre d'éléments chimiques présents dans l'eau en raison de son aptitude hors normes de stockage dans ses parties graisseuses (Belpaire et al., 2009). Ainsi, l'anguille est devenue l'emblème des espèces aquatiques soumises aux dommages causés par les changements climatiques (Drouineau et al., 2018). En effet, comment la population d'une espèce aussi robuste (Knights, 2003) et aux capacités d'adaptation remarquables (Mateo et al., 2017), a-t-elle pu autant diminuer depuis les années 1970-1980 ? Sur les 25 dernières années, la population des anguilles a diminué de 95% (Morris, 2009; Walker, 2019). Les raisons qui justifient cette baisse d'individus sont multiples et s'expliquent notamment par :

1. Les variations océaniques :

Elles jouent un rôle important sur le déclin des anguilles (Castonguay et al., 1994). D'une part, l'augmentation des températures des océans provoque des modifications de déplacements et de répartition du plancton dans l'océan Atlantique (Goberville et al., 2014). Cela pose un problème aux anguilles à l'état larvaire qui se nourrissent de ces crustacés. D'autre part, les saisons et les précipitations sont affectées. Cela engendre des modifications de débits en rivière qui perturbent les mouvements des anguilles (Drouineau et al., 2017). Enfin, les courants océaniques tels que le Gulf Stream se voient bouleversés alors qu'ils sont responsables de la migration des anguilles à l'état larvaire vers les rivières (Zenimoto et al., 2009).

2. Les déchets d'origine humaine :

Les déchets d'industries que l'Homme rejette dans les rivières contaminent ces poissons. L'analyse de leurs réserves lipidiques en est témoin (Geeraerts and Belpaire, 2010). Ces produits sont divers et incluent des métaux (Maes et al., 2005), des pesticides (Byer et al., 2013), des déchets organiques (Bilau et al., 2007) et des déchets chimiques (colorants par exemple) (Belpaire et al., 2015). Ces matières infectent les anguilles et peuvent provoquer des lésions, du stress, des dérèglements hormonaux (Couillard et al., 1997) ainsi que des problèmes de reproduction (Baillon et al., 2015).

3. Les parasites :

Certains parasites peuvent occasionner des maux chez l'anguille. C'est notamment le cas du *Anguillicolla crassus*. Ce parasite importé du Japon est aujourd'hui largement répandu en Europe (Becerra-Jurado et al., 2014). Il s'attaque à la vessie natatoire de l'anguille et peut provoquer infections, inflammations, stress, perte d'appétit (Kirk, 2003) ou encore une diminution significative des capacités de nage de l'animal (Székely et al., 2009).

4. Les constructions :

Les constructions d'ouvrages sur les cours d'eau tels que les barrages ou les seuils

ont déstabilisé les anguilles dans leur migration (Kettle et al., 2011). En bloquant la montaison et la dévalaison des espèces migratrices, ces obstacles génèrent des concentrations non désirées d'individus. Ces amas de poissons créent des problèmes de compétition (Bevacqua et al., 2011) et augmentent les phénomènes de prédation (Larinier, 2001) et de surpêche (Briand et al., 2005; Tsukamoto et al., 2009).

Les barrages

Depuis qu'il en a eu les moyens, l'Homme a cherché à apprivoiser les cours d'eau et à les détourner pour répondre à ses besoins. Dès l'Antiquité, on trouve des traces de déviation de rivières afin d'approvisionner les cultures par irrigation (Garbrecht, 1988). C'est à travers cette volonté de vouloir réguler la nature que l'Homme a commencé à ériger des barrages. Ceux-ci permettent en partie de dompter les rivières et leur écoulement. Les premiers barrages datent probablement de la Préhistoire (Reinach, 1911) et ont été développés par la suite par les Romains (Vita-Finzi, 1961). Le 20^e siècle marque l'âge d'or des barrages grâce au développement des techniques de coffrage et de bétonnage. Avec ces dernières, on pouvait compter en moyenne dans le monde, l'érection d'un barrage par jour (Arthur and Saffer, nd) avec un pic constaté dans les années 60 où cinq barrages étaient construits par jour uniquement aux Etats-Unis (O'Connor et al., 2008). Cette construction intensive a été rendue nécessaire pour rencontrer les besoins d'une démographie sans cesse croissante et ceux d'une économie industrielle en plein essor. Les barrages ont notamment permis d'irriguer les cultures afin de nourrir les populations, d'encourager l'expansion du commerce en augmentant la capacité fluviale (Pandian, 1980), de réguler les crues, d'alimenter les régions en eau potable ou de produire de l'électricité (CIGB, nd).

L'importance des barrages n'est donc plus à démontrer. A l'heure actuelle, les barrages hydroélectriques représentent la troisième source de production d'électricité dans le monde après le charbon et le gaz naturel. Considérés comme la première source d'énergies renouvelables, ils participent à la production de 16% de l'électricité mondiale (2017) (IEA, nd).

Cependant, cette production d'énergie renouvelable n'est pas sans conséquences sur la faune aquatique et particulièrement sur les espèces migratrices. Les obstacles rencontrés lors des mouvements migratoires peuvent causer des retards (CIPR, 2004; Chanseau, 2013; Nyqvist et al., 2017) ou même empêcher la migration des individus (Pandian, 1980). Ceci met en péril la pérennité de ces espèces puisque leur cycle biologique et leur reproduction dépendent des saisons et de leurs mouvements migratoires. Au pire, les turbines hydroélectriques ou les prises d'eau industrielles situées à proximité des barrages sont causes de mortalités (Ferguson et al., 2006; Philippart and Ovidio, 2009; Chanseau, 2013). Dans d'autres cas tout aussi problématiques, elles occasionnent de graves lésions provoquées par des impacts, des placages, de la cavitation ou des turbulences (CIPR, 2004; Trancart et al., 2020).

Une prise de conscience de ces problèmes s'est produite au cours des deux dernières décennies. Des solutions ont été développées afin d'empêcher les poissons d'approcher les zones à risques. Une première solution fut de proposer l'arrêt des turbines en période de migration (Chanseau, 2013) voire le démantèlement complet des usines hydroélectriques (CIPR, 2004). Pour des raisons économiques, cette solution ne put être retenue. Une deuxième solution consiste à employer des stimuli de type électrique (Chanseau, 2013), sonore (Sand et al., 2001) ou lumineux (Hadderingh et al., 1992). Ces derniers doivent

en principe permettre d'éloigner les poissons des zones dangereuses. De fines grilles ont également été utilisées afin d'empêcher les poissons d'atteindre les turbines. Cette solution présente toutefois deux problèmes. Le premier pose la question de la taille optimale de l'entrefer à utiliser afin de garder un bon équilibre entre la protection des individus et la perturbation de l'écoulement. Le second concerne le taux de mortalité des espèces provoqué par le placage des poissons contre ces grilles de protection (Chanseau, 2013; Dumonceau, 2013).

Si ces adaptations des barrages hydroélectriques diminuent la mortalité des individus, elles ne garantissent pas la continuité écologique de la rivière nécessaire à la préservation de la faune et de la flore aquatiques et du bien-être environnemental (Burgun and Ovidio, 2014). Deux autres alternatives ont été retenues et sont actuellement développées en parallèle pour pallier ce problème. La première concerne l'avancement réalisé sur des turbines ichtyocompatibles qui ne blesseraient plus les poissons lors de leurs passages en montaison ou dévalaison (Philippart and Ovidio, 2009; Raynal et al., 2014). La seconde est d'installer une passe à poissons peu avant les barrages afin de contourner l'obstacle. Cette option a l'avantage de remédier au problème de blocage de tous les types de barrages et pas uniquement ceux dotés de turbines hydroélectriques. C'est pour cette raison que son optimisation a déjà largement été étudiée et que son développement est encouragé. De nombreuses passes à poissons ont ainsi été construites à proximité des barrages (Clay, 1994; Roscoe and Hinch, 2010; Bunt et al., 2016; Bao et al., 2019).

1.1.2 Contexte particulier

Le présent travail a pour objet d'aider à assurer la continuité écologique de la rivière en optimisant l'utilisation des passes à poissons. A moindre niveau, les études menées prennent place dans le processus de remplacement et de modernisation des passes à poissons situées dans le bassin de la Meuse. A plus petite échelle, une passe à poissons spécifique de Wallonie sera étudiée, celle de Rivière. L'étude de cette passe en particulier se justifie par le fait que son modèle réduit a déjà été construit. Celui-ci se trouve actuellement à Châtelet, dans le hall d'essais du Laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie. Deux espèces migratrices seront observées : le saumon atlantique (*Salmo salar*) et l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*). L'observation de ces espèces permettra de compléter les différents travaux déjà effectués sur le sujet.

La Meuse et ses barrages

La Meuse est un fleuve qui prend sa source dans la commune de Le Châtelet-sur-Meuse, dans le département de la Haute-Marne (France). Elle poursuit son cours à travers la Belgique et les Pays-Bas et après avoir parcouru une distance de 950 [km] se jette dans la Mer du Nord. Son bassin versant d'une superficie de 36 000 [km²] s'étend également jusqu'en Allemagne et au Grand-Duché du Luxembourg (Figure [1.1]). Un tiers de ce bassin versant est situé en Wallonie.

Au cours de la Révolution Industrielle du 19^e siècle, la Meuse, considérée comme un grand axe navigable en Wallonie, a joué un rôle prépondérant dans le transport fluvial. Elle reliait notamment les villes de Dinant, Namur et Liège. Dans un contexte de croissance économique portée par la sidérurgie et le charbon, la domestication des voies navigables était un enjeu considérable. Afin d'augmenter la cadence fluviale, de nombreuses rivières ont été canalisées et dotées de barrages. La Meuse ne fut pas épargnée par ces travaux. Ces

modifications ont permis de réguler les niveaux d'eau des voies navigables en toute saison. Evidemment, ces changements ont transformé la morphologie des rivières et provoqué, outre des soucis d'accumulation de sédiments au pied des barrages, une discontinuité écologique perturbant les espèces piscicoles migratrices.



FIGURE 1.1 – Situation géographique du bassin versant de la Meuse ([Wikipedia, 2020b](#)).

La prise de conscience de ce problème environnemental ne s'est véritablement faite que lors de la deuxième partie du siècle précédent. C'est à partir de 1982 que les rénovations des ouvrages d'art de la Haute-Meuse ont débuté dans le but de les équiper d'une passe à poissons fonctionnelle. A la suite de cela, des dispositions ont été prises en avril 1996 par le Benelux afin de moderniser ces ouvrages hydrauliques. Ces mesures avaient pour objectif de rendre leur accès possible pour les grands poissons migrateurs pour l'année 2010. Dans le cadre du projet *Meuse Saumon 2000* (voir infra) une analyse de l'efficacité des passes à poissons des quinze barrages de la Meuse belge (Figure [1.2]) a été effectuée en 2007. Cinq passes répondaient aux normes : Hastière, Waulsort, Ivoz-Ramet, Monsin et Lixhe. Sept passes devaient être modernisées : Anseremme, Dinant, Houx, Hun, Rivière, Tailfer et La Plante. Trois ont été déclarées comme étant non fonctionnelles : Grands-Malades, Andenne et Ampsin-Neuville.

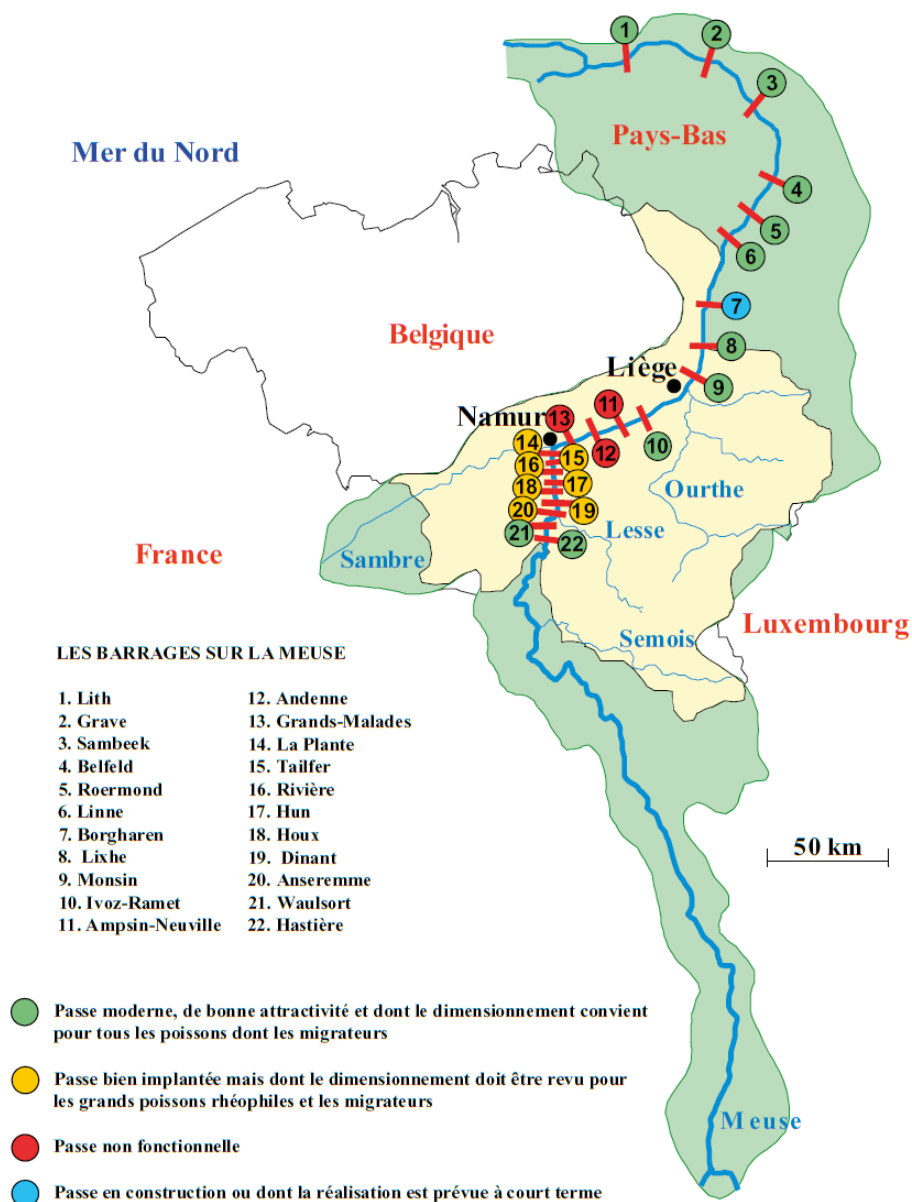


FIGURE 1.2 – Recensement des quinze barrages de la Meuse belge (Malbrouck et al., 2007).

Projet Saumon 2000

Parallèlement aux travaux d'adaptation du réseau fluvial qui visent à garantir la continuité écologique, une politique visant à repeupler les rivières de nos régions de salmonidés a été mise en place. Avec la Révolution Industrielle (1840), le saumon a été, dans nos régions, victime de la pollution, de la surpêche, du braconnage et des obstacles érigés par l'Homme. Malgré quelques efforts entrepris dans les années 1880 (limitation de la pêche, repeuplement artificiel, construction d'échelles à poissons), il disparut complètement de nos rivières dès 1930.

Au début des années 1980, une amélioration de la qualité des eaux a permis de constater le retour de la truite (membre de la famille des salmonidés) dans les rivières ardennaises. Cette observation a conduit à la création du projet *Meuse Saumon 2000*. Ce projet voit le jour en Wallonie en 1987 et affirme clairement son ambition : réintroduire le saumon

atlantique dans le bassin mosan. Cette action s'inscrit dans la lignée de projets similaires entamés en Amérique du Nord et en Europe occidentale. Afin de permettre ce processus, deux objectifs ont été fixés : ajuster les passes à poissons existantes aux exigences des grandes espèces migratrices et augmenter la population des saumons en gérant de manière artificielle leur reproduction.

Directives belges pour l'anguille

Conjointement aux mesures engagées pour le saumon atlantique, d'autres espèces vont également profiter de la restauration des passes à poissons. C'est le cas de l'anguille dont la population a baissé de manière inquiétante partout dans le monde. La quantité d'individus d'anguilles européennes a diminué de moitié entre 1960 et 1990 tandis que le nombre de civelles (alevins de l'anguille) est passé à 1% entre 1900 et 2000 (Philippart et al., 2010). Ceci s'explique par la diminution du nombre de géniteurs capables de se reproduire en mer pour l'ensemble des raisons citées à la section [1.1.1].

Dans un cadre plus restreint, différentes observations ont pu être faites sur la mortalité des anguilles le long de la Meuse. La grande majorité des cadavres a été découverte avec des mutilations provoquées par les turbines hydroélectriques. Différentes études ayant pour objectif de démontrer le lien entre mortalité et turbines hydroélectriques ont été menées. Certaines seront reprises dans le présent mémoire en guise d'illustrations. La première étude a été menée sur la partie néerlandaise de la Meuse en septembre 2002. Celle-ci a indiqué un taux de franchissement vers l'aval de 37% et une mortalité avoisinant les 20% (Winter et al., 2006). La deuxième, qui s'est déroulée entre 2001 et 2005, a montré qu'une anguille sur cinq trouvait la mort lors de son passage aux barrages de Linne, Lixhe ou Tihange, en Belgique (Philippart and Ovidio, 2009). La troisième a mis en évidence le fait que ce chiffre peut monter à 50% localement dans le cas de turbines Kaplan et vers une mortalité cumulée de 90% sur l'ensemble de la Meuse belge (Dumonceau, 2013). Ces trois rapports non exhaustifs témoignent d'une importante mortalité incompatible avec une approche de préservation de l'espèce. La sauvegarde de l'anguille doit passer par une modernisation et une offre accrue des dispositifs de contournement d'obstacles tels que les passes à poissons.

C'est à la suite de ces analyses (également observées dans d'autres régions que le bassin mosan comme sur la rivière Drawa au nord de la Pologne par exemple (Dębowski et al., 2016)) que l'Europe a adopté un règlement européen publié le 18 Septembre 2007 : le Règlement (CE) N° 1100/2007 du Conseil instituant des mesures de reconstitution du stock d'anguilles européennes. Ce règlement établit les mesures de rétablissement des réserves d'anguilles européennes. Son principal objectif pour le Benelux est de pouvoir assurer une migration réussie en mer du Nord de 40% de la biomasse des anguilles (Vlietinck et al., 2008). A la suite de ces recommandations, plusieurs opérations pilotes ont été lancées sur le bassin mosan. En 2008, pour les neuf barrages hydroélectriques de la Haute-Meuse, une mortalité maximale de 20% pour les anguilles et 10% pour les salmonidés a été préconisée (Philippart and Ovidio, 2009).

Passe à poissons de Rivière

Rivière est un village de la commune de Profondeville dans le namurois. Elle fait partie des entités comprenant l'une des quinze passes à poissons situées sur le parcours de la

Meuse belge (Figure [1.3]).



FIGURE 1.3 – Situation du barrage de Rivière (en rouge) et de sa passe à poissons (en blanc).

C'est dans le cadre d'une politique de préservation des espèces migratrices et de rénovation des dispositifs de franchissement que la passe à poissons de Rivière a été construite. L'ouvrage de franchissement est calqué sur le principe des passes à bassins à fentes verticales. Son principe est expliqué à la section [1.2.2]. Ses dimensions après modernisation seront les suivantes : 45 [m] de long, bassins de 5 [m] de long pour 3 [m] de large et une hauteur d'eau de 1 [m]. Elle fait partie des dix ouvrages à moderniser suivant les recommandations indiquées par le projet *Meuse Saumon 2000*. Les travaux de modification des passes sont rendus nécessaires en raison soit de trop faibles dimensions, soit d'un débit d'attrait trop faible. A terme, les adaptations apportées devraient rentrer dans les normes de convenance des grands poissons migrateurs.

Un modèle réduit à l'échelle 1 : 5 de la passe à poissons de Rivière a été construit en 2013. Celui-ci se trouve à Châtelet, au Laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie. Différentes études ont déjà été enregistrées au moyen de ce modèle réduit. Les dimensions et plans finaux ont été revus et clôturés pour la dernière fois en 2016 (Zorzan et al., 2016).

L'intérêt du modèle réside dans le fait qu'il est toujours présent au hall d'essais de Châtelet. Ainsi, de nouvelles études ou travaux portant sur les passes à poissons peuvent être effectués sur ce modèle réduit qui présente des avantages par rapport à un modèle à taille réelle. A présent, les résultats de l'utilisation du modèle permettent de dégager des critères généraux pouvant être appliqués à d'autres passes. En effet, celui-ci a permis, grâce aux travaux les plus récents, d'étudier des tendances générales sur le comportement de matériel vivant au sein d'une passe à poissons. Les autres dispositifs de franchissement du bassin mosan possèdent des propriétés similaires ou transposables à la passe à poissons de Rivière. C'est pourquoi les résultats obtenus ont pu être extraits du modèle et extrapolés à d'autres ouvrages.

1.2 Les ouvrages de franchissement

Ce chapitre présente les différents ouvrages de franchissement existants. Les éléments présentés dans la suite de ce travail sont extraits pour l'essentiel des ouvrages suivants :

- *Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement* (Larinier et al., 1994).
- *Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes* (Baudouin et al., 2014).
- *Manual for provision of upstream migration facilities for eel and elver* (Solomon and Beach, 2004).

1.2.1 Définition

Un ouvrage de franchissement peut être défini comme toute forme de structure permettant de faciliter le passage des poissons afin d'assurer une liberté de circulation pendant les périodes de migration, à travers, au-dessus ou encore autour d'un obstacle naturel ou d'origine humaine, tant pour des cas de montaison que de dévalaison (Armstrong et al., 2004). Pour diverses raisons, il est possible qu'un cours d'eau soit coupé transversalement au sens de l'écoulement en un ou plusieurs points de son tracé (barrages, écluses, etc.). La migration des poissons se voit donc interrompue. La construction d'ouvrages de franchissement permet de faciliter la montaison et/ou la dévalaison des espèces.

Le principe général des dispositifs de franchissement consiste à attirer les migrateurs en un point déterminé du cours d'eau à l'aval de l'obstacle. Ils sont conçus de façon à inciter, voire à obliger les poissons d'accéder à l'amont. Ceci se réalise en leur ouvrant une voie d'eau (passes à poissons stricto sensu) ou en les piégeant dans une cuve qui sera directement déversée à l'amont (ascenseurs et systèmes de piégeage et de transport) (Larinier et al., 1994).

Selon Larinier et al. (1994), les objectifs des aménagements d'obstacles à la circulation sont :

- la minimisation des impacts de l'équipement hydraulique sur le cycle biologique des migrateurs dans le but de maintenir ou d'augmenter le stock ;
- dans un nombre plus réduit de cas, l'exploitation de l'espèce sur un territoire plus vaste, dans la mesure où celle-ci reste compatible avec le maintien du stock.

Une passe est qualifiée d'*efficace* lorsque les poissons en trouvent l'entrée et la franchissent sans retard. De plus, le migrateur ne doit pas s'y occasionner des blessures préjudiciables à sa remontée. Une passe à poissons doit tenir compte de certains aspects du comportement des espèces ciblées afin d'être efficace :

- Les conditions hydrodynamiques et le respect de vitesses. En effet, il s'agit là de respecter les vitesses de nage de toutes les espèces ciblées.
- Les conditions d'écoulement telles que la hauteur de chute, l'aération, la turbulence ou les zones de recirculation.
- Les paramètres physico-chimiques de l'eau.
- L'intensité de la luminosité ambiante.

1.2.2 Types de dispositifs de franchissement

Cette section présente les différents dispositifs de franchissement qui facilitent la migration des poissons en cas d'obstacle.

Les passes à bassins successifs

L'objectif des passes à bassins successifs est de relier les niveaux d'eau à l'aval et à l'amont de l'obstacle en divisant la hauteur de chute en paliers de plus faible hauteur. La pente de ce genre de passe varie le plus souvent entre 10% et 15%. Par analogie, ce type de passe peut être assimilé à un escalier.

Dans ce genre de dispositifs, les cloisons qui séparent les différents bassins peuvent être aménagées de différentes manières : soit à l'aide d'un déversoir afin que l'écoulement de l'eau soit dit *de surface*, soit au moyen d'un ou de plusieurs orifices noyés, soit encore par le biais d'une ou de plusieurs fentes ou échancrures à travers lesquelles l'eau peut s'écouler. Il est possible que des passes à poissons soient dites *mixtes* lorsque les cloisons sont aménagées au moyen de plusieurs dispositifs différents cités ci-dessus. C'est par exemple le cas lorsque ces cloisons combinent à la fois un écoulement de surface par déversement et un écoulement noyé à travers un ou plusieurs orifices.

Le rôle des bassins est double : ils permettent de dissiper l'énergie de l'eau qui s'écoule dans la passe et d'assurer des zones de recirculation, où les débits sont moins importants, afin que les poissons puissent s'y reposer. Des informations supplémentaires concernant les points d'attention liés au dimensionnement de ce genre de passe seront données par la suite (voir section [4.1.2]).

Les passes à échancrures latérales profondes et à orifices noyés

Il s'agit d'une passe à bassins successifs mixte. Les cloisons sont aménagées d'orifices de fond et d'échancrures latérales situées à l'opposé les unes des autres (Figure [1.4]). Pour réduire le décollement dans l'échancrure et stabiliser l'écoulement, un déflecteur est ajouté sur la face amont de la cloison.

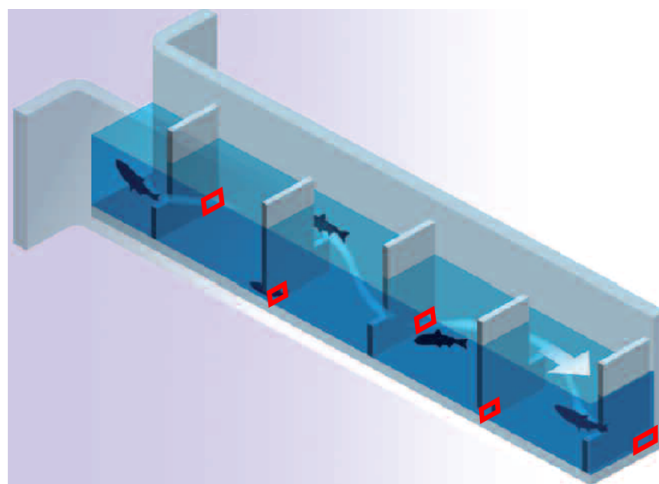


FIGURE 1.4 – Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à échancrures latérales et orifices de fond (en rouge) (Baudouin et al., 2014).

Les passes à fentes verticales

Ce type d'ouvrage a été développé en premier lieu pour permettre aux saumons de remonter les rapides de Hell's Gate sur la rivière Fraser au Canada. Le modèle possédait deux fentes verticales par cloison (Figure [1.5-a]). De cette façon, les jets sortants des deux fentes convergent et se rencontrent dans la partie centrale du bassin. L'énergie des jets s'y dissipe efficacement et crée des zones de recirculation au niveau des parois latérales et à l'amont du bassin, juste derrière la cloison (en rouge sur la Figure [1.5-b]). Ces zones sont plus calmes et permettent aux poissons de s'y reposer au cours de leur remontée.

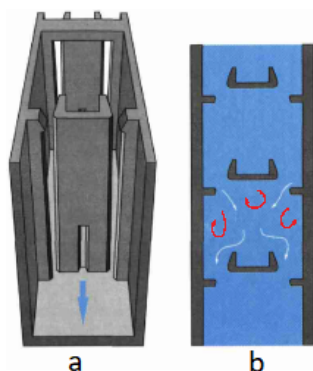


FIGURE 1.5 – Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à deux fentes verticales. (a) vue 3D d'une cloison, (b) vue en plan des bassins et de l'écoulement (Larinier et al., 1994).

Suivant la même idée que la passe à deux fentes verticales, il existe son homologue à une seule fente (Figure [1.6-a]). A nouveau, dans ce genre de dispositif, des zones de recirculation apparaissent (en rouge sur la Figure [1.6-b]) dans le but d'offrir des endroits où les poissons peuvent marquer une pause lors de leur montaison.

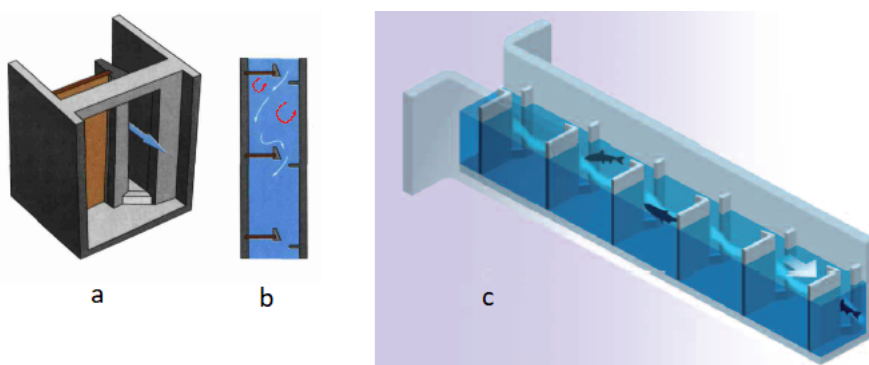


FIGURE 1.6 – Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à une fente verticale. (a) vue 3D d'une cloison, (b) vue en plan des bassins et de l'écoulement, (c) schéma de principe (Larinier et al., 1994; Baudouin et al., 2014).

Le principal avantage de ce genre de passe est sa fonctionnalité sans faille même pour de grandes variations de hauteur des niveaux amont et aval, à condition que ces variations soient d'un ordre de grandeur équivalent.

Les passes à échancrures triangulaires

Les dispositifs à échancrures triangulaires sont originaires de la côte ouest des Etats-Unis (voir Figure [1.7]). Ce genre de système a été mis au point afin d'être fonctionnel pour une large gamme de débits et de niveaux amont sans qu'il soit pour autant nécessaire de mettre en place des dispositifs servant à réguler ces débits ou d'ajouter des débits d'appoint dans la section aval. En période d'étiage, la passe se comporte comme une passe normale et fonctionne en surverse au-dessus de la cloison.

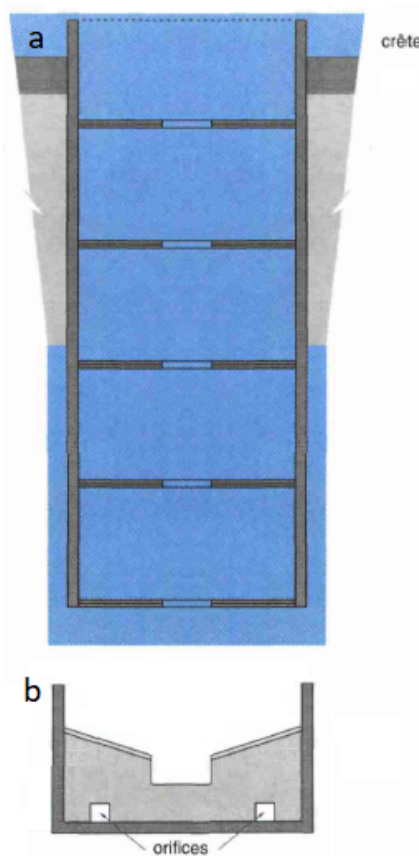


FIGURE 1.7 – Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à échancrures triangulaires. (a) vue en plan, (b) vue en coupe (Larinier et al., 1994).

Les prébarrages

Ce type de dispositif est adapté au franchissement d'obstacles de faible hauteur. Plusieurs seuils successifs divisent la chute en plusieurs grands bassins (Figure [1.8]). Cette passe est installée sur toute la largeur de l'obstacle dans le cas de petits cours d'eau. Pour les rivières de taille plus importante, il sera situé sur l'une des deux rives afin de faciliter l'entretien de l'ouvrage. Le prébarrage est surtout adapté aux salmonidés car l'écoulement entre deux bassins successifs est plongeant dans la plupart des cas. Cependant, si la hauteur de l'obstacle est limitée, il est possible d'adapter ce genre de passe en diminuant la différence de hauteur et en aménageant un écoulement à jets de surfaces entre deux bassins successifs.

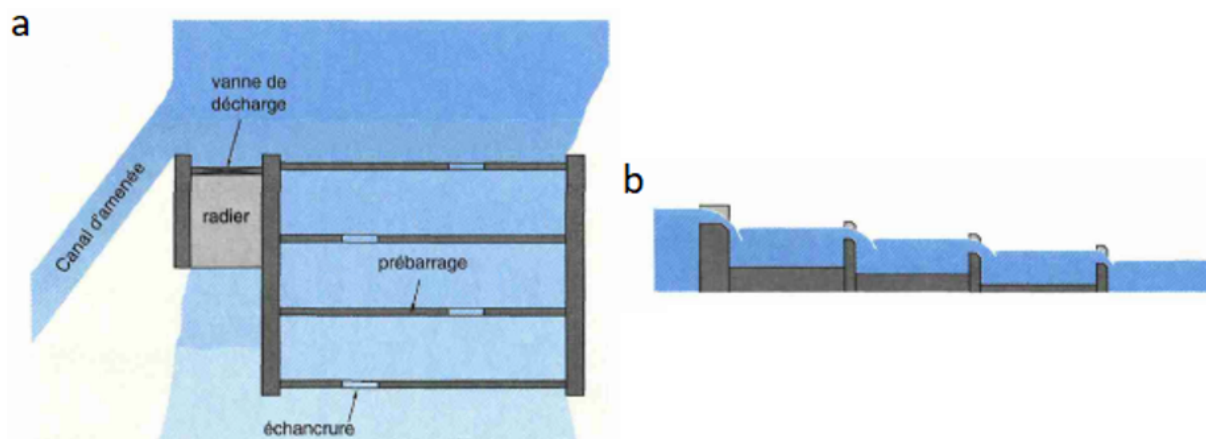


FIGURE 1.8 – Schéma du principe de fonctionnement d'un prébarrage. (a) vue en plan d'un prébarrage, (b) vue en coupe d'un prébarrage (Larinier et al., 1994).

Les passes dites *rampes en enrochements*

Les passes dites *rampes en enrochements* ou encore *rivières artificielles* reproduisent grossièrement les caractéristiques d'un cours d'eau naturel à forte pente. Il s'agit d'un chenal qui relie les niveaux aval et amont de l'obstacle à franchir dont la pente est plus ou moins faible (entre 1-2% jusqu'à 8-10%) selon l'espèce ciblée. Le but est d'y dissiper l'énergie et d'y réduire les vitesses par le biais de rugosités de fond et de parois. En pratique, cela se réalise via la mise en place d'enrochements et de blocs répartis plus ou moins régulièrement. Ce genre de dispositif peut être construit sur toute la largeur de la rivière, sur une rive ou encore par contournement. On distingue deux types principaux de rivières artificielles qui dépendent de la disposition des enrochements : les passes à singularités régulièrement réparties et les passes à rangées périodiques.

Les passes à singularité régulièrement réparties

Dans cette configuration, la dissipation d'énergie et la réduction des vitesses se fait à l'aide de blocs répartis plus ou moins régulièrement sur un fond constitué d'enrochements (Figure [1.9]). Les zones situées à l'aval des blocs peuvent servir de zone de repos pour les migrateurs.

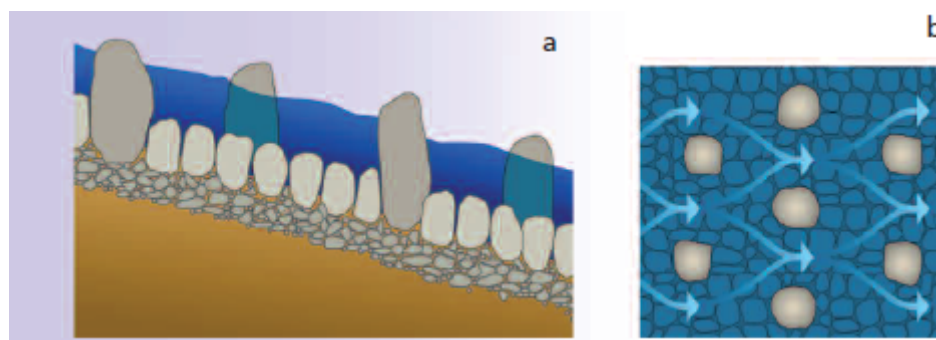


FIGURE 1.9 – Schéma du principe de fonctionnement d'une rampe à singularités régulièrement réparties. (a) vue en coupe, (b) vue en plan (Baudouin et al., 2014).

Les passes à rangées périodiques

Dans cette configuration, des hauteurs d'eau suffisantes sont conservées tout en évitant des débits trop importants. Le principe est d'agencer des rangées de blocs à intervalles réguliers (Figure [1.10]). Entre chaque rangée, des *bassins* sont formés. Ils peuvent servir de zone de repos pour les migrateurs.

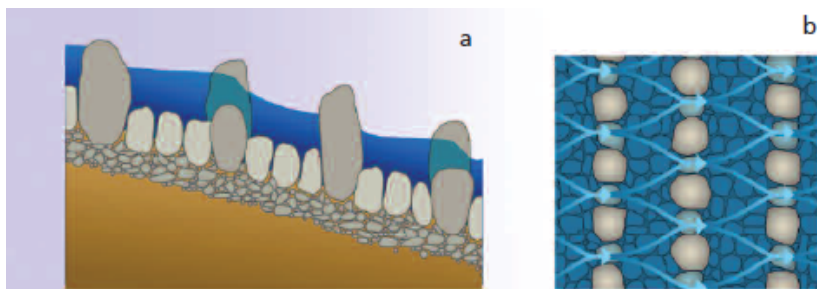


FIGURE 1.10 – Schéma du principe de fonctionnement d'une rampe à rangées périodiques. (a) vue en coupe, (b) vue en plan (Baudouin et al., 2014).

Les passes à anguilles

Les performances natatoires de l'anguille sont inférieures à celles des autres espèces de même taille en raison de leur type de nage (voir section [3.3.2]) et de leur morphologie. Le franchissement des obstacles peut se faire soit à travers les passes à poissons classiques, soit à travers des passes spécifiques aux civelles et anguillettes.

Le passage dans les passes à poissons classiques

Le passage de l'anguille dans les passes à poissons classique (dimensionnées pour d'autres espèces) n'est pas chose aisée pour l'anguille dû à ses capacités de nages limitées. Peu d'observation à ce sujet sont disponibles. Des observations visuelles sur des passes à parois vitrées montrent que l'anguille peut tirer profit des faibles vitesses associées aux couches limites ou des décollements et des hétérogénéités d'écoulement dans les zones à vitesses élevées (Larinier et al., 1994). La mise en place de rugosités de fond telles que des brosses pourrait améliorer l'efficacité des passes classiques au franchissement des anguilles.

Les passes spécifiques à civelles et anguillettes

Les passes à anguilles exploitent ses facultés de reptation. Celles-ci lui sont conférées par sa morphologie particulière et ses capacités de respiration cutanée. Les plus petits individus (inférieurs à une douzaine de centimètres) ont la particularité de pouvoir *escalader* des parois verticales humides sans appui. Ils utilisent pour ce faire la tension superficielle qui est créée entre leur corps et la paroi afin de s'y maintenir (Figure [1.11]).

En grandissant, le rapport qui existe entre le poids des anguilles et la tension superficielle augmente. Ce dernier est proportionnel à la longueur de l'espèce. De ce fait, elles perdent leur capacité à escalader les parois verticales sans appui. Lorsqu'elles sont plus grandes, elles doivent pouvoir prendre appui afin d'utiliser efficacement leurs facultés de reptation.

Le franchissement de l'obstacle est rendu possible par une rampe équipée d'un substrat facilitant la progression des anguilles (voir Figure [1.12]). Les performances de reptation et de capacité de franchissement sont alors fonctions de la taille, de la nature et de la densité du substrat ainsi que de l'alimentation et de la pente de l'ouvrage de franchissement. Des informations supplémentaires concernant les points d'attention liés au dimensionnement de ce genre de passe seront données par la suite (voir section [4.1.3]).



FIGURE 1.11 – Civelles remontant des parois verticales (Baudouin et al., 2014).

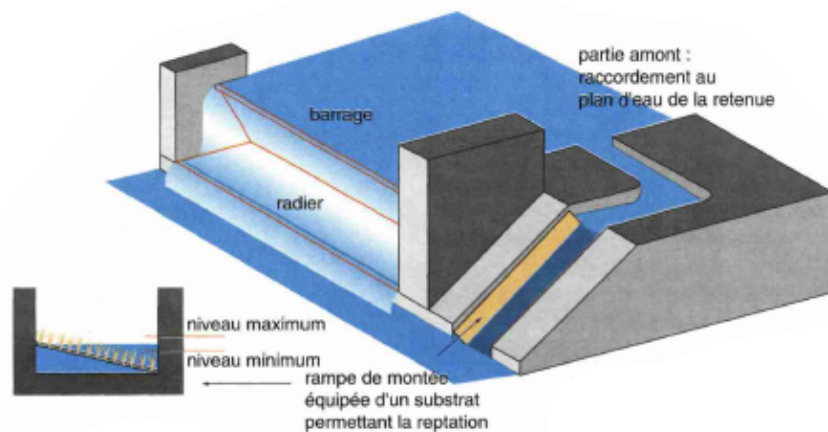


FIGURE 1.12 – Schéma de fonctionnement d'une passe spécifique à civelles et anguillettes (Larinier et al., 1994).

Les passes à ralentisseurs

Originaires de Belgique, ces passes ont été initialement développées dans l'optique de permettre aux saumons de franchir le barrage d'Angleur sur l'Ourthe. Le principe de ce dispositif est d'installer des déflecteurs sur le fond et/ou les parois d'un canal rectangulaire à pente relativement forte dans le but de réduire les vitesses moyennes de l'écoulement. Les déflecteurs servent à dissiper l'énergie dans l'écoulement par la création de courants secondaires hélicoïdaux qui assurent un transfert important de quantité de mouvement. Ce genre de passe a la particularité de ne pas disposer de zones de repos. Les migrateurs doivent donc la traverser d'une traite. Dans le cas où la pente est trop importante pour que le poisson puisse la franchir sans dépasser ses capacités d'endurance, la passe peut être fractionnée en un ou plusieurs bassins de repos.

Adaptées aux poissons d'eau courante de grande taille (comme les grands salmonidés migrateurs, les lamproies marines, les grosses truites ou le barbeau), ce genre de passe présente un écoulement caractérisé par des vitesses et une aération importantes. De manière générale, ce dispositif est réservé à des espèces dont la taille est supérieure à 30 [cm]. En diminuant la taille des ralentisseurs, il est tout de même envisageable d'utiliser cette passe pour des espèces de taille inférieure. Néanmoins, lorsque la passe est sous-alimentée, c'est-à-dire lorsque le débit est trop faible pour amorcer les courants hélicoïdaux, elle fonctionne comme une mini-passe à bassins. Cela permet donc aux poissons de petite taille de la franchir en utilisant la zone inter-ralentisseurs afin de se reposer.

On distingue trois catégories de passes à ralentisseurs qui sont fonction de leur disposition au sein de la passe :

- Les ralentisseurs suractifs sont uniquement disposés **sur le fond** d'un canal horizontal (Figure [1.13]). Cette méthode fonctionne sur une grande gamme de débits mais ne tolère qu'une variation modérée du niveau amont.

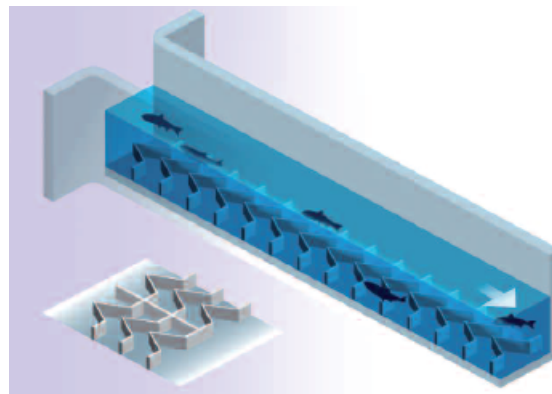


FIGURE 1.13 – Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à ralentisseurs suractifs de fond (Baudouin et al., 2014).

- Les ralentisseurs sont disposés **sur le fond et sur les côtés** du canal (Figure [1.14]). Cette méthode fonctionne avec des variations de niveaux plus importantes. Toutefois, puisque l'élément limitant la largeur du ralentisseur est la taille du poisson, le débit est limité et ne peut pas dépasser quelques centaines de [L/s].

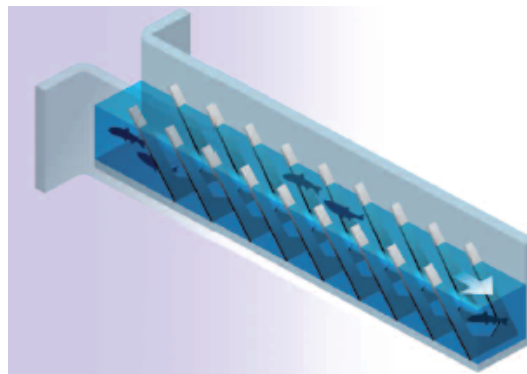


FIGURE 1.14 – Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à ralentisseurs plans (Baudouin et al., 2014).

- Les ralentisseurs sont uniquement disposés **sur les côtés** du canal. Cette méthode fonctionne quant à elle avec des variations de niveaux qui peuvent être importantes. Cependant, elles sont vulnérables à l'encrassement par des branchages et autres matériaux transportés par la rivière. C'est pour cette raison qu'elles sont peu utilisées.

Les écluses à poissons

Le principe des écluses à poissons suit la même idée que les écluses utilisées pour la navigation. Ce genre de dispositif est constitué du sas qui est ensuite éclusé pour remonter les poissons vers le niveau amont à travers une conduite (Figure [1.15]). Ce genre de dispositif montre cependant quelques limites puisqu'il dépend fortement du comportement de l'espèce. En effet, le poisson doit d'abord rester dans le sas aval pendant toute la phase d'attrait. Cette étape est définie par la période durant laquelle la vanne aval est ouverte et que le poisson est attiré par le courant d'alimentation du dispositif. Ensuite, il doit suivre le niveau de l'eau qui monte pendant la phase de remplissage. Finalement, il faut qu'il sorte du sas amont avant que la phase de vidange du dispositif ne commence. C'est pour cette raison qu'elles sont très peu utilisées à l'heure actuelle.

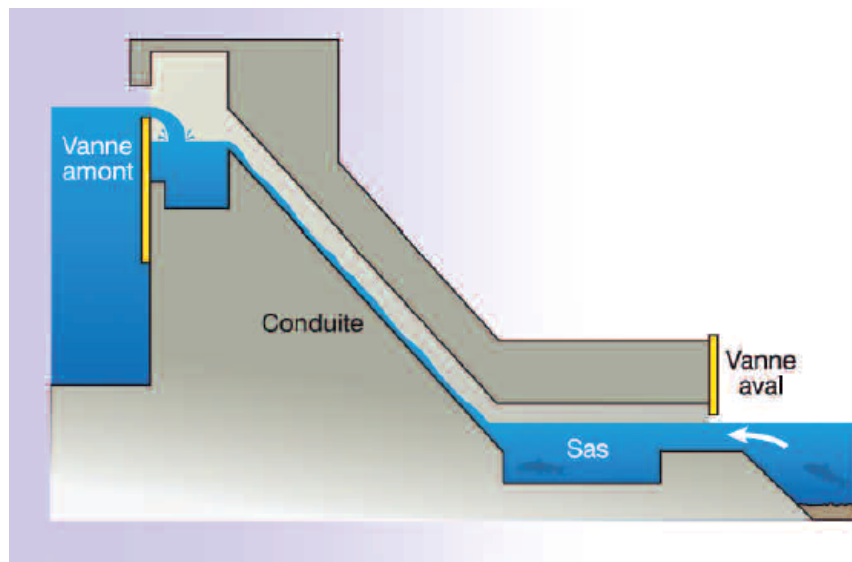


FIGURE 1.15 – Schéma du principe de fonctionnement d'une écluse à poissons (Baudouin et al., 2014).

Les ascenseurs à poissons

Ce genre de dispositif est composé d'une cuve, au pied de l'obstacle, dans laquelle les poissons sont attirés via un débit d'attrait. Cette cuve grillagée est munie en partie haute d'un dispositif anti-retour et en partie basse de la cuve de transport. Ensuite, la cuve est remontée mécaniquement jusqu'au sommet de l'obstacle pour finalement déverser son contenu dans le plan d'eau amont (Figure [1.16]).

Les avantages de cette méthode par rapport aux autres types de passes sont divers : l'ascenseur à poissons est moins coûteux, indépendant de la hauteur de chute à franchir, peu encombrant et insensible aux variations du niveau d'eau amont. Ce genre de dispositif est généralement construit lorsque la chute à franchir dépasse 10 mètres de haut. Son

inconvenient principal réside dans ses coûts de fonctionnement plus élevés que les autres types de passes. De plus, en raison de la probabilité de panne du système de levage, la disponibilité de l'ouvrage est plus limitée. En outre, puisque la cage de capture est faite d'un grillage, l'ascenseur à poissons montre ses limites pour les plus petites espèces.

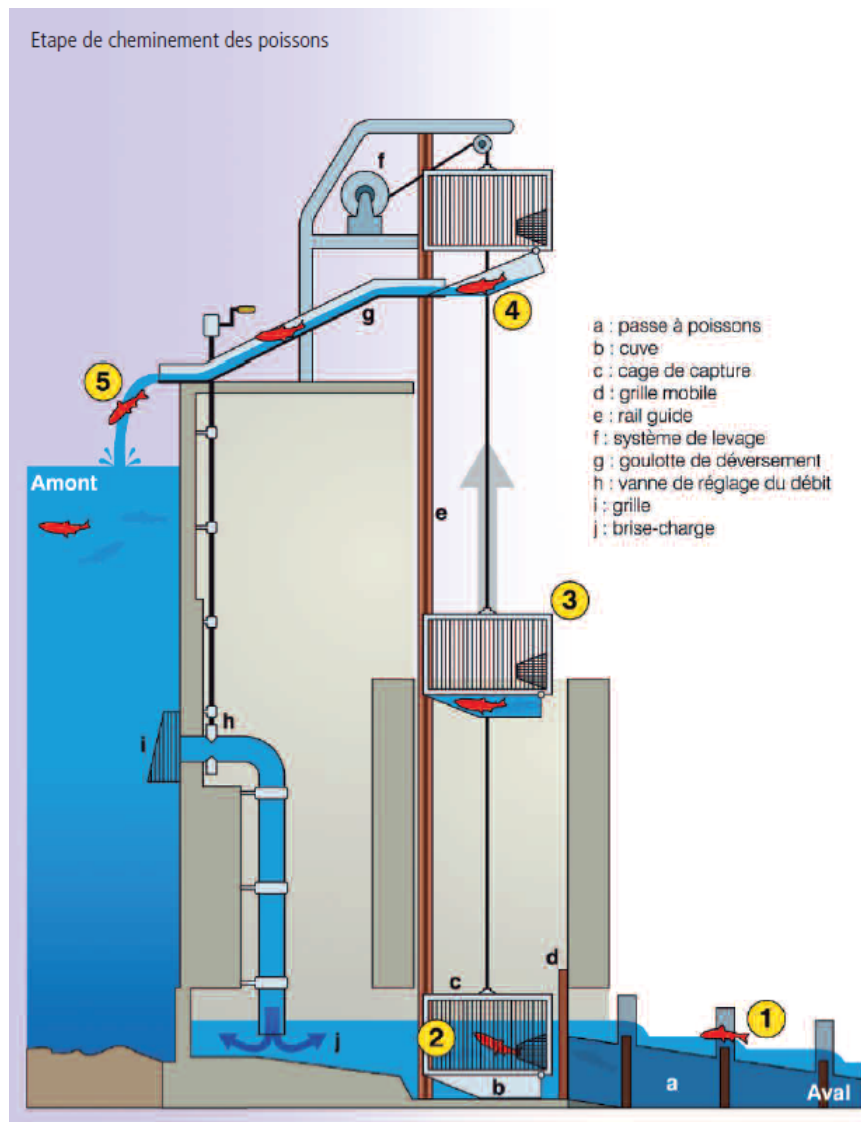


FIGURE 1.16 – Schéma du principe de fonctionnement d'un ascenseur à poissons (Baudouin et al., 2014).

Les ouvrages à marées

Les ouvrages à marées sont pour la plupart des cas construits pour retenir l'entrée d'eau salée vers l'amont de la rivière. Ces dispositifs sont donc problématiques pour la remontée de certaines espèces qui profitent des courants lors du flot pour progresser vers l'amont. Certains ouvrages de marées servent aussi à stocker l'eau apportée durant la marée haute lors de la marée basse. Dans ce cas de figure, le dispositif est peu problématique car les migrations anadromes (voir définition à la section [3.2.2]) se font le plus souvent durant le flot.

1.3 Objectifs et Enjeux

Parmi les interrogations laissées en suspens par le Service Public de Wallonie, nous en avons retenu deux. La première s'intéresse à l'influence de l'ombrage qui permettrait d'améliorer les conditions de remontée des poissons à faible coût. La seconde concerne l'adaptation des passes à bassins habituellement réservées aux espèces salmonicoles à une autre espèce pour laquelle aucune étude n'a encore été menée : l'anguille jaune. C'est sur cette base que nous avons développé nos objectifs et nos recherches documentaires.

1.3.1 Travaux précédents

Quatre études ont été effectuées depuis la construction du modèle réduit.

La première étude fut pilotée par [Bagnée and De Greef \(2014\)](#). Celle-ci a permis de caractériser les vitesses d'écoulement de la nouvelle passe à poissons de Rivière de façon discrète. La modélisation numérique s'est faite de façon bi- et tridimensionnelle à l'aide du logiciel d'éléments finis TELEMAC.

Pour la deuxième étude, il a été décidé d'entreprendre des essais qui manipulent du matériel vivant. Une première série de tests a visé à analyser le comportement et le taux de franchissement des salmonidés de la passe à poissons. Cette étude fut menée par [Pype \(2015\)](#). Les expériences ont donné des résultats concluants sur la remontée des poissons compte tenu des bonnes capacités de nage des espèces salmonicoles.

Vu les résultats encourageants obtenus pour le saumon atlantique, [Courtois and Van Audenhaege \(2017\)](#) ont tenté d'évaluer la possibilité de franchissabilité de la passe à d'autres types d'individus dans une troisième étude. Le comportement et les remontées de plusieurs espèces mosanes ont ainsi été analysées. La capacité de montaison des saumons atlantiques et des chevesnes est confirmée, elle s'envisage pour les ablettes mais est remise en cause pour les chabots. L'hypothèse de difficulté de montaison avancée pour le chabot est son absence de vessie natatoire. Ceci l'oblige à nager sur le fond de la rivière. C'est une espèce dite benthique, c'est-à-dire qui vit dans le fond des mers ou des cours d'eau.

En réponse à ces résultats insatisfaisants rapportés pour les chabots, une quatrième étude exploita l'idée de doter le fond de la passe d'un substrat. L'étude de ce substrat ainsi que son optimisation, autant géométrique que spatiale, ont été réalisées par [Bodarwé and Cabo \(2018\)](#). C'est ainsi que les remontées des espèces benthiques comme la loche et le chabot ont été observées. La montaison des hotus, considérés comme de bons nageurs, a également été étudiée pour servir de base de comparaison avec les espèces benthiques. Les résultats récoltés tendent vers une amélioration de la franchissabilité pour les espèces benthiques sans pour autant entraver la remontée des espèces rhéophiles (présents dans la colonne d'eau).

Il faut garder à l'esprit que les résultats collectés au cours de ces travaux s'apparentent à des tendances. Celles-ci ne peuvent donc pas être assimilées à des acquis généralisables à tous les individus d'une même espèce et a fortiori à d'autres espèces.

1.3.2 Objectifs

Les objectifs de notre travail sont pluriels. Ils tiennent compte des travaux et résultats effectués au cours des années précédentes mais étudient également deux problématiques non traitées à ce jour sur le modèle réduit de la passe à poissons de Châtelet :

- l’influence de l’ombrage sur l’attractivité et la franchissabilité des salmonidés ;
- la possibilité d’adapter une passe à bassins à échancrures verticales pour permettre la franchissabilité des anguilles.

Ces deux sujets ont pour but de compléter les études déjà menées sur les remontées d’une passe à poissons à caractère multi-espèces.

Un premier objectif suivi - en lien avec la problématique de l’ombrage - est de déterminer la relation qui pourrait exister entre l’éclairement d’une passe à poissons et les remontées d’individus. En effet, le présent travail cherche à la fois à montrer le lien qui pourrait exister entre attractivité et ombrage mais également entre franchissabilité et ombrage. Les concepts d’attractivité et de franchissabilité au sens du modèle réduit seront définis plus tard (voir Chapitre [7]). De plus, le modèle réduit possède des parois transparentes en plexiglass tandis que la passe réelle possède des parois opaques en béton. Dès lors, il est judicieux de rendre compte de l’influence de cette transparence sur la montaison des individus.

Le deuxième objectif s’appuie sur le travail mené par [Bodarwé and Cabo \(2018\)](#) sur les espèces benthiques à faible capacité natatoire. Il consiste à illustrer la possibilité d’équiper une passe à bassins à échancrures verticales au moyen de substrats de fond afin d’encourager la remontée des anguilles. Le substrat optimal déterminé au cours de leur étude servira de base de départ à cette analyse. Ce dernier devait en principe être adapté au cours du travail afin d’augmenter la franchissabilité de la passe par les anguilles.

Ce deuxième objectif n’a pas pu être réalisé dans des conditions optimales compte tenu de la situation exceptionnelle causée par le confinement lié à la pandémie de Covid-19. Les dispositions sanitaires prises par le gouvernement et les autorités facultaires ont ainsi modifié les plans initialement prévus. C’est pour cette raison que le deuxième objectif s’est vu annulé et remplacé par l’analyse d’une autre problématique. Le protocole expérimental qui lui était destiné sera toutefois présenté.

La nouvelle problématique consiste à observer l’influence des pentes transversale et longitudinale d’une rampe à anguilles sur la remontée de l’espèce. Ce questionnement a déjà été étudié par le passé, son but est de pouvoir confronter la réalité des dimensionnements de rampes existantes à une étude expérimentale et comportementale.

1.3.3 Enjeux

Les enjeux de l’étude sont de trois ordres. Le contexte global de ce travail dépasse le cadre de l’amélioration de la passe à poissons multi-espèces de Rivière. En effet, ses dimensions et paramètres ont été fixés et ils répondent aux attentes établies par les directives belges. Le but est à présent d’étudier des solutions d’amélioration des dispositifs de franchissement, à la fois sur l’attractivité et la franchissabilité, dans l’optique de pouvoir les transposer à d’autres ouvrages existants.

Ainsi, un des enjeux du travail est d'illustrer le fait que les passes à poissons pourraient être évitées par les poissons en raison de la trop grande visibilité qu'elles offrent aux prédateurs ailés. Etudier l'effet de l'ombrage peut répondre à cette question. Les tendances qui en seront retenues pourront s'appliquer à l'ensemble des dispositifs de franchissement.

Un autre enjeu est le fait de déterminer la possibilité d'adapter une passe à poissons afin de favoriser la remontée d'un spectre d'espèces plus large. Les passes à anguilles utilisées à l'heure actuelle sont des passes aux propriétés particulières (rampes à anguilles) qui répondent aux besoins spécifiques de l'espèce. Adapter une passe à bassins à échancrures verticales pour la montaison des anguilles permettrait d'évaluer l'hypothèse selon laquelle ces dernières n'ont finalement pas besoin d'un système d'aide qui leur est propre. Ces modifications pourraient également ouvrir des perspectives plus grandes et envisager la conception de dispositifs généraux, empruntés pour la remontée de l'ensemble des espèces aquatiques.

En raison des situations exceptionnelles rencontrées au cours de l'élaboration de ce mémoire, et déjà mentionnées ci-dessus, le deuxième enjeu au cœur du travail a dû être modifié. C'est pour cette raison que celui-ci consiste désormais à étudier les rampes à anguilles existantes et à valider les ouvrages actuels.

1.3.4 Commentaires généraux de l'état de l'art

Cette section a pour but de synthétiser les résultats et tendances obtenus pour l'ensemble des articles scientifiques traités au Chapitre [2]. Ceci permet d'insérer notre travail dans l'ensemble des études déjà menées pour les trois problématiques qui nous intéressent : l'ombrage, l'adaptation des passes à bassins pour les anguilles et l'influence des pentes d'une rampe à anguilles.

La majorité des études effectuées sur l'influence de l'éclairement des passes à poissons s'accorde à dire que les remontées sont plus nombreuses en période obscure. Les saumons comme les anguilles privilégient la nuit ou le crépuscule pour opérer leurs mouvements de migration. Cependant, il existe des conditions particulières qui contredisent ces tendances : urgence migratrice, remontées groupées, absence d'obscurité, smoltification (processus biologique qui prépare le jeune saumon à sa dévalaison vers la mer, voir section [3.4.1]), ajout de paramètres extérieurs (vitesses d'écoulement, rideaux à bulles). C'est ainsi que le présent travail tente de compléter ces résultats en montrant l'effet de l'ombrage sur la remontée des saumons en période de jour.

Différents dispositifs ont été utilisés afin de permettre le franchissement des barrages par les anguilles. Les passes à chicanes ont donné de mauvais résultats tandis que des résultats encourageants ont été obtenus pour les passes à brins. L'augmentation de la rugosité fait partie des points auxquels une attention toute particulière doit être réservée. D'autre part, l'attractivité de la passe augmente lorsqu'on est en présence d'un écoulement noyé. Enfin, l'utilisation des écluses est une piste à creuser compte tenu des très bons résultats de franchissabilité obtenus. Pour cette raison, modifier une passe à bassins existante en vue de l'adapter aux anguilles enrichirait les essais pratiqués et les connaissances actuelles en matière de franchissabilité d'obstacles par les anguilles.

Enfin, des tests opérés sur les conditions à adopter pour l'optimisation physique d'une rampe à anguilles ont montré certaines tendances géométriques qu'il faudrait suivre. Les rampes de pente longitudinale 30° et dotées d'une pente transversale présentent les meilleurs résultats. Par ailleurs, l'utilisation de certains substrats a montré de bons résultats même si le revêtement doté de plots semble être le plus efficace. Ceci suggère de poursuivre les études visant à trouver un substrat optimal qui pourrait être utilisé pour toutes les tailles d'anguilles. Ce défi reste majeur dans la continuité écologique et la survie de l'anguille.

Chapitre 2

Etat de l'art

Ce chapitre reprend de manière non exhaustive différents résumés d'articles scientifiques pertinents en lien avec les trois problématiques traitées. Ceux-ci documentent notre étude de façon plus globale et donnent des informations supplémentaires qui pourront être utiles à d'autres protocoles expérimentaux. Dès lors, il ne constitue pas un préalable obligatoire et peut être sauté par le lecteur non averti.

Dans un premier temps, quatre articles étudieront l'influence de la lumière (éventuellement combinée à d'autres paramètres) sur l'attractivité et la remontée de différents poissons au sein d'un ouvrage de franchissement. Dans un deuxième temps, quatre travaux montreront différents moyens qui ont servi d'alternatives aux rampes spécifiques pour des anguilles (ou des lamproies qui possèdent des capacités de nage similaires). Dans un troisième temps, deux études menées sur les conditions de pente et de rugosité des rampes à anguilles seront détaillées.

2.1 Articles traitant de l'ombrage

Article 1 : Influence of Water Flow, Water Temperature and Light on Fish Migration in Rivers (Jonsson, 1991)

Cet article met en évidence la tendance des juvéniles et des poissons adultes de différentes espèces à migrer préférentiellement durant la nuit dans le but d'éviter la prédation de jour durant lequel ils sont visibles. Les individus migrent pour deux raisons, soit afin de garantir la survie de l'espèce, soit afin d'assurer leur propre croissance. Il est ici question de l'influence de trois paramètres environnementaux sur la montaison et la dévalaison des poissons durant leur période migratrice : le courant, la température de l'eau et la lumière. Des relations qualitatives entre migration et intensité lumineuse ont pu être dégagées lors de la dévalaison et de la montaison.

Concernant la dévalaison des poissons, l'ensemble des espèces migre préférentiellement durant les périodes d'obscurité. La migration est d'ailleurs mise en suspens durant la journée si elle n'a pas pu être achevée durant la nuit. De plus, on observe une diminution de l'agitation des poissons sous la luminosité de la pleine lune ou de sources lumineuses artificielles. Ces observations se sont vérifiées pour différentes espèces. Les lamproies sont nocturnes, elles migrent durant la nuit ou lors des périodes de transition jour-nuit tandis qu'elles s'enterrent sous les sédiments en période de jour. Les anguilles européennes ont

également tendance à migrer la nuit et ont même une préférence pour la période la plus sombre de la nuit, lorsque l'intensité lumineuse de la lune est encore très faible. Les saumons quant à eux peuvent dévaler en période de jour dans des conditions d'eaux turbides. Au mois de juin, la plupart des individus privilégiaient la tranche horaire 14h-18h pour dévaler.

Les montaisons ont lieu quant à elles majoritairement au crépuscule ou en période d'obscurité pour différentes espèces. Les civelles montent entre 22h et 4h au mois de janvier et entre 21h et 7h au mois d'avril. Les lamproies montent durant la nuit aux périodes de nouvelle lune tandis que les saumons atlantiques privilégient également les périodes d'obscurité. Des montaisons de jour ont pu néanmoins être observées sous certaines conditions particulières. Soit dans le cas de montaisons en groupe avec de grandes quantités d'individus, soit dans le cas d'eaux turbides durant de grandes crues.

Ainsi, l'article permet d'affirmer la préférence des individus à migrer durant les périodes d'obscurité que cela soit pour la dévalaison ou la montaison. Des migrations de jour ont cependant lieu dans certains cas particuliers : eaux turbides, migration groupée, zones avec des latitudes caractéristiques d'un *soleil de minuit* où la nuit ne tombe pas.

Article 2 : Behaviour of Atlantic salmon smolts approaching a bypass under light and dark conditions. Importance of fish development (Tétard et al., 2019)

Cette étude prend place dans le cadre de l'impact de la fragmentation des rivières en raison de l'implantation d'ouvrages humains tels que les barrages. Le comportement à la lumière de cent smolts a été analysé aux abords du barrage de Poutès sur la rivière Allier, un affluent de la Loire. Ce barrage utilise des turbines Francis responsables de nombreuses mutilations lors de la migration des saumons atlantiques.

Le saumon est une espèce anadrome qui migre vers l'océan au printemps afin de se nourrir et retourne en rivière en automne-hiver pour s'y reproduire. La smoltification déclenche le processus de maturation sexuelle du saumon durant lequel il tentera de rejoindre l'océan afin de pouvoir assurer sa croissance. La smoltification est influencée par la température de l'eau et la photopériode. Les smolts privilégient une migration nocturne qui peut être plutôt diurne en fin de période de migration liée probablement à cette urgence migratrice. Certains juvéniles auraient tendance à être effrayés par la lumière du jour tandis que des expériences, menées par [Larinier and Boyer-Bernard \(1991\)](#), ont montré l'influence de la lumière artificielle sur le passage de nuit. C'est dans ce contexte plus spécifique qu'intervient l'analyse.

La passe à poissons du barrage de Poutès a été éclairée par une lampe au mercure d'une puissance de 50 [W] à une distance de 3 [m] au-dessus de l'entrée de la passe. Onze hydrophones ont été installés : sept à une distance de 80 [m] à l'aval et quatre à une distance de 300 [m] à l'amont afin de recenser les mouvements des smolts préalablement pit-tagués (c'est-à-dire marqués avec la technologie PIT). Trois zones ont été définies à l'entrée en raison de la différence d'intensité lumineuse à laquelle elles étaient chacune soumises (Figure [2.1](#)).

Des résultats ont pu être relevés. Soixante smolts ont franchi la passe à poissons ce qui représente 66% des poissons détectés au moins une fois à l'entrée de la passe. Le temps moyen pour trouver l'entrée de la passe est de 11.2 jours. Sur les 44 passages enregistrés entre le 14 mars et le 29 avril 2015, 66% furent nocturnes, 20% diurnes et 14%

crépusculaires. Sur les 15 passages enregistrés en période de jour ou au crépuscule, 14 ont été recensés après la mi-avril. Sur les 29 passages nocturnes, 6 ont été enregistrés en période obscure et 23 dans des conditions éclairées de la passe à poissons.

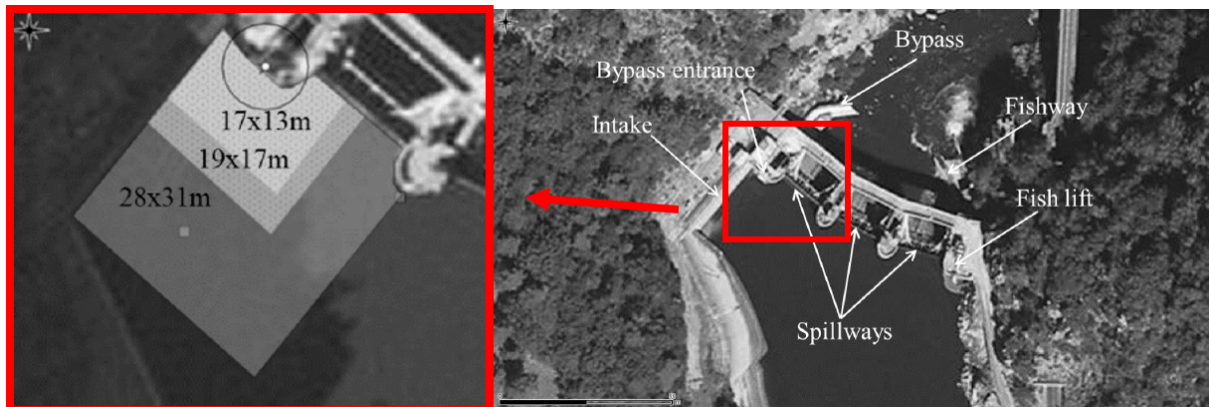


FIGURE 2.1 – Représentation des zones éclairées et de la situation du barrage de Poutès (Tétard et al., 2019).

Au terme de l'étude, différentes observations sur le comportement des smolts lors de leur dévalaison peuvent être soulignées, notamment sur l'influence de la saison et de la transition de mi-avril. Avant la mi-avril, la lumière semble avoir un effet dissuasif sur le comportement des poissons et tend donc à diminuer l'attractivité de la passe. Cependant sept des dix passages nocturnes se sont faits dans des conditions de passe éclairée. La lumière favoriserait donc le passage et la franchissabilité des smolts. Ces comportements pourraient être liés au temps d'adaptation rétinien des poissons à la lumière avant d'être attirés par la passe. Après la mi-avril, la lumière semble augmenter l'attractivité de la passe à poissons. De plus, l'éclairement de la passe accroît la franchissabilité avec 16 passages sur 19 réalisés dans des conditions éclairées. Des perspectives futures existent pour l'amélioration de l'attractivité avant la mi-avril. D'autres tests avec une entrée de la passe plus profonde et un éclairage séquentiel de cette dernière pourraient être envisagés.

Article 3 : An experimental study on fish attraction using a fish barge model (Lin et al., 2019)

Ces travaux interviennent dans le cadre de la conscientisation des problèmes liés aux obstacles humains dans le mouvement des poissons en rivière. C'est à cette occasion que la Chine a commencé à développer des systèmes de collecte et de transport des poissons (FCTS) notamment pour leur faible coût, leur polyvalence et leur pertinence envers les larges barrages.

C'est dans ce cadre que l'influence de trois paramètres sur l'attractivité et la capture des poissons a été étudiée à l'aide d'un modèle de barge à poissons dans un large étang. Ces paramètres sont l'écoulement de l'eau, la lumière artificielle et les rideaux à bulles. Ceux-ci ne sont pas anodins et leur utilisation peut se justifier. La variation de la vitesse de l'écoulement a montré des résultats encourageants concernant les anguilles. L'utilisation de la lumière artificielle est utilisée en aquaculture pour attirer les individus. Les rideaux à bulles permettent de ralentir la vitesse de nage du poisson sans le blesser pour autant, comme c'est le cas des guides électriques. Les tests ont été réalisés en combinant ou non

les trois différents paramètres.

L'expérience s'est déroulée sur un modèle de 4 [m] sur 3 [m] (Figure [2.2]) dans un étang de l'Université des Trois Gorges à Yichang dans la province chinoise de Hubei. Sa superficie est de 7500 [m²] et sa profondeur varie de 0.8 [m] aux berges à 1.6 [m] au centre. La température de l'eau était comprise entre 23°C et 25°C. L'étude s'est portée sur les gambusies (*Gambusia affinis*) compte tenu de leur biomasse dans l'étang (90%). Le dispositif de collecte était éclairé sous eau par une lampe de 24 [W] placée à 0.3 [m] de profondeur avec un angle d'immersion de 15° et d'une divergence de 50°. Quatre couleurs ont été testées : jaune, bleu, blanc chaud et une lumière faible. Deux clôtures ont été placées afin de guider les poissons dans le dispositif. Le rideau à bulles était placé à l'extérieur de ces clôtures. Des caméras filmaient l'entrée du dispositif. L'étude a duré 20 jours.

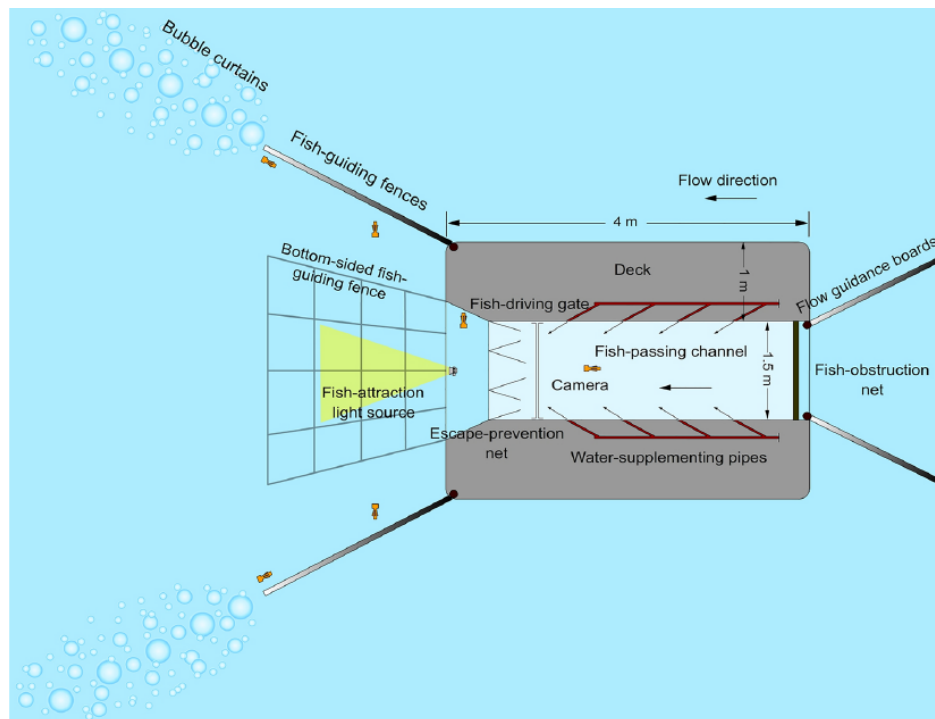


FIGURE 2.2 – Dispositif de collecte des poissons (Lin et al., 2019).

Différents résultats ont été obtenus en isolant ou en associant les différents paramètres. L'augmentation de la vitesse d'écoulement tend à diminuer l'attractivité mais à augmenter la collecte des poissons dans le dispositif. La lumière blanche chaude s'est montrée efficace quant à l'attractivité des gambusies. Le rideau à bulles présente de bons résultats d'attractivité mais pas de réelle influence sur la collecte des individus.

En conclusion, l'association idéale des paramètres a été analysée pour quatre cas de figures répartis selon le jour ou la nuit ainsi que l'attractivité ou la collecte des poissons. Les résultats étaient les suivants :

— **Jour :**

- Attractivité : Pas d'augmentation de la vitesse d'écoulement et présence d'un rideau à bulles.
- Collecte : Pas d'augmentation de la vitesse d'écoulement ni de présence d'un rideau à bulles.

— **Nuit :**

- Attractivité : Pas d'augmentation de la vitesse d'écoulement, pas de présence d'un rideau à bulles et présence d'une lumière blanche chaude.
- Collecte : Augmentation de la vitesse de l'écoulement, pas de présence de rideau à bulles et présence d'une lumière blanche chaude.

Ce type d'étude laisse entrevoir des perspectives d'avenir portant sur de nouvelles expériences. Introduire des poissons migrants dans le modèle tout en jouant sur les combinaisons de paramètres pourrait être envisagé.

Article 4 : A preliminary study into the effectiveness of stroboscopic light as an aversive stimulus for fish (de Oliveira Mesquita et al., 2008)

Cet article traite de la problématique des lacérations, voire de la mort, que subissent les poissons à l'approche des turbines hydroélectriques des barrages de rivière. Une solution qui a été développée afin de les éloigner de ces zones à risques est l'utilisation de lumières stroboscopiques caractérisées par des flashes lumineux extrêmement rapides et brillants. Une étude utilisant ce type de dispositif a été menée au Brésil sur des poissons-zèbres (*Danio rerio*) afin d'évaluer l'efficacité de ce type de mécanisme sur une période à définir.

Trois expériences distinctes ont été menées dans un aquarium de dimensions 0.3 x 0.4 x 0.6 [m] séparé en son milieu par un filet de maille 11 [mm] permettant le passage des poissons d'un côté à l'autre. La première expérience consistait à contrôler les poissons sans l'ajout d'un quelconque dispositif. La deuxième expérience visait à ajouter du côté gauche de l'aquarium des objets (plantes artificielles, graviers, deux tubes en PVC) et de la nourriture afin d'y créer un climat de bien-être. La troisième expérience consistait à reprendre le protocole de la deuxième expérience tout en ajoutant des lumières stroboscopiques afin de déloger les poissons de leur zone de confort. Les conditions expérimentales comprenaient une zone de 12h de jour et 12h de nuit. Les lumières stroboscopiques avaient une intensité de 38 [lux]. Les poissons étaient introduits trois jours dans le modèle sans activation de l'expérience afin qu'ils s'acclimatent à l'environnement. Ensuite, ils étaient testés quatre jours de suite avec une activation du dispositif de façon continue de 9h à 10h30.

Les expériences 1 et 3 n'ont pas montré de préférence de côté de la part des individus tandis que la deuxième expérience a montré une nette préférence du côté gauche de plus grand confort. Néanmoins, l'effet dissuasif de la lumière stroboscopique ne durait en moyenne que 22.5 [min].

Ainsi, il a pu être démontré que l'influence de lumières stroboscopiques sur l'éloignement d'individus d'une zone prédéfinie n'est valable que temporairement. La totalité des poissons n'a pas été concernée par le changement d'environnement lors du déclenchement des lumières stroboscopiques. Cela peut être dû au fait que ce genre d'expérimentation est plus efficace sur les poissons dits nocturnes. Des optiques de travaux futurs pourraient envisager l'éventualité de varier les paramètres des lumières émises : longueur d'onde, intensité, taux de flash. Ceci pourrait habilitier les poissons à rester éloignés d'une zone à risques de façon permanente.

2.2 Articles traitant des ouvrages de franchissement pour anguilles

Article 1 : Efficacy of a side-mounted vertically oriented bristle pass for improving upstream passage of European eel (*Anguilla anguilla*) and river lamprey (*Lampetra fluviatilis*) at an experimental Crump weir (Kerr et al., 2015)

Cet article prend place dans le cadre des problématiques de la perte d’habitat et du retard migratoire sur les espèces diadromes à nage anguilliforme telles que les anguilles et les lamproies. Ces complications sont engendrées par les infrastructures humaines développées en rivière. Pour remédier à cela, un nouveau type de passe dit *Passe à brins ou poils* est étudié afin de recenser une éventuelle amélioration de la remontée des anguilles et des lamproies lorsqu’elles rencontrent un déversoir de jaugeage, dans ce cas-ci un déversoir de Crump. En effet, les passes à poissons classiques présentent de moins bons résultats de remontées chez les mauvais nageurs en raison de leur impossibilité de sauter et de leur capacité d’accélération réduite. Outre son maigre coût et son faible entretien, ce nouveau dispositif permettrait d’augmenter la rugosité de la passe. Cela s’avère utile puisque l’anguille grimpe les obstacles en s’accrochant aux substrats tandis que la lamproie s’attache aux parois à l’aide de ses dents.

La remontée d’un déversoir de Crump des deux espèces a été analysée avec et sans dispositif à brins lors de trois régimes hydrauliques distincts (faible, moyen et élevé). L’étude a été réalisée au Centre de Recherche Ecohydraulique de l’Université de Southampton. Le déversoir possède les dimensions suivantes : 2.38 [m] de long, 1.38 [m] de large et 0.34 [m] de haut. Le dispositif ajouté consiste en un montage latéral de brins orientés verticalement par rapport à la paroi (Figure 2.3). La plaque sur laquelle sont fixés les amas de brins (espacés chacun de 30 [cm]) est composée d’une couche de 10 [mm] de polypropylène. Chaque amas est composé de 24 fibres de 7 [cm] de long et de 1.5 [mm] de diamètre. Les vitesses ont été mesurées à l’aide d’un vélocimètre acoustique alors que des caméras et la technologie PIT recensaient les mouvements des individus. Le cadre d’étude est une zone de recirculation (21.4 [m] de long, 1.38 [m] de large et 0.6 [m] de profondeur) qui permet aux poissons des passages multiples.

Les résultats sans l’ajout de brins ont montré des réponses différentes selon le régime hydraulique. Sous un régime faible, les taux d’efficacité (défini comme le nombre de passages sur le nombre de tentatives) et de succès (défini comme le nombre de poissons remontés sur le nombre de poissons ayant tenté de remonter) étaient élevés tant pour l’anguille que pour la lamproie. Le taux d’échec et le retard accumulé des deux espèces étaient faibles. Sous un régime élevé, les civelles et les lamproies étaient bloquées tandis que les taux d’efficacité et de succès des anguilles étaient limités avec des retards accumulés conséquents. Avec la modification de la passe et l’ajout des brins, les franchissements sous régime élevé se sont considérablement améliorés avec des taux de succès de 76.5% pour les anguilles et de 36.5% pour les lamproies.

L’ajout du dispositif a permis d’augmenter de façon significative le passage des deux espèces avec une amélioration plus nette concernant les anguilles. Ce type de procédé est nécessaire quand on connaît les conséquences des barrières hydrauliques sur la migration des poissons. Ces dernières provoquent d’une part des retards qui causent stress, maladies

et risques de prédation accrue, et d'autre part des dépenses énergétiques qui mettent en péril la maturation sexuelle de l'animal. Les brins ont tout de même occasionné des abrasions cutanées chez un nombre non négligeable de lamproies. L'espacement des amas de brins utilisés semble mieux convenir aux anguilles et il serait donc judicieux, pour de futures études, d'adapter les caractéristiques de ces brins (écartement, longueur, largeur) afin qu'ils conviennent mieux aux lamproies.

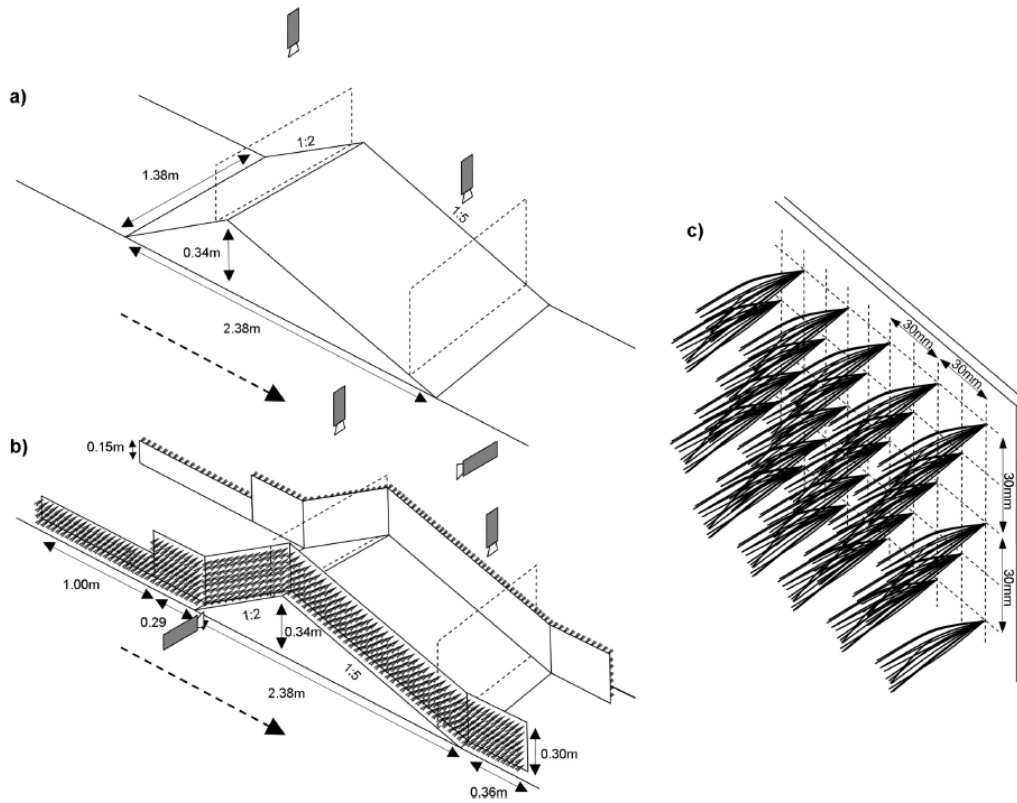


FIGURE 2.3 – Dispositifs de remontées (a) sans brins, (b) avec brins, (c) zoom des brins (Kerr et al., 2015).

Article 2 : Evaluating the effectiveness of a Larinier super active baffle fish pass for European river lamprey *Lampetra fluviatilis* before and after modification with wall-mounted studded tiles (Tummers et al., 2016)

Les passes à poissons modernes sont majoritairement conçues pour les espèces dites économiques comme le saumon ou la truite et délaissent leur efficacité quant aux espèces mauvaises nageuses (anguilles, lamproies). La présente étude tente d'examiner l'efficacité d'une passe à poissons Larinier dotée d'une chicane super active (Figure [2.4]) aux abords d'un barrage surbaissé.

Les recherches se sont déroulées près du déversoir de Crump à Buttercrambe sur la rivière Derwent au nord-est de l'Angleterre. Le déversoir fait 20 [m] de large et 1.31 [m] de haut pour un débit moyen de 2.78 [m^3/s]. Deux études ont été effectuées sur deux années consécutives, avant et après ajout d'un revêtement de tuiles cloutées en plastique censé améliorer la rugosité nécessaire à la remontée des lamproies. La première salve de résultats a été enregistrée du 31 octobre 2013 au 26 février 2014 et la deuxième du 28 octobre 2014

au 26 février 2015. Ces périodes ne correspondent pas exactement à la période migratrice des lamproies.

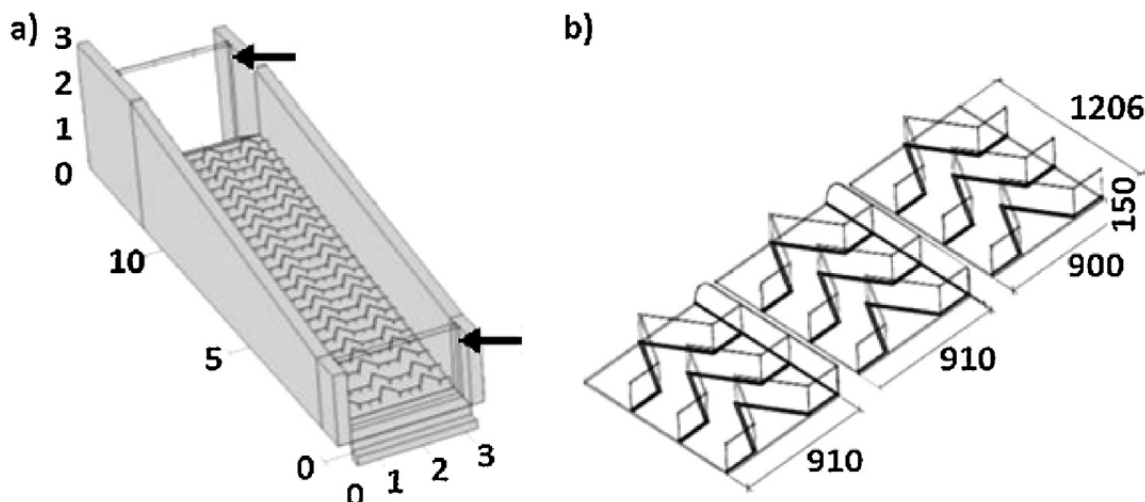


FIGURE 2.4 – Passe à poissons Larinier avec ajout d’une chicane super active (Tummers et al., 2016).

Avant les modifications, la passe était constituée d’une pente en béton de 15% de 11.2 [m] de long et de 2.75 [m] de large. 24 rangées de chicanes en acier inoxydable recouvrent le béton à raison de trois chicanes par rangée. Elles sont espacées de 40 [cm] pour 12 [mm] d’épaisseur et 150 [mm] de haut.

Après les modifications, des plaques de polypropylène (2 [cm] d’épaisseur, 1.02 [m] de long et 0.5 [m] de large) ont été ajoutées à côté des murs de la passe. Chaque plaque comprenait 72 plots coniques de 50 [mm] de hauteur et de diamètre à la base de 30 [mm] espacés de 55 [mm] entre rangées et de 88 [mm] diagonalement.

Les premiers tests ont rassemblé un taux d’attractivité de 90.1% (315/350) pour un taux de franchissabilité de 0.3% (1/315). 158 poissons (50.2%) ont été attirés endéans les 24 premières heures pour un nombre d’essais moyen de 11.4. Les résultats après ajout du second passage ont donné des taux d’attractivité de 85.8% (169/197) et de franchissabilité de 7.1% (12/169). Tous les franchissements se sont réalisés par le chemin modifié. 105 poissons (62.1%) ont été attirés dans les premières 24 heures avec un nombre d’attraction moyen de 7.3. Les deux expériences ont montré une tendance pour les lamproies à être attirées majoritairement lors de la transition jour-nuit.

Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour justifier la faible attraction de la première expérience : un écoulement trop rapide et la présence de turbulence empêchent les lamproies de correctement s’attacher au fond de la passe. La deuxième expérience a montré une légère amélioration de la franchissabilité, notamment grâce au ralentissement de l’écoulement et à l’augmentation des zones de repos. Cela n’a pas pour autant permis d’atteindre le seuil souhaité à terme : 90%. À l’avenir, il faudrait diminuer la pente du passage ou ajouter des marches verticales afin d’augmenter la franchissabilité tout en gardant à l’esprit que la passe doit rester la plus attractive possible.

Article 3 : The influence of attraction flow on upstream passage of European eel (*Anguilla anguilla*) at intertidal barriers (Piper et al., 2012)

Cet article intervient dans le contexte du déclin des anguilles, espèce dont l'importance écologique et commerciale est capitale. A la suite des nouvelles normes européennes qui décrètent un sauvetage de 40% de la biomasse des anguilles, cette étude s'attarde sur l'influence des conditions d'écoulement et environnementales sur leur remontée dans une échelle à anguilles aux abords des barrages d'estrans. En effet, ceux-ci constituent le premier obstacle auquel seront confrontés ces individus dans leur migration d'un milieu marin à un milieu d'eau douce. Les barrages d'estrans peuvent freiner les espèces rhéotaxiques et causer des mortalités liées au retard qu'elles provoquent dans la migration de l'anguille. Cette étude s'intéresse donc à l'influence des substrats, de l'environnement et du type d'écoulement à l'approche de la passe (noyé ou continu) sur la remontée des anguilles.

L'étude s'est penchée sur la migration des anguilles à l'approche de la rivière Stour à l'est de l'Angleterre lorsque celles-ci empruntent le canal sud et sont donc confrontées au déversoir du détroit de Judas (Figure [2.5]). L'échelle à anguilles installée à cet endroit possède quatre escaliers (deux centraux et deux extrêmes) dotés de substrats (brins). Deux pompes alimentent le canal afin d'assurer un débit continu malgré l'influence de la marée, l'une d'elles sert exclusivement à créer des conditions d'écoulement noyé lorsqu'on le désire. Durant 78 jours, l'alternance entre écoulement continu et écoulement noyé s'est opérée afin d'étudier leur influence.

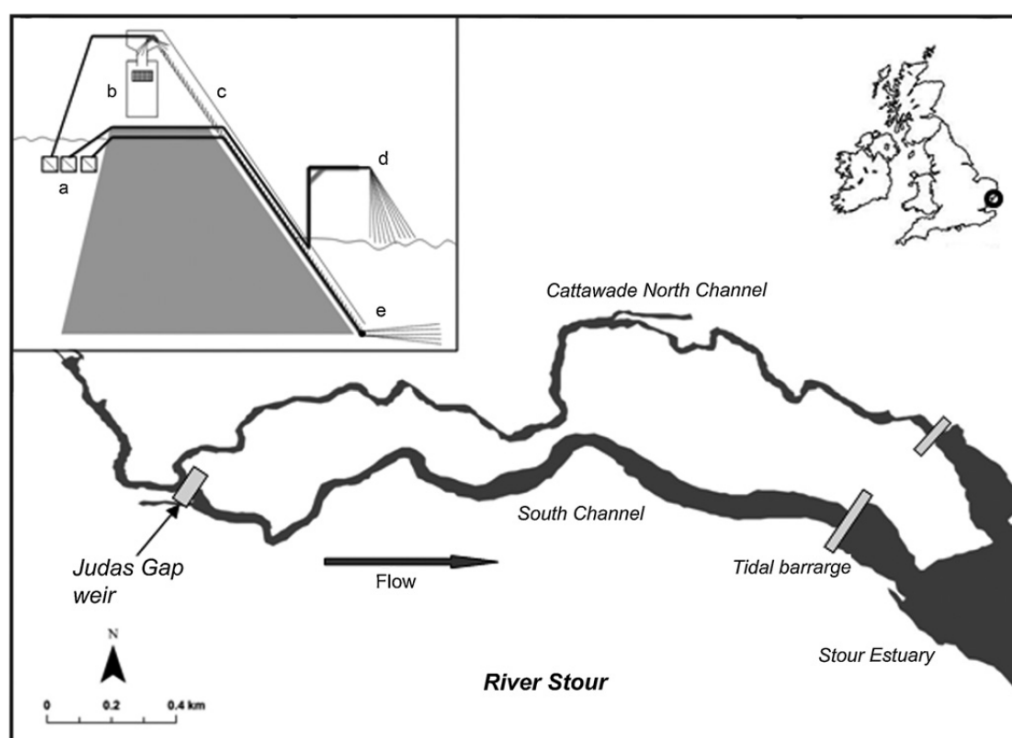


FIGURE 2.5 – Situation géographique du détroit de Judas sur la rivière Stour (Piper et al., 2012).

Plusieurs résultats ont ainsi été obtenus sur les 14 732 anguilles repérées. Parmi celles-ci, 69% ont franchi l'échelle dans des conditions d'écoulement noyé et 31% en conditions d'écoulement continu. 90% des remontées se sont faites sur un escalier proche de la paroi,

indifféremment à gauche et à droite. Les civelles privilégient les escaliers proches des parois tandis que les anguilles remontent via le centre de l'échelle. Un pic de remontée a eu lieu à une température de 20 [°C] correspondant aux plus grandes hauteurs de marée.

Au terme de cette analyse, l'influence de l'écoulement noyé sur l'attractivité a pu être mise en évidence. Ceci est dû aux conditions hydrodynamiques, chimiques, acoustiques et visuelles favorables de ce type d'écoulement. Ses propriétés permettent de diminuer la turbulence et d'augmenter la visibilité. Un effet de bord a également pu être relevé avec une majorité d'espèces qui remontent le long des parois. Ces zones sont privilégiées pour leur vitesse plus lente et les abris qu'elles offrent contre la prédation. Enfin, des préférences de remontées lors de conditions de marée haute ont pu être avancées, impliquant éventuellement des simulations de marées dans le futur afin d'augmenter l'attractivité de la passe. D'autres expériences permettront d'obtenir des résultats plus quantitatifs quant à l'écoulement noyé et l'efficacité de l'attractivité.

Article 4 : Can navigation locks be used to help migratory fishes with poor swimming performance pass tidal barrages ? A test with lampreys (Silva et al., 2017)

Ces travaux interviennent dans le cadre de la conception de passes pour poissons à l'approche des barrages de marée. Ceux-ci mettent en avant l'utilisation des écluses à la place des passes à poissons traditionnelles pour des espèces aux faibles capacités natatoires. Une étude a été effectuée sur des lamproies.

Durant l'automne 2015, le comportement de 265 lamproies a été analysé lors de 11 essais (5 en journée et 6 de nuit) aux alentours des rivières Derwent et Ouse aux abords du barrage de Barmby (Figure [2.6]). Chaque essai comprenait 25 lamproies, 10 étaient placées à l'embouchure du Derwent, à l'aval de l'écluse, et 15 étaient placées directement dans l'écluse. Au total 157 lamproies se sont retrouvées directement dans l'écluse et 108 à l'aval de l'écluse. Parmi celles-ci 59 ont été introduites dans la rivière Ouse. Les télémétries PIT et acoustique ont été utilisées afin de mesurer l'attraction, le passage et le chemin emprunté par les lamproies.

Différents résultats ont pu être recensés. Au total, 55% et 93% des lamproies relâchées respectivement à l'aval et dans l'écluse directement ont tenté de remonter l'obstacle. L'efficacité de passage quant à elle est évaluée à 66% pour les espèces placées dans l'écluse et 78% pour celles placées à l'aval. Pour 90% des lamproies déposées à l'aval, il aura fallu moins de 128 [min] pour trouver l'entrée de l'écluse. Concernant les 59 lamproies installées dans l'Ouse, 21 (36%) ont tenté de passer le barrage et 16 (76%) ont réussi. Sur ces 16 lamproies, 15 sont passées par les sas (*sluices*) tandis que la dernière a traversé directement l'écluse (*lock*).

Au terme de ces expériences, l'utilisation des écluses comme substitut des passes à poissons semble avoir un potentiel à exploiter. Au-delà du fait que le temps de remontée est relativement court, on observe une efficacité de passage de 60 – 70% tandis que les passes traditionnelles ne présentent qu'un taux de passage de 21.1% pour les espèces à faible capacité natatoire. Ceci peut s'expliquer par la division de la remontée en deux étapes, par la diminution de la turbulence aux abords de l'écluse et l'utilisation entière de la colonne d'eau pour la remontée. D'autres expériences, avec de nouvelles conditions

d'environnement et d'habitat, pourraient confirmer le potentiel de l'attractivité et de la franchissabilité des poissons migrateurs à l'aide d'écluses.

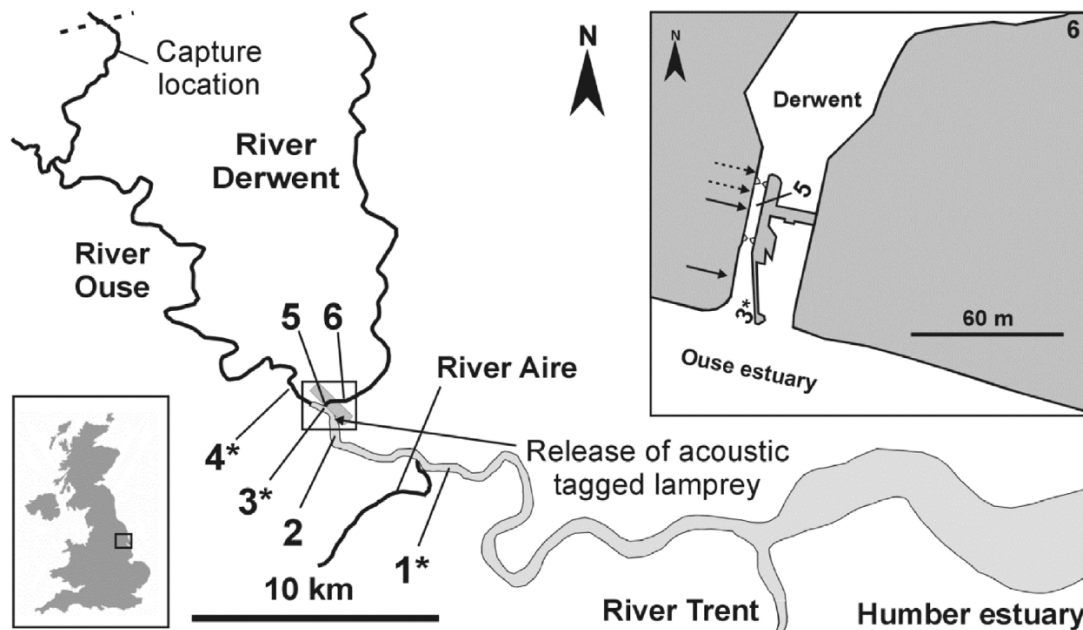


FIGURE 2.6 – Situation géographique du barrage de Barmby (Silva et al., 2017).

2.3 Articles traitant des rampes à anguilles

Article 1 : The effect of ramp slope and surface type on the climbing success of shortfin eel (*Anguilla australis*) elvers (Jellyman et al., 2017)

Ce travail intervient dans le cadre de la protection de la biodiversité et du maintien des espèces migratoires diadromes dont fait partie l'anguille. Des solutions ont été trouvées afin de remédier au blocage de la rivière par les barrages. L'une d'entre elles est une rampe au revêtement humidifié. Les conditions optimales que requière ce genre de dispositif sont encore peu documentées dans la littérature. C'est pourquoi cette étude s'attardera sur les influences de la pente et du type de substrat sur la remontée d'anguillettes.

Les expériences ont pris place en Nouvelle-Zélande entre le 15 mars et le 23 avril 2014. Des jeunes anguilles dont la taille variait entre 71 et 152 [mm] ont été capturées à la pêche électrique dans les rivières Cust et Ashley. La remontée des individus était filmée pour trois conditions de pente longitudinale : 30°, 50° et 70° ; et trois conditions de revêtement : plastique lisse, mélange de sable et graviers et un tapis *Miradrain* doté de protubérances de 24 [mm] de haut espacées de 16 [mm]. Les rampes utilisées, qui mesuraient 1.5 [m] de long pour 0.1 [m] de large, étaient inclinées transversalement à 10° (Figure [2.7]). Le cycle circadien imposé était de 12h jour et 12h nuit. Les tests avaient lieu entre 17h et 9h puisque les anguilles sont des espèces nocturnes. La température de l'eau était de 19 [°C] et le débit imposé de 0.1 [L/s].

Différents résultats de franchissabilité ont été obtenus pour les pentes : 56% pour 30°, 23% pour 50° et 6% pour 70°. Les taux relatifs aux types de revêtement étaient de 0% pour

le plastique lisse, 32% pour le mélange de sable et graviers et de 52% pour le *Miradrain*. Trois combinaisons ont montrés des résultats convaincants de 57 à 87% : 30° pour le mélange sableux et le *Miradrain* et 50° pour le *Miradrain*. Les six autres combinaisons affichent des taux relativement faibles de 0 à 13%. La moyenne de taille des anguilles ayant réussi à remonter une rampe était de 111 [mm], ce qui la situe 5.4 [mm] au-dessus de celles n'ayant pas franchi l'obstacle.

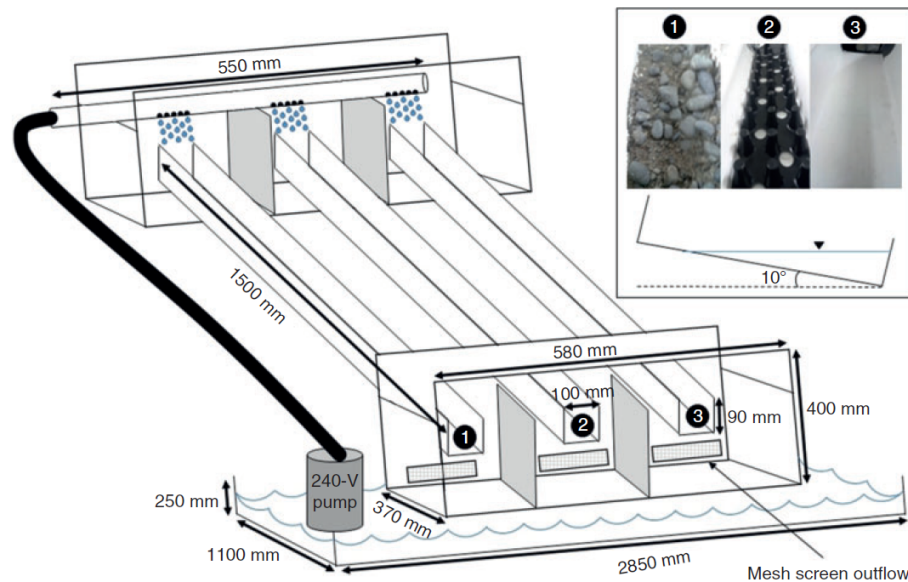


FIGURE 2.7 – Représentation des conditions d’essais utilisées pour la remontée de rampes à anguilles en Nouvelle-Zélande (Jellyman et al., 2017).

Au terme de cette analyse, il semble donc envisageable de poursuivre l’amélioration des rampes à anguilles en raison de son rapport efficacité-prix. Toutefois, ces dernières dépendent de deux paramètres importants : la pente et le substrat. La rampe de pente 30° dotée du *Miradrain* présente les meilleurs résultats. Au-delà de 50° les anguilles semblent avoir beaucoup de difficultés à escalader l’obstacle. Ces ouvrages de franchissement ne conviennent donc pas aux barrages hydro-électriques de grande taille pour lesquels d’autres alternatives doivent être trouvées. A l’avenir, il faudrait également porter l’attention sur d’autres paramètres comme le débit d’alimentation ou la longueur de la rampe.

Article 2 : Climbing the ladder : an evaluation of three different anguillid eel climbing substrata and placement of upstream passage solutions at migration barriers (Watz et al., 2019)

L’article présenté s’insère dans le contexte de la préservation des espèces en danger, et l’anguille en est un exemple frappant. Les causes de sa disparition sont multiples même si le rôle des barrages qui bloquent sa migration en est la principale. Afin de solutionner ce problème des passes à poissons ont été développées. Malheureusement, elles ne conviennent pas aux particularités morphologiques des anguilles et c’est pourquoi des rampes spécifiques leur ont été consacrées ces dernières années.

Les travaux réalisés ici ont pris place en Suède à proximité du barrage hydro-électrique de la rivière Lagan entre le 27 juin et le 8 juillet 2016. Six rampes (1.0 [m] de long, 1.1 [m] de large et 0.7 [m] de profondeur) ont été divisées en trois couloirs en aluminium de

0.32 [m] et inclinées longitudinalement à 30° (Figure [2.8]). Trois substrats différents ont été testés (Figure [2.9]). Le premier substrat est constitué de plots espacés de 14 [mm], de diamètre 28 [mm] et de hauteur 14 [mm]. Le deuxième est une sorte de tapis tissé dont l'appellation exacte est *Enkamat 7020*. Le dernier est un tapis à brins de 1 [mm] de diamètre et 7 [cm] de haut. Les brins sont regroupés par touffes espacées de 1.6 à 2.8 [cm]. Le débit était de 0.07 [L/s] et la température variait entre 18.3 et 19 [°C]. Les anguilles, dont la longueur était comprise entre 60 et 110 [mm], étaient lâchées par lot de 10 individus à l'entrée d'un bac donnant accès aux trois types de substrats. Une fois remontées, elles tombaient dans un seau. Cela permettait de comptabiliser les remontées et d'empêcher toute forme d'apprentissage. Leurs mouvements ont été filmés de nuit à l'aide de caméras infrarouges.

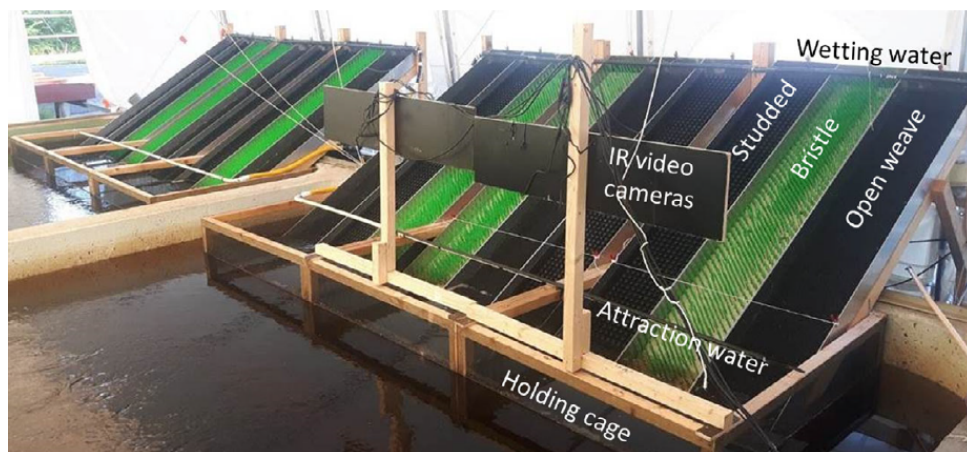


FIGURE 2.8 – Représentation des conditions d'essais utilisées pour la remontée de rampes à anguilles en Suède (Watz et al., 2019).

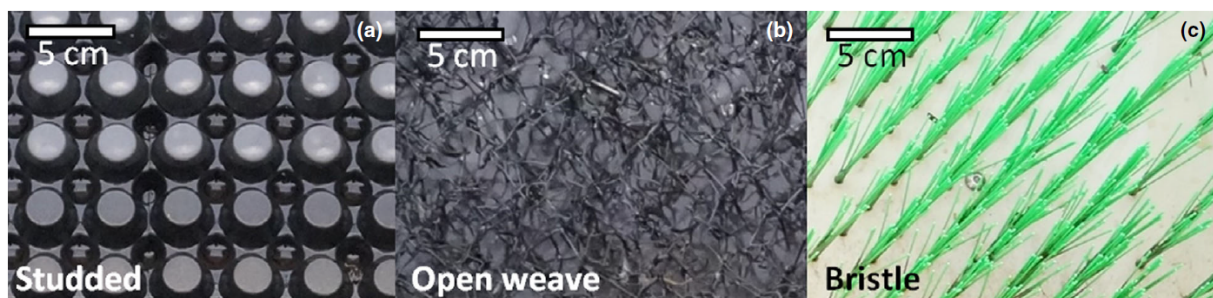


FIGURE 2.9 – Illustration des trois substrats utilisés lors des expériences menées en Suède (Watz et al., 2019).

Sur l'ensemble des tests, environ sept anguilles sur dix ont été capables de franchir le dispositif par l'un des trois substrats mis à disposition. 40% des anguilles ont emprunté le revêtement composé de plots, 21% le revêtement tissé et 5% le substrat de brins. Les temps de remontée sur le dispositif de plots était 26% plus rapide que le revêtement de brins et quatre fois plus rapide que le *Enkamat 7020*.

A l'issue de ces constatations, le substrat de type plots présente les meilleurs taux d'attractivité, de tentatives de remontées et de remontées elles-mêmes. De plus, il semble permettre l'ascension moyenne la plus rapide. La recommandation d'un certain type

de revêtement dans les rampes à anguilles n'est pas encore imposée dans de nombreux pays. La prescription du substrat de type plots est donc souhaitable au vu des résultats récoltés. Cependant, certains paramètres tels que le débit, la température, les conditions hydrodynamiques ou la taille des anguilles doivent encore être explorés afin de confirmer la tendance observée dans cette étude précise avec des conditions strictes.

Chapitre 3

Caractérisation des poissons

Ce chapitre s'adresse plus particulièrement à ceux qui souhaitent disposer d'une vision globale des travaux consacrés au monde du vivant. Le but est de rappeler certains concepts liés aux cycles biologiques et aux propriétés morphologiques des poissons. Ce chapitre tentera de compléter le travail effectué lors des mémoires précédents (Pyte, 2015; Courtois and Van Audenhaege, 2017; Bodarwé and Cabo, 2018), principalement en ce qui concerne l'anguille encore peu documentée jusqu'à présent.

3.1 Introduction

La présente étude intervient dans le contexte du maintien de la continuité écologique des rivières, plus précisément pour les cours d'eau du bassin mosan. Afin d'assurer cette continuité, la solution des ouvrages de franchissement a déjà été évoquée au Chapitre [1]. Celle-ci est d'ailleurs encouragée par de nombreux travaux et études sur le sujet (Clay, 1994; Roscoe and Hinch, 2010; Bunt et al., 2016; Bao et al., 2019).

Les essais effectués s'intéressent à ces ouvrages car ils permettent le passage des poissons en cas d'obstacle. Ils ont pour objectif de mettre en lumière d'éventuelles améliorations de dispositifs de franchissement en optimisant les passes existantes via l'analyse de paramètres nouveaux. Avant d'étudier l'effet de ces paramètres, il semble utile de clarifier deux concepts liés à la problématique suivie : la migration des poissons et leur capacité de nage.

La migration des poissons fait partie des différentes raisons qui poussent un poisson à se mouvoir. Pour se dérouler sans encombre, elle a besoin de la continuité écologique de la rivière. Sans elle, tous les mouvements des poissons dont elle fait partie se voient perturbés. L'ensemble de ces mouvements seront décrits par la suite.

Par ailleurs, la capacité de nage est étroitement liée à la vitesse de nage d'un individu. Cette caractéristique est au centre de l'attention du dimensionnement des passes à poissons explicité à la section [4.1]. Elle s'accompagne d'autres critères comme le comportement des poissons et certaines de leurs aptitudes physiques.

Dans un premier temps, les caractéristiques migratoires et natatoires des poissons seront expliquées d'un point de vue global. Ensuite, les concepts présentés seront adaptés aux deux espèces étudiées : le saumon atlantique et l'anguille européenne.

3.2 Caractéristiques migratoires

3.2.1 But de la migration

Dans le cycle de vie de tout poisson, celui-ci sera amené à se mouvoir dans son milieu. Parmi les différentes raisons qui poussent le poisson à changer de milieu, il est possible de distinguer deux types de déplacements (Sonny, 2006). Les mouvements *passifs*, qui ne sont pas orchestrés par un effort musculaire du poisson lui-même, et à l'inverse, les mouvements *actifs* désirés par l'individu.

Les mouvements *passifs* sont généralement associés à la dérive des individus. Il est possible que la dérive soit souhaitée par le poisson. Elle intervient alors comme une étape de son cycle de vie. C'est le cas de certaines migrations de poissons à l'état larvaire. Ces derniers profitent des courants afin de quitter leurs zones de ponte. Cela leur permet de parcourir de grandes distances sans dépenser trop d'énergie. La dérive peut également être provoquée par l'accélération du débit lors d'une crue. Le poisson est alors emporté par le courant, à l'aval de son point de départ. Ce cas de figure n'est pas désiré par l'individu. Il s'accompagne donc très souvent d'un retour de l'individu dans son milieu initial.

Les mouvements *actifs* peuvent être motivés par des intérêts distincts. Trois buts différents sont avancés par Lucas and Baras (2001) :

- **Se reproduire** : le spécimen s'efforce de trouver un environnement propice à la fraie (Epoque où les poissons se reproduisent) où reposeront ses œufs et se développeront les larves. Ce type de déplacement est central pour la survie et la continuité de l'espèce.
- **Dénicher de la nourriture** : l'individu cherche un milieu qui convient au stade de son régime alimentaire. Cette quête survient notamment dans le développement biologique du poisson lorsqu'il cherche à stimuler sa croissance ou sa maturation sexuelle.
- **Trouver un refuge** : le poisson évite un milieu qui lui est hostile. Plusieurs causes peuvent être à l'origine d'un milieu hostile : échapper à un prédateur, éviter la compétition entre individus de même espèce, désertir une portion polluée de rivière aux abords d'industries, fuir une zone de crue ou de sécheresse, quitter des conditions thermiques ou physico-chimiques non optimales, etc.

La migration au sens zoologique du terme peut donc être définie comme l'ensemble des mouvements d'une certaine amplitude qui se produisent de manière prévisible et régulière dans le cycle biologique d'un animal (Gillespie, 1976). Cela implique donc un aller-retour entre deux milieux qui possèdent des propriétés différentes. Au sens piscicole, ces migrations peuvent se produire de l'amont vers l'aval (dévalaison) ou de l'aval vers l'amont (montaison).

3.2.2 Les types de migration

Il existe trois schémas de migration :

- **l'océanodromie** : les espèces migrent en demeurant dans le milieu marin.
Exemple : la morue.

- la **potamodromie** : les poissons migrent en restant exclusivement dans un milieu d'eau douce.
Exemple : le chabot.
- la **diadromie** : les individus passent leur cycle de vie alternativement entre milieu marin et milieu d'eau douce.

Au sein des espèces diadromes, il est possible de différencier trois sous-catégories :

- l'**anadromie** : le milieu de croissance de l'individu est l'eau de mer tandis que sa reproduction se déroule en eau douce. Le poisson réalise une migration de reproduction dite *vers l'amont*.
Exemple : le saumon atlantique.
- la **catadromie** : le milieu de croissance de l'individu est l'eau douce tandis que sa reproduction se déroule en mer. Le poisson réalise une migration de reproduction dite *vers l'aval*.
Exemple : l'anguille européenne.
- l'**amphidromie** : la migration se produit dans les deux sens, de l'eau douce vers la mer et inversement. Le poisson ne réalise pas de migration dite de reproduction. Il se reproduit généralement en eau douce où il passe la majorité de son temps. Son cycle de vie marin se déroule au début de son stade de développement lorsqu'il se trouve à l'état larvaire
Exemple : la perche commune.

La catégorisation des espèces établies reste restrictive dans le sens où elle se concentre principalement sur l'évolution de la salinité de l'habitat au cours du cycle biologique de l'individu. D'autres paramètres pourraient être pris en considération afin de spécifier les types de migration : la température de l'eau, la vitesse de l'écoulement, le taux d'oxygène dissous, etc.

3.2.3 Les obstacles à la migration

Comme déjà abordé dans l'introduction de ce travail, de nombreux obstacles (ouvrages) introduits par l'Homme viennent perturber l'habitat des espèces piscicoles. Les espèces migratrices se voient plus particulièrement touchées puisqu'elles sont interrompues dans leurs mouvements. Ces ouvrages sont à l'origine de sérieux dangers pour les poissons : retards à la migration, lésions, fatigue, mortalité, etc. Différents types d'obstacles seront rappelés dans cette section.

Les obstacles transversaux, comme les barrages, inhibent complètement la montaison des poissons. L'obstruction est infranchissable et rend donc la circulation vers l'amont impossible. L'infranchissabilité d'un obstacle est prescrite dans deux cas de figure : soit une partie des espèces est incapable de le traverser, soit une espèce en particulier ne peut le gravir pendant une période relativement longue.

Les seuils sont également des obstructions infranchissables pour certaines espèces. A une échelle réduite, ils provoquent les mêmes soucis que les barrages. Suivant la taille du seuil, certaines espèces aux capacités de saut accrues seront capables de le passer ou non.

En revanche, ce n'est pas le cas des espèces benthiques inaptes à sauter.

Les tunnels sous voiries qui ont pour but de garantir un écoulement naturel continu de la rivière peuvent occasionner des embarras. En effet, ces conduites sont généralement lisses et pentues. Cela crée des difficultés de passage pour les espèces qui profitent des rugosités afin de progresser dans les rivières. Par ailleurs, en cas de sécheresse, la profondeur d'eau à l'intérieur de ces tunnels se voit réduite. Cela complique donc son franchissement par certaines espèces ou certaines tailles d'individus.

Les évacuateurs de crue constituent un autre problème en mesure de déranger les espèces migratrices. En effet, ces dispositifs amènent des différences de hauteur non négligeables dans la continuité de la rivière. Si la chute est suffisamment grande, le poisson peut se blesser par impact avec le radier ou des rochers situés à l'aval.

Enfin, les prises d'eau de tout type (refroidissement d'un processus industriel, centrales hydro-électriques, prise alimentaire d'eau potable) peuvent également causer des dégâts. Certains poissons se retrouvent bloqués au sein de la conduite ou se blessent mortellement aux abords des parois contondantes des turbines par exemple.

Outre le haut taux de mortalités engendrées, ces dispositifs sont enclins à bouleverser les populations piscicoles à plus long terme. En effet, la réduction du nombre d'espèces capables d'atteindre leur lieu de reproduction est un réel inconvénient. La diminution des espèces empêche à long terme un brassage génétique suffisant entre individus. De plus, la fatigue occasionnée par le franchissement des obstacles fragilise les populations. Celles-ci sont plus sensibles à la prédation et aux éventuels éléments pathogènes présents dans l'eau.

3.3 Caractéristiques natatoires

3.3.1 Différentes activités natatoires

Parallèlement à l'aspect migratoire, la capacité de nage du poisson est un critère de dimensionnement capital des ouvrages de franchissement d'obstacles hydrauliques (Larrier et al., 2006). Il faut distinguer deux concepts lorsqu'il est question de capacité de nage : la vitesse de nage et l'endurance. La vitesse se définit d'un point de vue physique comme le rapport entre la distance parcourue et le temps mis pour couvrir cette dernière. L'endurance est définie, quant à elle, comme la durée pendant laquelle une certaine vitesse pourra être maintenue (Baudouin et al., 2014).

Les auteurs s'accordent sur trois rythmes distincts qui mobilisent différents types de muscles (Blaxter, 1969; Webb, 1975; Beach, 1984; Bell, 1990) :

- l'activité de **sprint** (*burst*) : effort continu et intense durant un laps de temps bref, de quelques secondes à quelques dizaines de secondes suivant l'espèce et la taille de l'individu. Sa durée est inférieure à vingt secondes. Cette activité met en jeu les muscles blancs.
- l'activité de **croisière** (*cruising*) : effort effectué durant plusieurs heures sans fatigue ni modification physiologique de l'animal. Elle mobilise les muscles rouges.

- l'activité **soutenue** (*sustained*) : activité intermédiaire des deux précédentes capable d'être maintenue durant plusieurs minutes. Sa durée est limitée à maximum 200 minutes en raison d'une fatigue progressive du poisson (Armstrong et al., 2004). Plus la vitesse maintenue sera élevée, moins cette activité durera dans le temps. Elle met en jeu à la fois les muscles rouges et les muscles blancs.

La musculature du poisson intervient dans 50 à 70% de son poids (Guillaume et al., 2001). Elle se divise en deux groupes : les muscles rouges et les muscles blancs. Certains poissons possèdent des muscles roses qui font la jonction entre muscles rouges et muscles blancs (Johnston, 1981). Les muscles rouges sont situés juste en-dessous de la peau du poisson. Ils recouvrent les muscles blancs qui constituent la majeure partie de la musculature. Selon le type d'activité, des muscles différents seront contractés afin de fournir l'effort nécessaire.

Les muscles rouges se contractent au moyen de mécanismes aérobie. Ils se bandent au moyen d'un apport d'oxygène présent dans le sang. Ces muscles sont donc fortement vascularisés. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'ils possèdent cette couleur et donc cette appellation. L'énergie produite est donc le résultat de l'oxydation complète du glycogène et des lipides présents dans les muscles rouges. Ce principe est analogue à la respiration cellulaire.

Les muscles blancs se contractent via des mécanismes anaérobies. Ils sont utilisés par le poisson lorsqu'il désire fournir un effort lui permettant de dépasser sa vitesse de croisière. L'énergie utile à cet effort est fournie par la décomposition du glycogène des muscles blancs en acide lactique (Bone, 1966). Cette réaction déclenche une grande puissance disponible rapidement. Cependant, cette énergie est limitée en raison du seuil de glycogène exploitable. Une fois le glycogène consommé, le poisson atteint son état d'épuisement et il ne peut pas effectuer une nouvelle accélération avant de s'être reposé. De plus, l'acide lactique inhibe la contraction musculaire une fois qu'il a dépassé un certain seuil. C'est pour cette raison qu'une vitesse surpassant la vitesse de croisière ne peut être maintenue qu'un certain temps. Ce seuil varie selon l'intensité de vitesse à atteindre. Une fois la quantité de glycogène épuisée, le muscle blanc utilise l'oxygène afin de reconstituer ses réserves. Cette opération peut prendre du temps, jusqu'à 24 heures (Armstrong et al., 2004). Ainsi, ce type d'effort ne pourra être opéré indéfiniment et il nécessitera un certain délai avant de pouvoir se reproduire.

La proportion entre muscles blancs et muscles rouges varie chez les espèces et témoigne de l'intérêt de l'un ou l'autre type suivant les individus. Les poissons dont les caractéristiques de nage sont rapides et perpétuelles auront une proportion en muscles rouges plus élevée (Lucas and Baras, 2001). C'est notamment le cas des poissons aux vitesses de croisière importantes qui nagent dans la colonne d'eau. A l'inverse, les individus aux capacités natatoires plus faibles, comme les espèces benthiques, auront une proportion en muscles rouges amoindrie. D'autre part, certains poissons prédateurs ont besoin d'atteindre des vitesses plus rapides fréquemment. Cela leur permet notamment de pouvoir capturer leurs proies. C'est pourquoi ces individus auront une proportion en muscles blancs plus élevée que la moyenne afin d'effectuer ces accélérations ponctuelles (Groot, 2010). Le rapport qui existe entre ces deux types de muscles permet d'identifier la puissance développée et la capacité d'endurance du poisson.

3.3.2 Différents types de nage

Chaque poisson plongé dans l'eau sera soumis à des forces verticales et à des forces horizontales. Afin de progresser dans son milieu, celui-ci devra vaincre, pour chaque direction, les forces qui agissent dans le sens opposé à son mouvement. Les forces qui agissent sur le poisson sont représentées à la Figure [3.1].

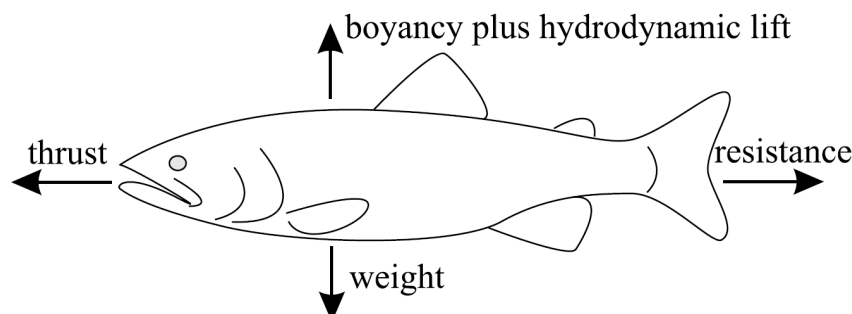


FIGURE 3.1 – Forces verticales et horizontales s'exerçant sur un poisson en mouvement (Sfakiotakis et al., 1999).

Dans la direction verticale, le poisson subit son poids (*weight*) qui aura tendance à l'attirer vers le fond. Afin de se maintenir dans la colonne d'eau, son poids sera partiellement ou totalement équilibré dans le sens opposé par la flottabilité (*buoyancy*). Celle-ci résulte du principe d'Archimède applicable à tout corps plongé dans un fluide. La flottabilité est également influencée par la présence ou non d'une vessie natatoire chez l'individu. La vessie natatoire permet au poisson non seulement de se stabiliser dans la colonne d'eau en augmentant sa flottabilité mais également de réduire sa dépense d'énergie lors de ses déplacements horizontaux (Alexander, 1966). Si la flottabilité du poisson ne suffit pas à contrebalancer son poids propre, il devra fournir une force supplémentaire afin de s'équilibrer dans la colonne d'eau. Cette force additionnelle est appelée portance (*hydrodynamic lift*). Elle est générée par un effort musculaire fourni par les nageoires adéquates.

Dans la direction horizontale, la poussée (*thrust*) générée par le poisson lui permettra d'avancer dans le plan longitudinal. Cette poussée doit être suffisamment élevée pour surpasser la résistance (*resistance*) des lignes de courant qui agissent sur l'individu comme des forces de frottement. La poussée engendrée par l'animal dépend de son type de nage.

Il existe deux grandes catégories de nageurs parmi les poissons. Elles sont classées suivant la structure corporelle du poisson et la façon dont la poussée est produite :

- **BCF** (*body-caudal fin*) : la poussée est générée par le corps (tout entier ou en partie) et la nageoire caudale (Figure [3.2]).
- **MPF** (*median-paired fin*) : la poussée est uniquement engendrée par un type de nageoire en particulier.

Les nages dont le mouvement est provoqué par le corps et la nageoire caudale (BCF) sont classées en plusieurs catégories. Ces catégories tiennent compte de l'onde de propulsion (amplitude et longueur d'onde) et de la manière dont la poussée est générée. Elles sont au nombre de cinq. Les quatre premières sont de nature ondulatoire. Cela signifie que l'onde de propulsion traverse l'entièreté du corps dans le sens opposé au mouvement global. La cinquième est de nature oscillatoire et ne fait intervenir que la nageoire caudale.

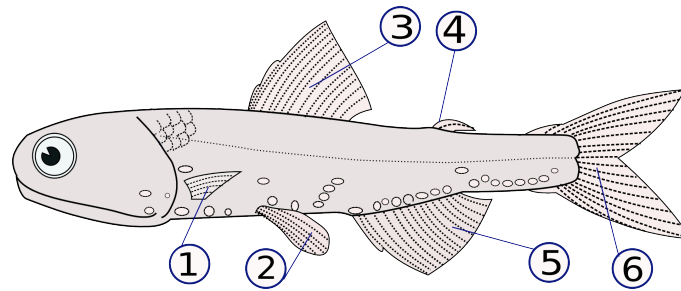


FIGURE 3.2 – Types de nageoires utiles au déplacement. (1) nageoire pectorale, (2) nageoire pelvienne, (3) nageoire dorsale, (4) nageoire adipeuse, (5) nageoire anale, (6) nageoire caudale (Wikipedia, 2020a).

- la nage **anguilliforme** : Tout le corps participe aux ondulations qui provoquent le mouvement du poisson. La nageoire caudale n'a pas lieu d'être pour les poissons possédant ce type de nage.
Exemple : l'anguille européenne.
- la nage **subcarangiforme** : Les ondulations sont générées par la nageoire caudale et la moitié postérieure du corps du poisson.
Exemple : le saumon atlantique.
- la nage **carangiforme** : Seuls la nageoire caudale et le dernier tiers postérieur du corps du poisson participent aux ondulations. La nageoire caudale est plus rigide que pour les deux nages précédentes. Cela se traduit par une vitesse plus rapide et un corps plus rigide qui provoque des difficultés d'accélération et de rotation.
Exemple : la sardine.
- la nage **thunniforme** : Considérée comme la nage la plus efficace dans le règne animal, la poussée est engendrée principalement par la nageoire caudale (90%). Ce type de nage permet d'atteindre de grandes vitesses durant de longues périodes.
Exemple : le thon.
- la nage **ostraciforme** : Le mouvement est produit uniquement par la nageoire caudale de nature très raide. Celui-ci est purement oscillatoire et calqué sur le rythme d'un pendule. Le corps du poisson demeure rigide pendant la nage.
Exemple : le coffre pintade.

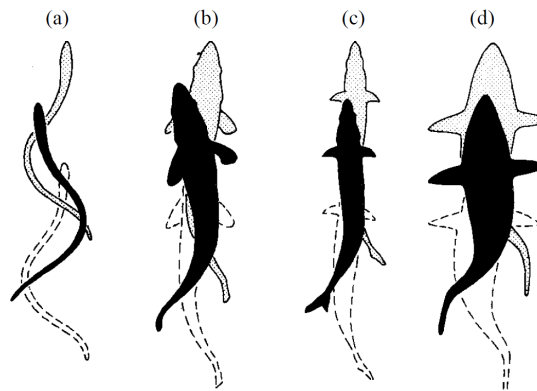


FIGURE 3.3 – Types de nage présentes en Meuse. (a) anguilliforme, (b) subcarangiforme, (c) carangiforme, (d) thunniforme (Sfakiotakis et al., 1999).

La nage ostraciforme et tous les types de nage engendrés uniquement par les nageoires (MPF) ne sont pas observés dans le bassin mosan. Elles ne seront pas développées. Une illustration des nages anguilliforme, subcarangiforme, carangiforme et thunniforme est illustrée à la Figure [3.3].

3.3.3 Modèles de vitesse existants

Différentes appellations de vitesse

Trois capacités de nage ont été définies : activité de sprint, activité soutenue et activité de croisière (voir section [3.3.1]). À côté de cela, il est nécessaire de rendre compte des appellations courantes de la littérature traitant des vitesses d'un poisson. La vitesse d'un poisson, directement liée à sa capacité de nage, est couramment calculée en laboratoire à l'aide d'un dispositif appelé tunnel de nage (Ward et al., 2002). Lorsque la vitesse d'un poisson est mesurée, la tendance générale sera de l'exprimer dans une unité non conventionnelle : le [BL/s] (body-length per second). Cette façon de caractériser la vitesse d'un poisson permet de standardiser les lois en s'affranchissant de la variable longueur du poisson.

Différentes vitesses sont communément utilisées dans la littérature (Lucas and Baras, 2001). Elles découlent de la relation qui existe entre la capacité de nage et le métabolisme du poisson :

- la **vitesse optimale**, U_{opt} [m/s] : c'est la vitesse pour laquelle le coût énergétique de transport est le plus faible (Tucker, 1970).
- la **vitesse maximale de croisière**, U_{ms} [m/s] : c'est la vitesse maximale atteinte en utilisant uniquement les muscles aérobies, c'est-à-dire les muscles rouges. Au-delà de cette vitesse, les muscles anaérobies, à savoir les muscles blancs, sont mis en jeu. Leur réserve de glycogène commence à être consommée, ce qui fatigue progressivement le poisson.
- la **vitesse maximale soutenue**, U_{mp} [m/s] : c'est la vitesse qui peut être soutenue pendant un temps d'endurance d'une minute.
- la **vitesse maximale de sprint**, U_{mb} [m/s] : c'est la vitesse maximale qu'un poisson peut atteindre durant son activité de sprint. Elle se déroule, pour rappel, sur une durée inférieure à vingt secondes.
- la **vitesse critique**, U_{crit} [m/s] : c'est la vitesse atteinte par un individu à partir de laquelle il commence à se fatiguer. Elle peut être associée au seuil qui fait passer la capacité de nage d'activité de croisière à activité soutenue.
- la **vitesse maximale instantanée**, U_{max} [m/s] : c'est la vitesse maximale que peut théoriquement atteindre un poisson momentanément sur un seul mouvement (Armstrong et al., 2004).

Ces vitesses peuvent être maintenues sur un certain laps de temps, différent pour chaque vitesse et chaque morphologie de poisson. Ce temps d'effort est appelé le **temps d'endurance**, t_u [s]. Il se définit comme la durée pendant laquelle un poisson est capable de nager à une certaine vitesse U [m/s] (Baudouin et al., 2014). Il dépend directement de la quantité de glycogène présent dans les tissus musculaires de l'animal. Une fois le glycogène épuisé, le poisson n'est plus en mesure de maintenir sa vitesse. Cela marque la fin du temps d'endurance. La relation qui lie la vitesse au temps d'endurance est différente

pour chaque espèce (Armstrong et al., 2004).

La vitesse d'un poisson dépend de nombreux paramètres repris ci-après de manière non exhaustive :

— **Paramètres liés à l'individu/espèce :**

- la *taille/longueur* : un poisson plus grand ou plus long est plus à même de fournir un effort supplémentaire et donc d'accéder à de plus grandes vitesses.
- la *musculature* : la quantité de muscles rouges et blancs définit la capacité d'un poisson à passer d'une activité de nage à l'autre.
- la *morphologie* : la présence ou non d'une vessie natatoire demandera plus ou moins d'effort au poisson pour se stabiliser dans la colonne d'eau. Sa vitesse de nage en est donc inéluctablement impactée.
- la *cinématique de nage* : le type de nage d'un poisson lui permettra d'atteindre ou non des vitesses d'une certaine ampleur (voir section [3.3.2]).

— **Paramètres liés au milieu :**

- l'*écoulement* : l'existence ou non de zones turbulentes influencera de façon positive ou négative la vitesse d'un poisson. La vitesse du courant opposée au sens de son mouvement gouverne la vitesse qu'il aura à adopter.
- la *température* : le poisson est poïkilotherme, son organisme répondra donc de façon différente selon la température de l'eau. De façon générale, son métabolisme et donc sa capacité de mouvement est directement proportionnelle à la température (Wardle, 1975; Zhou, 1982; Beach, 1984).
- la *quantité d'oxygène* : l'oxygène est nécessaire au processus de contraction musculaire par des mécanismes aérobie de production d'énergie. La vitesse est donc dépendante de la quantité d'oxygène disponible.

Certains modèles de vitesse ont été étudiés afin de trouver une loi physique qui lie la vitesse du poisson à ces paramètres. Compte tenu des nombreux éléments entrant en compte, plusieurs lois ont tenté de limiter l'influence de la vitesse généralement en fonction d'un ou de deux paramètres : la longueur du poisson et dans certains cas la température de l'eau. En effet, il a pu être montré que la vitesse de nage d'un poisson était optimale à une certaine température suivant l'espèce (Randall and Brauner, 1991; Johnston and Ball, 1997; Taylor et al., 1997). La majorité des relations proposent des modèles empiriques provenant de bases de données qui se sont complétées au fil des années. Ces modèles expérimentaux sont la réponse des scientifiques à la difficulté de pouvoir lier un modèle physique au monde de la biologie.

Les deux grandeurs de vitesse qui intéressent les concepteurs de passes à poissons sont la vitesse maximale de sprint et la vitesse maximale de croisière. La première est la vitesse que l'écoulement ne doit pas dépasser si l'objectif est de pouvoir franchir la passe. Elle correspond à la vitesse maximale atteignable par le poisson. La deuxième représente la limite supérieure de vitesse à partir de laquelle le poisson commence à épuiser ses réserves énergétiques. Elle indique donc des zones de vitesse à atteindre par endroits dans la passe si la remontée est séquentielle et que le poisson désire se reposer.

Modèle de vitesse de Videler

Le modèle de [Videler \(1993\)](#) se base sur une compilation d'essais expérimentaux. Bien que la vitesse soit influencée par la température du milieu, les lois avancées ne sont fonction que de la longueur du spécimen. Les relations déterminées sont valables pour des individus de taille inférieure à 50 centimètres.

La vitesse maximale de nage $U_{\max}$ [m/s] en fonction de la longueur L [m] est :

$$U_{\max} = 0.4 + 7.4 \cdot L \quad (3.1)$$

Pour des spécimens de longueur située entre 10 et 15 centimètres, les vitesses de nage se situent entre 1.15 et 1.5 [m/s] (Figure [3.4](#)).

La vitesse critique U_{crit} [m/s] est donnée pour une longueur L [m] par :

$$U_{\text{crit}} = 0.15 + 2.4 \cdot L \quad (3.2)$$

Pour des individus de 10 à 15 centimètres, les vitesses de nage varient entre 0.4 et 0.5 [m/s] (Figure [3.4](#)).

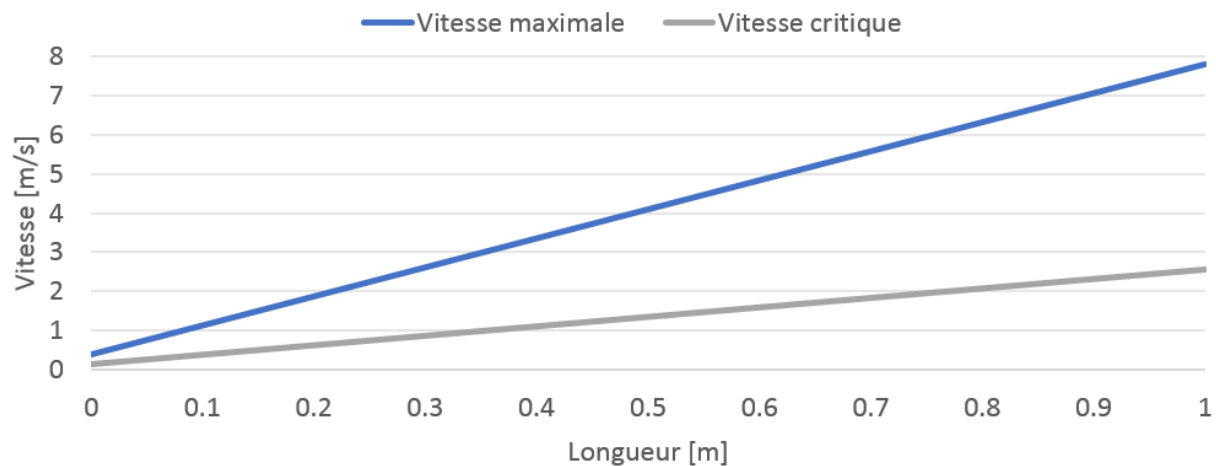


FIGURE 3.4 – Représentation graphique des vitesses maximale et critique selon [Videler \(1993\)](#).

Ces relations donnent des résultats cohérents pour certaines espèces de cyprinidés (poissons d'eau douce) en accord avec d'autres travaux de la littérature. Cependant, ce premier modèle présente quelques points qui peuvent être améliorés ([Baudouin et al., 2014](#)). D'une part, il généralise une relation sans tenir compte de l'espèce ni du type de nage utilisé. En outre, le modèle de [Videler \(1993\)](#) considère une influence unique de la longueur du poisson sur sa vitesse. La température n'intervient pas dans l'équation trouvée mais il a été montré que celle-ci joue un rôle sur cette dernière ([Wardle, 1975](#); [Zhou, 1982](#); [Beach, 1984](#)).

Modèle de vitesse de Wardle-Zhou

D'autres essais ont permis de caractériser la vitesse d'un poisson U [m/s]. L'expression trouvée part d'une constatation simple. La propulsion qui dote le poisson d'une certaine vitesse dépend de son ondulation corporelle mais également du mouvement de sa nageoire caudale ([Larinier et al., 1994](#)) :

$$U = A \cdot f$$

avec

- $A [m] = [0.6 - 0.8] \cdot L$, la distance parcourue par le poisson ;
- $f [1/s]$, la fréquence d'ondulation du poisson.

Wardle (1975) a ajusté cette expression afin de l'appliquer à la notion de vitesse maximale. Premièrement, il a pris une valeur moyenne de la distance parcourue par un poisson. Ensuite, il a réexprimé la fréquence maximale d'ondulation en fonction du temps minimal écoulé entre deux contractions musculaires qui assurent la propulsion, $t [s]$:

$$U_{\max} = 0.7 \cdot \frac{L}{2t} \quad (3.3)$$

D'autres tests ont ensuite souligné le fait que le temps entre deux contractions se réduit pour des individus de plus petite taille ainsi que pour une température plus basse.

Zhou (1982) a établi une expression empirique du temps écoulé entre deux contractions en fonction de la longueur du poisson $L [m]$ et de la température des muscles associable à celle du milieu $T [^{\circ}C]$. Les résultats enregistrés proviennent de données récoltées sur des poissons marins.

$$t = 0.17 \cdot L^{0.4288} + 0.0028 \cdot \ln(T) - 0.0425 \cdot L^{0.4288} \cdot \ln(T) - 0.0077 \quad (3.4)$$

Ainsi, en injectant le temps de contraction minimal [équ. 3.4] dans l'expression [équ. 3.3], il est possible d'obtenir une relation de la vitesse maximale instantanée pour un poisson (Figure 3.5) :

$$U_{\max} = \frac{0.35 \cdot L}{0.17 \cdot L^{0.4288} + 0.0028 \cdot \ln(T) - 0.0425 \cdot L^{0.4288} \cdot \ln(T) - 0.0077} \quad (3.5)$$

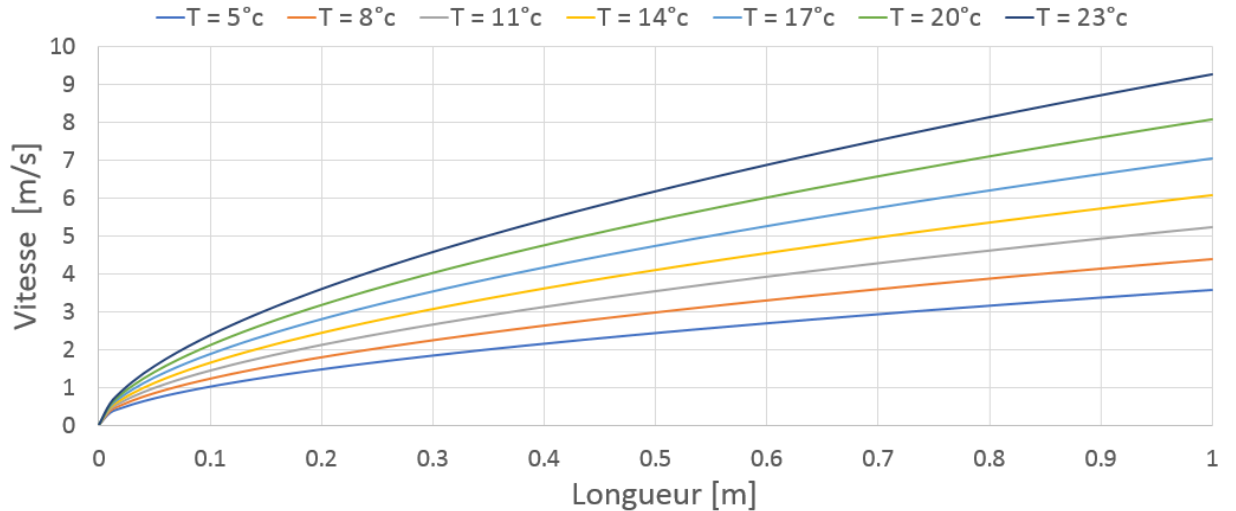


FIGURE 3.5 – Représentation graphique de la vitesse maximale théorique selon le modèle de Wardle-Zhou (1982).

Parallèlement à ces travaux, des expérimentations ont été menées en Grande-Bretagne sur le temps d'endurance. Celles-ci cherchaient à démontrer la relation qui pouvait exister

entre vitesse, endurance, température et taille du poisson. Ainsi, le temps d'endurance associé à la vitesse de sprint d'un individu t_m [s] a pu être dégagé par [Beach \(1984\)](#) :

$$t_m = \frac{E}{P_c - P_r} \quad (3.6)$$

avec

- E [J], la quantité totale d'énergie musculaire, fournie par les muscles blancs ;
- P_c [W], la puissance chimique totale à développer ;
- P_r [W], la puissance fournie par l'apport d'oxygène, c'est-à-dire les muscles rouges.

En posant certaines hypothèses sur la concentration énergétique des muscles blancs et en utilisant la loi de [Shearer et al. \(1994\)](#) qui lie la masse du poisson à sa longueur, nous trouvons l'énergie E directement liée à la longueur du poisson L [m] :

$$E = 2790 \cdot 10.386 \cdot L^{2.964} \quad (3.7)$$

La puissance totale P_c est donnée par la formule empirique de [Beach \(1984\)](#) qui dépend de la longueur de l'individu L [m], de la température du muscle T [°C] et de la vitesse de nage U [m/s] :

$$P_c = 0.9751 \cdot e^{-0.00522 \cdot T} \cdot U^{2.8} \cdot L^{-1.15} \quad (3.8)$$

La puissance dispensée par les muscles rouges P_r a été évaluée par [Brett \(1965\)](#). Elle est fonction de la longueur L [m] uniquement :

$$P_r = 4.44 \cdot 10.386 \cdot L^{2.964} \quad (3.9)$$

En insérant les résultats obtenus [équ. 3.7, 3.8, 3.9] dans l'expression du temps d'endurance [équ. 3.6], la vitesse U [m/s] peut être isolée et exprimée par :

$$U_{mb} = \left[\frac{10.836}{0.9751} \cdot L^{4.114} \cdot e^{0.00522 \cdot T} \left(\frac{2790}{t_m} + 4.44 \right) \right]^{1/2.8}$$

En considérant un temps d'endurance de sprint de 20 secondes, il est possible de déterminer la vitesse maximale de sprint U_{mb} (Figure [3.6]).

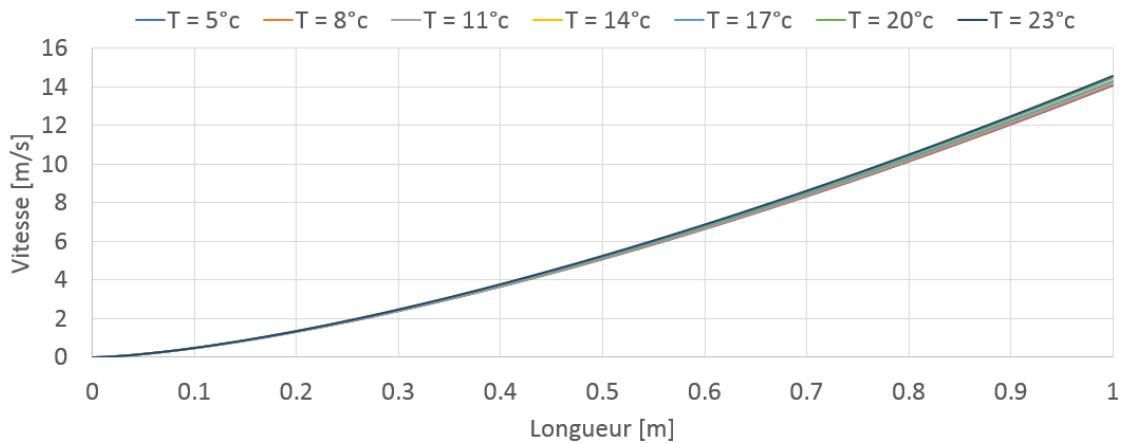


FIGURE 3.6 – Représentation graphique de l'évolution de la vitesse maximale de sprint ($t_m = 20$ [s]) selon le modèle de [Beach \(1984\)](#).

Nous notons que ce modèle est en contradiction avec celui de [Wardle-Zhou \(1982\)](#) puisque la vitesse d'endurance ne varie pratiquement pas avec la température.

Enfin, [Zhou \(1982\)](#) a effectué des tests sur des salmonidés afin d'estimer le temps d'endurance critique. Ce dernier est un indicateur de la vitesse critique U_{crit} et donc du déclenchement de la fatigue d'un poisson. En d'autres termes, le dépassement de cette vitesse critique entraîne la contraction des muscles blancs et la consommation des réserves de glycogène du spécimen. Cette vitesse est d'importance capitale pour le dimensionnement des passes à bassins afin de pouvoir garantir des zones de repos lors de la montaison. Une formule empirique a pu être dégagée :

$$U_{\text{crit}} = 1.0091 \cdot e^{0.001904 \cdot T} \cdot L^{0.4107} \cdot P_r^{0.357} \quad (3.10)$$

En exprimant la puissance fournie par les muscles rouges [éq. [3.9](#)] dans l'expression précédente [éq. [3.10](#)], la vitesse critique (Figure [3.7](#)) peut s'exprimer en fonction de la longueur du poisson L [m] et de la température T [°C] :

$$U_{\text{crit}} = 4.02252 \cdot e^{0.001904 \cdot T} \cdot L^{1.46885}$$

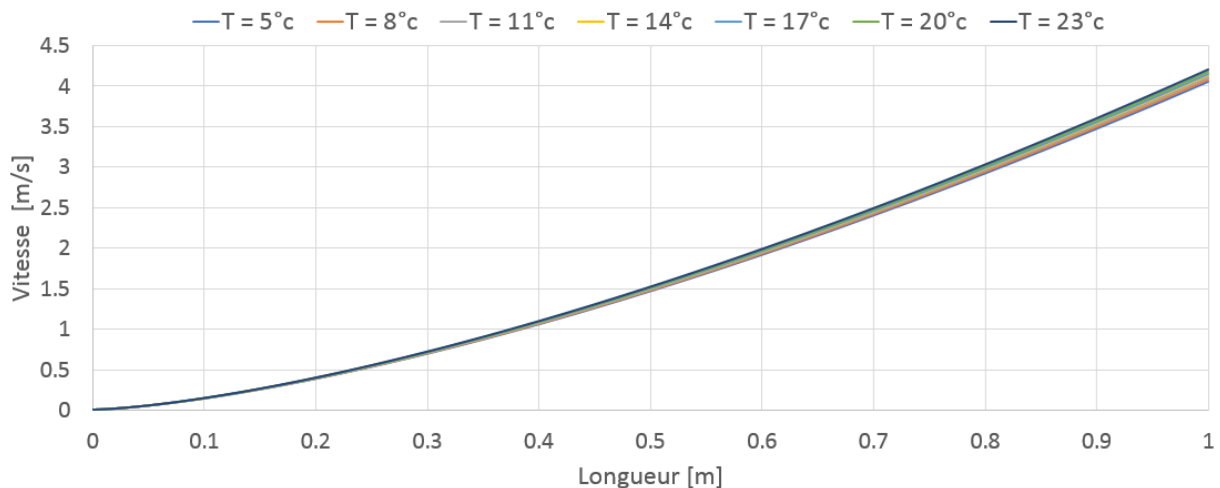


FIGURE 3.7 – Représentation graphique de la vitesse critique théorique selon le modèle de [Wardle-Zhou \(1982\)](#).

Les expressions empiriques obtenues par [Wardle-Zhou \(1982\)](#) et [Beach \(1984\)](#) sont des modèles qui tiennent compte de la longueur et de la température du milieu. Il est possible d'émettre certaines constatations qui remettent en cause l'exactitude de ces modèles. Premièrement, ils se basent sur un nombre restreint d'espèces, ce qui rend la transposition des modèles à d'autres espèces relativement délicate. Ensuite, ces modèles sont croissants et ne mettent pas en lumière le fait que des températures optimales existent pour les vitesses de nage des poissons. D'autre part, ces modèles basés sur la conversion empirique d'énergie musculaire omettent certains paramètres comme le rapport masse-taille, la proportion de muscles blancs et rouges ou le taux de glycogène disponible. Enfin, la conversion énergétique de l'énergie musculaire en énergie cinétique est estimée sans perte. Cette hypothèse de rendement parfait conteste l'exactitude du modèle.

Modèle de vitesse de Katopodis et Gervais

Les modèles déjà présentés mettent en évidence la possibilité de prédire les vitesses d'un poisson selon sa taille et la température du milieu qui l'entoure. Ils prennent dans leur développement mathématique les effets d'autres paramètres. En revanche, ces modèles sont généralisés. Ils ne tiennent pas compte de l'espèce et omettent la prise en compte de la cinématique de nage de l'individu étudié. [Katopodis and Eng \(1992\)](#) ont initié un processus de modélisation qui visait à faire abstraction des différences entre individus.

Le modèle construit est généralisable à toute espèce à condition de respecter des différences dans les paramètres employés. Il permet donc de lier et de comparer les résultats entre eux. En compilant des données provenant de plusieurs études, ils ont récolté suffisamment d'informations pour élaborer un modèle paramétrique. Pour ce faire, ils ont entrepris un développement mathématique qui lie la vitesse de nage au temps d'endurance. Afin d'extrapoler le modèle à des espèces de caractéristiques différentes, ils ont adimensionnalisé les variables du modèle. La relation trouvée est fonction de paramètres chiffrés qui varient d'une espèce à l'autre. Le modèle est donc applicable à toute espèce à condition d'en ajuster les paramètres. Les valeurs de ces paramètres sont reprises dans des bases de données complétées au fil des années ([Katopodis and Gervais, 2016](#)).

La première étape du développement consiste à adimensionnaliser la vitesse de nage. Ceci peut être entrepris en divisant cette vitesse par la racine du produit de l'accélération gravitationnelle g [m/s^2] par la longueur du poisson L [m] :

$$U_* [-] = \frac{U}{\sqrt{g \cdot L}} \left[\frac{[m/s]}{\sqrt{[m/s^2] \cdot [m]}} \right] \quad (3.11)$$

Ensuite, le temps d'endurance peut être adimensionnalisé à l'aide des mêmes variables :

$$t_* [-] = t \cdot \sqrt{\frac{g}{L}} \left[[s] \cdot \sqrt{\frac{[m/s^2]}{[m]}} \right] \quad (3.12)$$

Ces deux variables adimensionnelles peuvent finalement être mises en relation dans une courbe d'endurance dont l'équation paramétrique est ([Katopodis and Gervais, 2012](#)) :

$$U_* = K \cdot t_*^{-\eta} \quad (3.13)$$

avec K et η , qui sont deux paramètres numériques dépendants de l'espèce.

En réécrivant les variables adimensionnelles [équ. 3.11 et 3.12] dans l'expression de la courbe d'endurance [équ. 3.13], il est possible de déterminer des valeurs chiffrées de vitesse U [m/s] :

$$U = K \cdot g^{0.5 \cdot (1-\eta)} \cdot t^{-\eta} \cdot L^{0.5 \cdot (1+\eta)} \quad (3.14)$$

La valeur de l'accélération gravitationnelle est connue : $g = 9.81$ [m/s^2]. Le temps d'endurance peut quant à lui être estimé selon l'activité de nage ([Katopodis and Gervais, 2012](#)) :

- $U_{\max}$: $t = 1$ [s];
- U_{mb} : $t = 20$ [s];

— $U_{\text{crit}} : t = 1800 \text{ [s]}$.

Ainsi, il est possible d'exprimer la vitesse de nage uniquement en fonction de la longueur du poisson $L \text{ [m]}$.

Par ailleurs, une illustration des courbes d'endurance est représentée à la Figure [3.8]. Elle se base sur des essais réalisés par [Katopodis and Eng \(1992\)](#) sur des espèces nord-américaines dont la taille ne dépassait pas soixante centimètres. Nous remarquons que pour de courtes durées, la vitesse du poisson est relativement identique qu'il s'agisse d'une espèce anguilliforme ou d'une espèce subcarangiforme. En revanche, les espèces subcarangiformes développent une vitesse plus importante sur de plus longues durées.

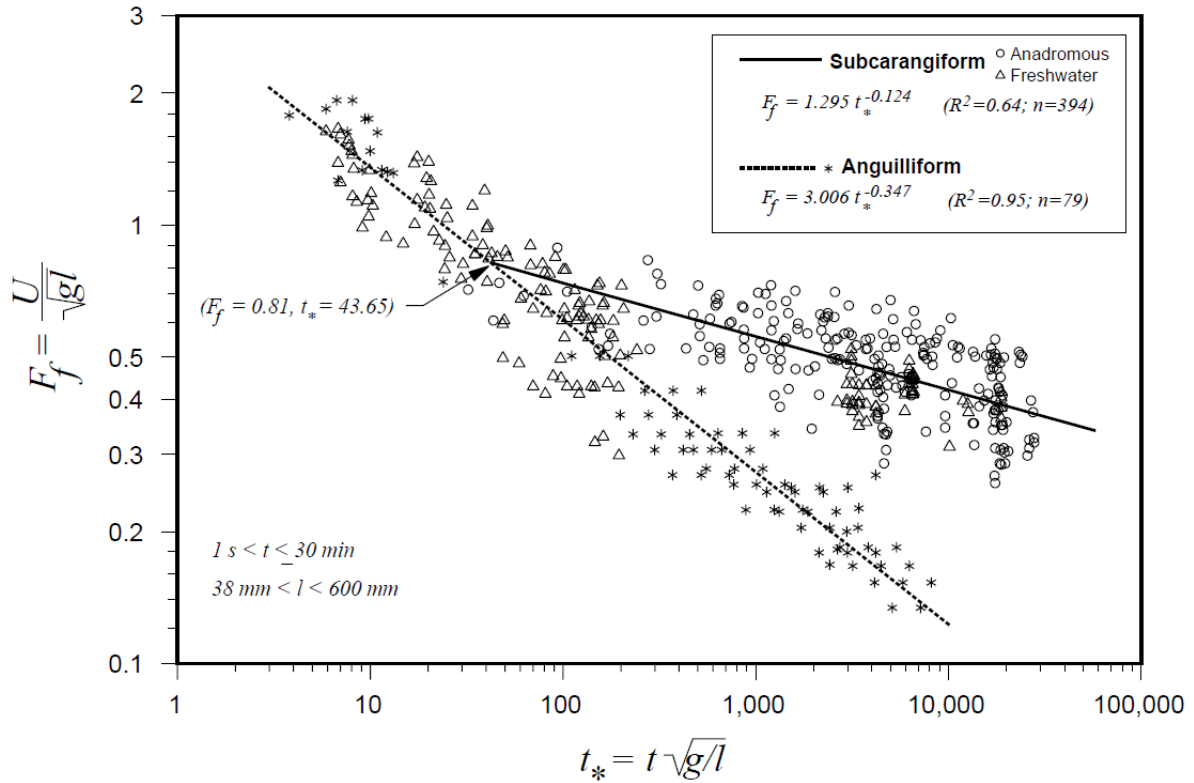


FIGURE 3.8 – Illustration du modèle de vitesse de [Katopodis and Eng \(1992\)](#).

Modèle de vitesse de Wolter et Arlinghaus

Sur le même principe développé par [Katopodis \(1994\)](#), [Wolter and Arlinghaus \(2003\)](#) ont débuté des expériences tentant de lier la vitesse du poisson à sa taille. La différence majeure entre ce modèle et celui de [Katopodis and Gervais \(2012\)](#) réside dans la façon d'exprimer directement la vitesse sur base de la longueur du poisson sans adimensionnalisation des variables. Il n'y a pas d'étape intermédiaire à effectuer qui consiste à poser un temps d'endurance défini par la capacité de nage du poisson. Les formules empiriques trouvées par [Wolter and Arlinghaus \(2003\)](#) expriment d'une part la vitesse limite de sprint $U_{\text{mp}} \text{ [m/s]}$ et d'autre part la vitesse critique $U_{\text{crit}} \text{ [m/s]}$.

A noter que ces relations restent valables pour un nombre plus restreint d'espèces en raison des données disponibles de l'époque. Les modèles de [Katopodis and Gervais](#)

(2012) et de Wolter and Arlinghaus (2003) sont des modèles empiriques qui basent leurs lois sur des résultats rassemblés dans des bases de données. Ces dernières sont devenues plus complètes avec les expériences effectuées d'année en année. Ces méthodes empiriques ont l'avantage de différencier les relations vitesse-longueur en fonction des espèces et de l'activité de nage de celles-ci. Un exemple est illustré à la Figure [3.9], il montre les données expérimentales collectées pour des poissons de longueur inférieure à six centimètres par Wolter and Arlinghaus (2004). Celles-ci permettent d'obtenir des régressions de vitesse plus ou moins fiables et illustrent la plus grande disparité qui existe pour les vitesses de sprint (*burst*).

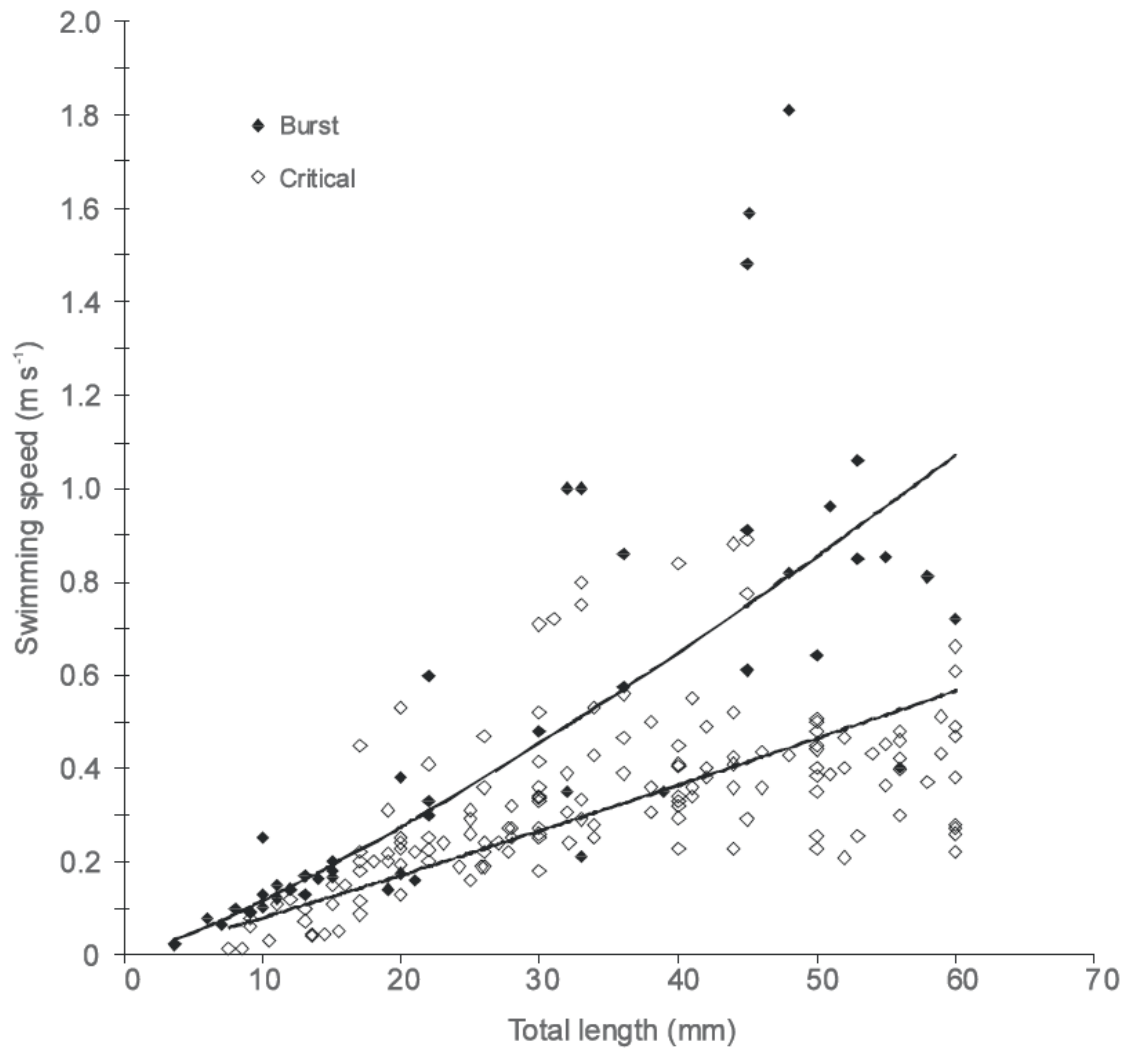


FIGURE 3.9 – Relations de vitesse obtenues par Wolter and Arlinghaus (2004).

Comparaison des modèles de vitesse

Il est difficile de faire un comparatif des différents modèles exposés en termes de vitesses obtenues. Ceci s'explique par les conditions et les types d'espèces différents utilisés pour chaque équation établie. Il existe deux sortes de modèles : les modèles expérimentaux (Videler, 1993; Katopodis, 1994; Wolter and Arlinghaus, 2003) et les modèles physiologiques basés sur une réflexion mathématique poussée (Wardle-Zhou, 1982).

Le modèle physiologique possède l'avantage de tenir compte de nombreux paramètres : rapport taille-longueur, quantité de glycogène, température du milieu, proportion musculaire, etc. Néanmoins, il ne tient pas compte des espèces et des cinématiques de nage.

Les modèles expérimentaux ont le grand avantage d'exprimer la vitesse en fonction d'un paramètre unique : la longueur du poisson. Ils sont établis sur des bases physiologiques plus précises qui tiennent compte de l'espèce. De plus, les relations trouvées sont adaptées régulièrement en fonction des nouvelles études menées sur le sujet. En revanche, ils sont déterministes et n'assurent pas la certitude de convenir à chaque taille d'espèce étudiée.

3.4 Application aux espèces étudiées

3.4.1 Caractéristiques migratoires

Dans cette partie, une attribution des termes explicités à la section [3.2.2] sera faite pour les deux espèces mises en avant dans ce travail. Par ailleurs, le concept de migration étant étroitement lié au cycle biologique des poissons, un bref récapitulatif de la vie des individus sera présenté.

Cas du saumon atlantique

Le saumon atlantique est une espèce amphibiotique **anadrome** (Malbrouck et al., 2007). Elle alterne son cycle de vie entre milieu marin et milieu d'eau douce où elle se reproduit.

Les œufs du saumon atlantique d'Europe éclosent dans les cours d'eau d'Europe occidentale, aux abords des îles britanniques, en Norvège, en Islande et au Groenland. C'est donc une espèce qualifiée de potamotoque puisqu'elle voit le jour en rivière, généralement dans le haut des bassins versants. Les jeunes alevins profitent ainsi des eaux peu profondes et oxygénées pour démarrer leur cycle biologique.

Ensuite, l'alevin se transforme pour laisser place au tacon. Ce stade se caractérise physiquement par des stries verticales de couleur brune et des mouchetures rouges. Durant une période comprise entre une et six années, le tacon passe sa vie en rivière jusqu'à ce qu'il atteigne une taille de 12 à 15 [cm]. Passé cet intervalle, le tacon commence à smoltifier.

La smoltification est le phénomène qui prépare le saumon à sa vie en mer. Ce stade se caractérise par une irisation argentée de sa robe et des changements morphologiques qui préparent le saumon à s'adapter aux eaux salines. Les smolts dévalent les rivières au printemps, entre les mois de mars et de mai. Ils mémorisent l'odeur de leur rivière afin d'y retourner dans le futur pour y frayer (Se dit de la femelle du poisson qui dépose ses œufs, et du mâle qui les féconde).

Arrivé en mer, le smolt démarre sa croissance. Il grandit dans l'Atlantique Nord et se nourrit sur une période allant d'un à trois ans. Sa coloration argentée laisse place à une coloration qui tend vers les tons roses-rouges. Ainsi, il atteint sa taille adulte qui varie de 40 à 120 centimètres selon les individus. Une fois sa maturation sexuelle atteinte, il se

prépare à une deuxième migration vers la rivière qui l’a vu naître.

Le saumon remonte les rivières afin se s’y reproduire. Il migre vers l’amont d’avril à novembre. Arrivé en frayère, il y pond ses œufs vers la fin de l’automne. Ceux-ci donneront naissance à la génération suivante. Le cycle biologique de la plupart des saumons est achevé. La majorité d’entre eux meurent après s’être reproduits. Les autres redescendent vers la mer afin d’opérer un nouveau cycle, ils sont appelés charognards.

Une illustration sommaire du cycle de vie du saumon est représentée à la Figure [3.10].

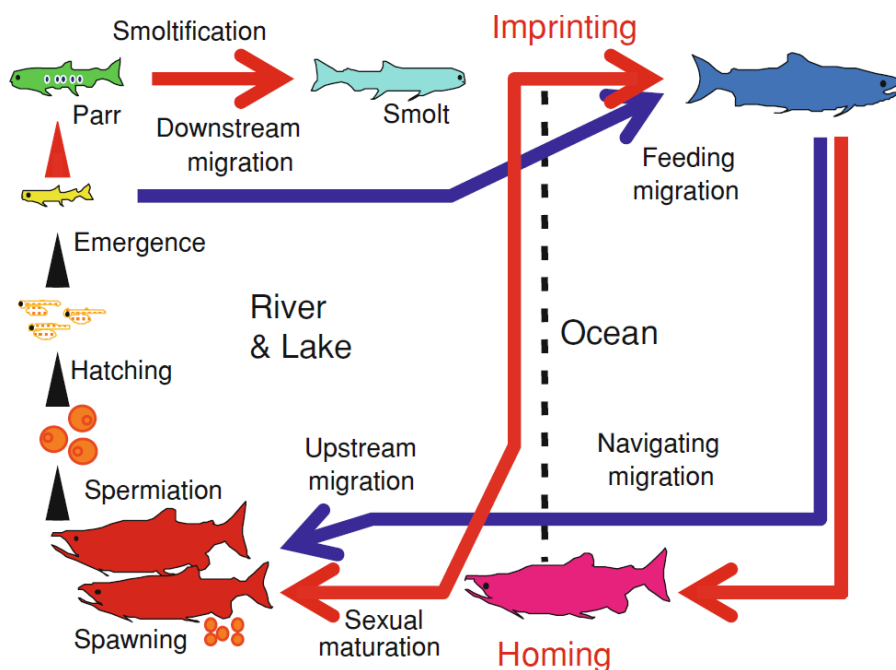


FIGURE 3.10 – Schématisation du cycle biologique du saumon atlantique (Palstra and Planas, 2012).

Au moment des migrations, une attention particulière peut être portée sur la température des eaux constatée. En effet, notre étude se penche sur les remontées d’individus. Comme ceux-ci migrent à des périodes de l’année définies, la température de l’eau influencera leurs mouvements. Cela implique que les premières observations de montaison seront faites à partir d’un certain intervalle de température bien précis.

Des rapports réguliers, rédigés par des équipes du service de biologie comportementale de l’Université de Liège, retracent l’inventaire des poissons capturés au droit de certains barrages en Meuse belge. La mise à jour des résultats permet de mettre en évidence des tendances en évolution. Les résultats dénombrés les plus récents proviennent du rapport de 2018-2019 (Benítez et al., 2019). Des chiffres y sont recensés pour les saumons atlantiques lors des montaisons et des dévalaisons.

Concernant la montaison des individus, des résultats ont été mesurés au barrage de Lixhe proche de la frontière néerlandaise. Les remontées ont été observées en période automnale et hivernale. La température de l’eau à ce moment de l’année est plutôt fraîche. Les remontées se font généralement à une température avoisinant 8 [°C]. Au-delà de 13 [°C], les poissons recensés deviennent peu nombreux ce qui indique qu’ils privilégient

les remontées lors de températures plus basses.

Pour les dévalaisons en revanche, la période du printemps semble être privilégiée. En effet, les smolts qui migrent vers l'Océan Atlantique sont remarqués principalement durant les mois de mars, avril et mai. La température de l'eau de la Meuse à cette période de l'année peut varier entre 8 et 17.5 [°C]. Un optimum du nombre de descentes est observé aux alentours d'une température de 13 [°C]. Les résultats ont été comptabilisés au droit du barrage de Méry dans la province de Liège.

Cas de l'anguille européenne

L'anguille européenne est une espèce **catadrome** (Palstra and Planas, 2012). Elle change de milieu au cours de son cycle de vie. Elle se reproduit en mer où naît sa progéniture qui, elle, se développera en eau douce. Cependant, même si la vie de l'anguille semble être régie par deux migrations, de nombreuses inconnues subsistent encore concernant son cycle biologique exact.

L'anguille est une espèce thalassotoque, c'est-à-dire qu'elle voit le jour en milieu marin. Les œufs de l'anguille européenne éclosent dans l'Océan Atlantique, plus précisément dans la mer des Sargasses au sud-est de la Floride. Les jeunes larves nommées *leptocéphales* sont observées dans cette zone de fin février à fin juin (Baran et al., 2011). C'est de cet endroit qu'elles commencent la première des deux migrations qui rythmeront le cours de leur vie.

La migration trophique (qui s'effectue pour des besoins alimentaires) des larves se fait de manière passive. Elles sont emportées par le Gulf Stream (Castonguay et al., 1994), un courant marin nord-atlantique, depuis la mer des Sargasses jusqu'aux côtes européennes. La durée exacte de cette migration est encore sujette à controverse au sein de la littérature. Des périodes de dérive d'un an (Van den Thillart et al., 2009) à 18 mois (Baran et al., 2011) sont estimées pour atteindre le vieux continent. Cependant, des observations ont montré que certaines particules inertes aussi légères que ces larves mettaient trois années à parcourir le même trajet (Kettle and Haines, 2006). Le débat reste ouvert.

Arrivées à destination après leur long périple, les leptocéphales arrivent aux abords des estuaires européens (Van den Thillart et al., 2009) où ils commencent leur métamorphose en civelles transparentes (Lecomte-Finiger, 1992). Le déclenchement de cette métamorphose se caractérise par différents changements morphologiques : chute de la teneur en eau, évolution de la forme, arrêt de l'alimentation et diminution du poids et de la taille. Certaines civelles tentent de coloniser les milieux d'eau douce tandis que d'autres resteront dans les zones estuariennes.

En raison de leur faible vitesse et de leur capacité physique limitée, les civelles ne sont pas capables de franchir les barrières intertidales à la nage. Elles profitent donc des mouvements des marées afin de se laisser porter à l'intérieur des réseaux fluviaux (Harrison et al., 2014). Les remontées se produisent donc par vagues, d'octobre à mars dans l'estuaire de l'Adour par exemple (Prouzet, 2003). Les civelles arrivent donc en rivière par amas où elles vont véritablement commencer leur croissance. Le terme civelle sera utilisé durant toute la période de pigmentation de l'anguille jusqu'à sa coloration totale. Une fois teinte la civelle passe au stade biologique suivant : l'anguille jaune.

Parmi les anguilles qui colonisent les rivières, celles-ci se distinguent par des comportements différents. Il est possible de les classer en quatre catégories indépendantes (Feunteun et al., 2003; Edeline et al., 2006). Les *fondeurs* qui adoptent un comportement sédentaire dès qu'ils trouvent un habitat qui leur est favorable. Les *pionniers* qui tentent de rejoindre des zones situées plus en amont du bassin versant. Les *résidents* qui s'accommodent à une place en particulier durant quelques années. Les *nomades* qui changent de place plusieurs fois au cours de leur période en eau douce. Il est à noter que les zones dans lesquelles se retrouvent les anguilles dépendent de leur sexe. Par exemple, seules les femelles se retrouveront dans des secteurs situés plus à l'amont de la rivière (Aprahamian, 1988).

La croissance de l'anguille jaune peut durer de 4 à 20 ans (Van den Thillart et al., 2009). Ce stade biologique est caractérisé par l'apparition de la différenciation sexuelle entre mâle et femelle. Même si ce phénomène pose encore quelques interrogations au niveau de son déroulement, le dimorphisme sexuel se produit au-delà d'une taille de vingt centimètres (Baran et al., 2011). A la suite de cela, les anguilles vont continuer à se nourrir dans le but d'atteindre leur maturation sexuelle. Une fois cette dernière aboutie, l'anguille est qualifiée d'argentée. Ce stade est la dernière étape de son cycle biologique, celui qui lui permettra de se reproduire en mer.

L'anguille jaune évolue en anguille argentée au cours d'un processus appelé *argenteure* durant environ six mois (Van den Thillart et al., 2009). Ce phénomène survient à des tailles différentes selon le sexe, respectivement de 27 à 50 [cm] pour le mâle et entre 45 et 120 [cm] pour la femelle (Baran et al., 2011). Les modifications morphologiques rencontrées sont multiples : coloration de la peau dans les tons argentés (Tesh, 1977), augmentation de la taille de l'œil (Schmidt, 1906), adaptation de la vessie natatoire à des zones profondes (Robins et al., 1979). Conjointement à ces adaptations, l'anguille ajuste sa ionorégulation (transfert d'ions au niveau des surfaces d'échanges) ainsi que son osmorégulation (mécanismes qui contrôlent la pression osmotique) au milieu salin (Palstra and Planas, 2012).

Parallèlement aux modifications morphologiques subies, l'anguille a réalisé des réserves d'énergie qu'elle stocke sous forme de graisses (Belpaire et al., 2009). Cette quantité d'énergie est nécessaire à son périple migratoire de reproduction qui s'étendra sur plusieurs mois. Cette deuxième migration se déroule en conditions de famine (Palstra and Planas, 2012). Les dispositions dans lesquelles se passent cette migration témoignent des capacités d'endurance hors normes de cette espèce. Cette seconde migration se déroule à des profondeurs très élevées afin de pouvoir s'orienter au moyen des gyres (tourbillons présents dans les océans) subtropicaux (Palstra and Planas, 2012).

En effet, l'anguille se reproduit à des profondeurs considérables dans des régions océaniques tropicales oligotrophiques (qualifie les conditions d'un milieu pauvre en matières organiques) (Palstra and Planas, 2012). Il semblerait qu'elle privilégie la mer des Sargasses, seul endroit connu à ce jour où l'anguille européenne fraie (Als et al., 2011). La période de fraie s'étend de janvier à juillet à des profondeurs de quelques centaines de mètres (Kleckner et al., 1983). Une activité plus intense de ponte surviendrait aux mois de mars et d'avril (Baran et al., 2011). L'exactitude de ces phénomènes n'est pas vérifiable, à l'heure actuelle aucun œuf d'anguille n'a été capturé en milieu naturel (Rigaud et al., 2008).

Les anguilles sont des espèces sémelpares (Palstra and Planas, 2012), ce qui signifie qu'elles se reproduisent une seule fois dans leur vie. Une fois la reproduction achevée, elles meurent. Les œufs donneront naissance à une nouvelle génération de larves qui perpétueront le même cycle biologique.

Même si le cycle de vie de l'anguille est connu dans les grandes lignes, des zones d'ombre subsistent au tableau (Baran et al., 2011). A quel âge exact se produit l'argenteure ? Comment est-il concevable que certaines anguilles passent l'intégralité de leur vie en mer alors que d'autres rejoignent les rivières ? Quand et comment se déroule exactement la différenciation sexuelle ?

Une illustration sommaire du cycle biologique de l'anguille européenne est représentée à la Figure [3.11].

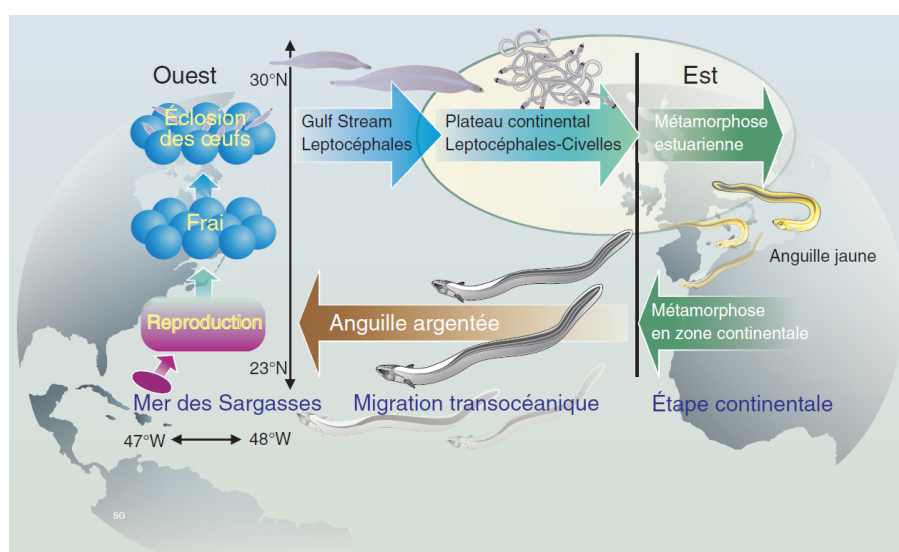


FIGURE 3.11 – Schématisation du cycle biologique de l'anguille européenne (Rigaud et al., 2008).

A nouveau, il est utile de se renseigner sur les conditions thermiques auxquelles se produisent les remontées d'anguilles dans le bassin mosan. Des résultats recensés en Meuse belge par les équipes de Michaël Ovidio de l'Université de Liège sont compilés également pour l'anguille. Les données citées proviennent du même rapport utilisé pour les saumons (Benitez et al., 2019).

Les captures se sont effectuées au barrage de Lixhe. La grande majorité des remontées s'observent au courant des mois de juin et juillet. Les premières prises se font à partir de 19.1 [°C] et le pic est observé à 20.4 [°C]. Les anguilles semblent donc privilégier les eaux plus chaudes qui ne sont atteintes que durant l'été en Belgique. La moyenne de taille des individus est de 419 [mm] avec la plupart des anguilles qui sont comprises entre 200 et 500 [mm].

Les résultats observés sont en adéquation avec des travaux précédents menés sur les conditions d'entrée des anguilles en Meuse belge. Ceux-ci observaient également une majorité de remontées durant l'été. Les captures se sont réalisées principalement entre

la mi-juin et la fin juillet, à des températures situées entre 19 et 26 [°C] (Nzau Matondo et al., 2017).

3.4.2 Caractéristiques natatoires

Cette sous-section présente les vitesses maximale et critique des deux espèces étudiées dans le cadre de ce travail : le saumon atlantique et l’anguille européenne. D’une part, des résultats prévus par le modèle de Katopodis and Gervais (2016), explicité plus haut, seront donnés. D’autre part, des mesures de vitesse obtenues dans la littérature seront présentées pour ces deux espèces.

Cas du saumon atlantique

Différentes valeurs de vitesse maximale de sprint U_{mb} provenant des modèles sont présentées dans le Tableau [3.1]. En raison des tailles de poisson utilisées, les vitesses indicatives sont données pour des longueurs comprises entre 10 et 15 [cm]. Pour le modèle de Katopodis and Gervais (2016), un temps d’endurance de vingt secondes est posé. Cette gamme de taille est celle des saumons qui remonteront la passe dans le modèle réduit. La justification de cet intervalle sera explicitée plus tard à la section [4.2.3].

Modèle	Sous-catégorie	Validité	Formule	U_{mb} [m/s]
Videler	cyprinidés (1993)	$L < 50\text{ cm}$	voir [éq. 3.1]	1.15 - 1.5
Wardle Zhou	poissons marins (1982)	$8 < T < 14^\circ C$	voir [éq. 3.5]	1.23 - 2.07
Katopodis & Gervais	subcaran. (1992)	$3.8 < L < 60\text{ cm}$	$U_* = 1.295 \cdot t_*^{-0.124}$	0.67 - 0.84
	salmonidés (2016)	$3.8 < L < 60\text{ cm}$	$U_* = 4.004 \cdot t_*^{-0.25}$	1.06 - 1.36
	saumon atl. (2016)	$4.8 < L < 56.7\text{ cm}$	$U_* = 2.049 \cdot t_*^{-0.132}$	1.01 - 1.27
Wolter & Arlinghaus	salmonidés (2003)	$L < 6\text{ cm}$	$U = 0.0068 \cdot L^{1.24}$	2.05 - 3.40
	salmonidés (2004)	$L < 100\text{ cm}$	$U = 0.028 \cdot L^{0.79}$	1.06 - 1.47

TABLE 3.1 – Synthèse des résultats expérimentaux de vitesse maximale de sprint obtenus pour les saumons atlantiques.

Les modèles de Videler (1993) et Wardle-Zhou (1982) sont généraux et décrivent une vitesse maximale U_{max} . Pour cette raison, ils sont moins fiables quant à leur application au saumon atlantique. De même, le premier modèle de Wolter and Arlinghaus (2003) n’est valable que pour des espèces inférieures à six centimètres. Sortant de cette condition de validité, l’intervalle de vitesse est peu crédible compte tenu de l’échantillon visé. Ainsi, il est possible de voir que les autres résultats convergent vers des vitesses assez semblables et supérieures à 1.0 [m/s].

Le même Tableau [3.2] a été dressé pour les vitesses critiques qui marquent le seuil de fatigue des individus. Un temps d’endurance de trente minutes (1800 secondes) a été fixé pour le modèle adimensionnel de Katopodis and Gervais (2016). La gamme de taille visée reste identique.

Les mêmes remarques émises précédemment peuvent être faites. Les résultats les plus plausibles sont ceux obtenus pour l’espèce de poisson étudiée : le saumon atlantique. Les formules empiriques situent le seuil de fatigue à une vitesse de 0.6 [m/s].

Modèle	Sous-catégorie	Validité	Formule	U_{crit} [m/s]
Videler	cyprinidés (1993)	$L < 50 \text{ cm}$	voir [éq. 3.2]	0.4 - 0.5
Wardle Zhou	poissons marins (1982)	$8 < T < 14^\circ\text{C}$	voir [éq. 3.10]	0.14 - 0.25
Katopodis & Gervais	subcaran. (1992)	$3.8 < L < 60 \text{ cm}$	$U_* = 1.295 \cdot t_*^{-0.124}$	0.38 - 0.49
	salmonidés (2016)	$3.8 < L < 60 \text{ cm}$	$U_* = 4.004 \cdot t_*^{-0.25}$	0.34 - 0.44
	saumon atl. (2016)	$4.8 < L < 56.7 \text{ cm}$	$U_* = 2.049 \cdot t_*^{-0.132}$	0.56 - 0.70
Wolter &	salmonidés (2003)	$L < 20 \text{ cm}$	$U = 0.0198 \cdot L^{0.74}$	0.60 - 0.85
Arlinghaus	salmonidés (2004)	$L < 100 \text{ cm}$	$U = 0.019 \cdot L^{0.75}$	0.60 - 0.81

TABLE 3.2 – Synthèse des résultats expérimentaux de vitesse critique obtenus pour les saumons atlantiques.

Il est à noter que les modèles empiriques de Katopodis and Gervais (2016) et de Wolter and Arlinghaus (2003) proviennent d’une compilation de données établies par bon nombre de scientifiques. Certains résultats sont listés de manière non exhaustive au Tableau [3.3].

Etude	Taille [cm]	Temps [s]	T°c	Résultat [m/s]
Hertel (1966)	75 - 85	-	-	$U_{\text{max}} = 5.0 - 6.0$
Heggenes and Traaen (1988)	2.5	900	6 - 18	$U_{\text{crit}} = 0.15 - 0.25$
Booth et al. (1997)	60	600	12 - 18	$U_{\text{crit}} = 1.75 - 2.15$
McDonald et al. (1998)	7	300	11 - 13	$U_{\text{max}} = 0.6$

TABLE 3.3 – Résultats non exhaustifs de vitesses de saumons dans la littérature.

Cas de l’anguille européenne

De même que pour le saumon atlantique, des valeurs de vitesse maximale de sprint (U_{mb}) peuvent être recensées sur base des mêmes modèles. Celles-ci sont reprises dans le Tableau [3.4]. En raison des tailles de poisson utilisées, les vitesses indicatives sont données pour des longueurs comprises entre 15 et 20 [cm]. Pour le modèle de Katopodis and Gervais (2016), le même temps d’endurance de vingt secondes est considéré. Cette gamme de taille correspond aux anguilles qui remonteront le modèle réduit. A nouveau, cet intervalle sera légitimé à la section [4.2.3].

Modèle	Sous-catégorie	Validité	Formule	U_{mb} [m/s]
Videler	cyprinidés (1993)	$L < 50 \text{ cm}$	voir [éq. 3.1]	1.15 - 1.5
Wardle Zhou	poissons marins (1982)	$8 < T < 14^\circ\text{C}$	voir [éq. 3.5]	1.23 - 2.07
Katopodis & Gervais	anguilliforme (1992)	$3.8 < L < 60 \text{ cm}$	$U_* = 3.006 \cdot t_*^{-0.347}$	0.62 - 0.76
	anguilles (2016)	$3.8 < L < 60 \text{ cm}$	$U_* = 3.722 \cdot t_*^{-0.367}$	0.70 - 0.85
	anguille eur. (2016)	$7.2 < L < 49.8 \text{ cm}$	$U_* = 4.641 \cdot t_*^{-0.403}$	0.72 - 0.89

TABLE 3.4 – Synthèse des résultats expérimentaux de vitesse maximale de sprint obtenus pour les anguilles européennes.

Les modèles de Videler (1993) et Wardle-Zhou (1982) sont généraux et décrivent une vitesse maximale instantanée $U_{\max}$. De plus, leurs observations se basent sur des cyprinidés et des salmonidés. Ces modèles présentent peu d'intérêts pour établir la vitesse de nage de l'anguille. Le modèle de Katopodis and Gervais (2016) sera privilégié dans ce cas-ci. Ainsi, il est possible de voir que pour les relations de Katopodis and Gervais (2016) les résultats convergent vers des vitesses assez semblables supérieures à $0.6 - 0.7 [m/s]$.

Le même Tableau [3.5] a été dressé pour les vitesses critiques qui marquent le seuil de fatigue des individus. Un temps d'endurance de trente minutes (1800 secondes) a été fixé pour le modèle adimensionnel de Katopodis and Gervais (2016). La gamme de taille visée reste identique que pour la vitesse maximale de sprint.

Modèle	Sous-catégorie	Validité	Formule	$U_{\text{crit}} [m/s]$
Videler	cyprinidés (1993)	$L < 50 \text{ cm}$	voir [éq. 3.2]	0.4 - 0.5
Wardle Zhou	poissons marins (1982)	$8 < T < 14^{\circ}C$	voir [éq. 3.10]	0.14 - 0.25
Katopodis & Gervais	anguilliforme (1992)	$3.8 < L < 60 \text{ cm}$	$U_* = 3.006 \cdot t_*^{-0.347}$	0.13 - 0.16
	anguilles (2016)	$3.8 < L < 60 \text{ cm}$	$U_* = 3.722 \cdot t_*^{-0.367}$	0.13 - 0.16
	anguille eur. (2016)	$7.2 < L < 49.8 \text{ cm}$	$U_* = 4.641 \cdot t_*^{-0.403}$	0.12 - 0.14
Wolter & Arlinghaus	autres (2003)	$L < 20 \text{ cm}$	$U = 0.0654 \cdot L^{0.42}$	0.45 - 0.54

TABLE 3.5 – Synthèse des résultats expérimentaux de vitesse critique obtenus pour les anguilles européennes.

Les constations sont à nouveaux identiques. Les résultats les plus plausibles sont ceux obtenus pour l'espèce de poisson étudiée : l'anguille européenne. Les formules empiriques situent le seuil de fatigue à une vitesse avoisinant $0.15 [m/s]$. Cette valeur reste assez faible compte tenu de l'efficacité de la nage anguilliforme et du temps d'endurance présumé de trente minutes.

Il est à noter que les modèles empiriques de Katopodis and Gervais (2016) et de Wolter and Arlinghaus (2003) proviennent d'une compilation de données établies par bon nombre de scientifiques. Certains résultats sont listés de manière non exhaustive au Tableau [3.6]. La variabilité des résultats avec certains modèles rend compte de l'importance de la température du milieu lorsqu'il est question de vitesse.

Etude	Taille [cm]	Temps [s]	T°C	Résultat [m/s]
Blaxter and Dickson (1959)	60	2	10	$U_{\max} = 1.14$
McCleave (1980)	7.2	18	11 - 13	$U_{\max} = 0.54$
Sprengel et al. (1991)	17 - 45	120 - 180	17	$U_{\text{crit}} = 0.45 - 0.90$
D'aout and Aerts (1999)	22	-	18 - 22	$U_{\text{crit}} = 0.32$

TABLE 3.6 – Résultats non exhaustifs de vitesses d'anguilles dans la littérature.

Chapitre 4

Modèles

Ce chapitre présente les critères généraux de dimensionnement d’une passe à poissons. De manière plus spécifique, il se consacrera aux critères de dimensionnement d’une passe à bassins et d’une rampe à anguilles.

Les éléments présentés ci-dessous sont extraits pour l’essentiel des ouvrages suivants :

- *Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement* (Larinier et al., 1994).
- *Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes* (Baudouin et al., 2014).

4.1 Critères de dimensionnement d’une passe à poissons

Avant de détailler les points d’attention qu’il faut prendre en compte pour le dimensionnement des dispositifs de franchissement, il nous a semblé utile d’aborder quelques notions biologiques liées à la migration des poissons dans le réseau hydrographique.

Les populations de poissons présentes dans les cours d’eau dépendent des caractéristiques de l’habitat aquatique puisque c’est autour de lui que gravitent toutes les fonctions biologiques du poisson : reproduction, nutrition, locomotion, etc. Cette dépendance est d’autant plus forte chez les poissons migrateurs. Ceux-ci ont besoin de milieux différents pour le déroulement de leur cycle biologique (voir section [3.4.1]). De plus, chaque poisson possède des capacités physiques de nage (et parfois de saut) différentes en fonction de son espèce, sa taille, son état physiologique ou encore de la température de l’eau. Les espèces montrent aussi des comportements différents face aux obstacles. Toutes ces exigences biologiques ont permis de définir des critères de conception qui sont au centre du dimensionnement d’une passe à poissons.

Au cours des derniers siècles, la migration des espèces a baissé, surtout chez les espèces amphibiotiques (qui peuvent vivre en eau douce et en eau salée). La cause principale de cette régression des migrateurs, voire de disparition dans les cas les plus extrêmes, est due à la construction d’obstacles empêchant la libre circulation (voir section [3.2.3]).

Les besoins de circulation varient d'une espèce à l'autre. De manière générale, la restauration et/ou le maintien d'un stock de migrateurs n'est possible que s'il lui est possible d'atteindre les milieux adéquats à son cycle biologique. Selon [Larinier et al. \(1994\)](#), différents cas de figure peuvent être distingués. Ceux-ci dépendent de la façon dont l'obstacle est positionné par rapport au milieu requis par le migrateur pour le bon déroulement de son cycle de vie :

- Pour les tronçons de cours d'eau **situés à l'aval des zones de reproduction** (cas du saumon ou de la truite de mer), il est nécessaire de maintenir une libre circulation permanente et totale dès lors que des migrateurs se retrouvent au pied des obstacles. Dans cette optique, les ouvrages doivent être aménagés et les retards à la migration évités au maximum.
- Lorsque les obstacles sont situés **au sein des zones de croissance ou de reproduction**, l'aménagement des obstacles situés les plus à l'aval débouche sur un gain de production immédiat. De plus, il est important, pour certaines espèces dont les périodes de migrations sont brèves, que les délais de franchissement des ouvrages soient minimisés.
- Dans le cas des espèces holobiotiques **à besoins migratoires limités**, le nombre de migrateurs à faire passer n'est pas aussi important que pour les cas précédents. Néanmoins, il est tout de même nécessaire de maintenir une communication entre les biefs. Une attention particulière doit tout de même être portée aux conditions hydrauliques au sein de l'ouvrage. Si ce dernier n'est destiné qu'à un groupe d'espèces aux exigences restreintes, une attractivité moindre de la passe à poissons peut être envisageable.

La libre circulation des espèces dans le réseau hydrologique est donc une exigence permanente en raison des différentes périodes migratoires qui se chevauchent d'une espèce à l'autre. Il s'agira donc de s'assurer que les obstacles restent franchissables à toute période de l'année. Des obstacles non-équipés ou mal équipés entraîneront des blessures ou des mortalités chez les migrateurs. Ceux-ci s'occasionneront des lésions en tentant de gravir les ouvrages de franchissement.

En plus de devoir non seulement doter les obstacles de passes convenables mais également d'assurer une libre circulation permanente, les dispositifs doivent également être entretenus afin de rester efficaces en permanence. En effet, des travaux visant soit à modifier la section du lit de la rivière, soit à modifier son écoulement, peuvent remettre en cause toute l'efficacité d'une passe à poissons. [Larinier et al. \(1994\)](#) insistent sur le fait que :

«Le défaut d'un seul dispositif de franchissement sur l'axe migratoire suffit à ruiner la totalité des efforts consentis pour maintenir ou développer les stocks. Il devra donc falloir considérer qu'un cours d'eau aménagé afin d'y rétablir la libre circulation doit être sous surveillance permanente. Il n'est plus assimilable à un système naturel et doit impérativement être géré.»

Cependant, bien que les passes à poissons favorisent la libre circulation des migrateurs et soient un outil efficace à l'augmentation des stocks, elles ne compensent jamais complètement les dommages causés aux migrateurs. En effet, venir multiplier de façon excessive des barrages sur les rivières et les équiper d'ouvrages de franchissement ne peut avoir que des effets indésirables pour la faune :

- Ennoiment de zones de frayères, destruction de l’habitat, modification de la qualité physico-chimique de l’eau, modification du régime hydraulique, etc.
- Une passe à poissons induit dans tous les cas un retard à la migration. La multiplication de ce genre d’ouvrages aurait un effet inopportun sur le maintien d’une ou plusieurs populations de migrateurs.

4.1.1 Critères généraux

Les dispositifs de franchissement doivent être évalués sur trois points : leur intérêt biologique, leur intérêt économique et leur coût. Il n’existe toutefois pas une passe plus efficace qu’une autre. Un certain type d’ouvrage de franchissement peut s’avérer efficace dans une situation et inefficace dans une autre (voir section [1.2.2]). En effet, comme renseigné plus haut, beaucoup de facteurs entrent en jeu lors de la conception d’un ouvrage de franchissement. Ces facteurs sont d’ordre biologique, hydrologique, hydraulique ou encore topographique. Chaque situation est unique et nécessite d’être évaluée au cas par cas. Les paramètres à prendre en compte pour le dimensionnement d’ouvrages de franchissement sont liés aux facteurs biologiques des espèces ciblées et à leur implantation dans l’environnement.

Les facteurs biologiques

Au niveau des facteurs biologiques à prendre en compte dans la conception des ouvrages de franchissement il y a :

- a. Les **performances de nage** des poissons et les vitesses dans les dispositifs de franchissement (voir section [3.3]). Ceci comprend les différents niveaux d’activité de nage, les vitesses de nage et d’endurance, les distances maximales franchissables dans un écoulement de vitesse donnée et des capacités de saut.
- b. L’**éclairage** des ouvrages de franchissement. De manière générale, il est préférable d’éviter un brusque changement de luminosité entre l’environnement extérieur et l’intérieur de la passe.
- c. La notion d’**obstacle à la migration**. La franchissabilité d’un obstacle ne dépend pas uniquement de la hauteur de chute de l’ouvrage. Au contraire, les conditions hydrodynamiques (vitesses, tirants d’eau, turbulence) qui dépendent de la géométrie de l’ouvrage, des débits qui y transitent, des capacités de nage et de saut des espèces ciblées, vont définir la franchissabilité de celle-ci.

Plusieurs configurations d’obstacles pour une même hauteur de chute ont été décrites par [Larinier et al. \(1994\)](#) (Figure [4.1]). Dans la mesure où le migrateur a les capacités requises, plusieurs cas de figure existent :

- L’obstacle est franchissable (Figure [4.1-a]).
- L’obstacle est infranchissable car le tirant d’eau est insuffisant. Le poisson ne peut pas y nager car la profondeur de la lame d’eau y est trop faible. Ce cas de figure peut par exemple se produire en période d’étiage (Figure [4.1-b]).
- L’obstacle est infranchissable tant pour les mauvais que les bons nageurs car il est muni d’un radier en pied d’obstacle et ne dispose pas d’une fosse d’appel. Le migrateur n’arrive donc pas à prendre appel en pied d’obstacle (Figure [4.1-c]).
- L’obstacle est infranchissable car le poisson est bloqué au niveau de la rupture de pente à cause de la réhausse (Figure [4.1-d]).

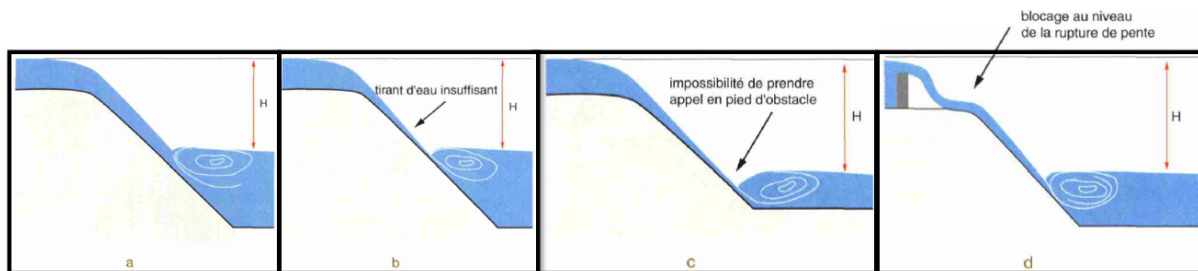


FIGURE 4.1 – Schéma illustrant l'influence de la configuration d'un obstacle sur sa franchissabilité (Larinier et al., 1994).

L'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) a défini des classes de franchissabilité via sa démarche ICE (Informations sur la Continuité Ecologique). Ces dernières se basent sur un protocole qui permet de déterminer l'impact potentiel d'un obstacle sur la libre circulation des espèces. Il repose donc sur la relation qui existe entre la géométrie de l'ouvrage et les capacités de nage et de saut des espèces considérées. Les cinq classes de franchissabilité proposées par l'ONEMA (Baudouin et al., 2014) et classées de la plus critique à la meilleure sont :

- **Barrière totale** - Classe ICE = 0 :
La barrière est infranchissable pour les espèces-cibles/stades du groupe considéré et constitue un obstacle total à leur migration. Il est toutefois possible que dans des conditions exceptionnelles, l'obstacle se révèle momentanément franchissable pour une fraction de la population.
- **Barrière partielle à impact majeur** - Classe ICE = 0.33 :
La barrière représente un obstacle majeur à la migration des espèces-cibles/stades du groupe considéré. L'obstacle est infranchissable une grande partie du temps et/ou pour une partie très significative de la population. Le franchissement de l'obstacle à la montaison n'est possible que durant une partie limitée de la période de migration et pour une fraction limitée de la population du groupe considéré. L'obstacle provoque des retards de migration préjudiciables au bon déroulement du cycle biologique des espèces.
- **Barrière partielle à impact significatif** - Classe ICE = 0.66 :
La barrière représente un obstacle significatif à la migration des espèces-cibles/stades du groupe considéré. Le franchissement de l'obstacle à la montaison est possible une grande partie du temps et pour la majeure partie de la population. L'obstacle est néanmoins susceptible de provoquer des retards de migration non négligeables. Il reste toutefois infranchissable pendant une partie de la période de migration pour une fraction significative de la population du groupe considéré.
- **Barrière franchissable à impact limité** - Classe ICE = 1 :
La barrière ne représente pas un obstacle significatif à la migration des espèces-cibles/stades du groupe considéré. La plus grande partie de la population est capable de la franchir dans un laps de temps court et sans dommage. Cela ne signifie pas pour autant que la barrière n'occasionne aucun retard de migration ou que tous les individus du groupe considéré la franchissent sans dommage.
- **Barrière à impact indéterminé** - Classe ICE = NC :
La franchissabilité de l'obstacle n'est pas appréciable avec les seules données

ICE. L'évaluation de l'impact nécessite des investigations complémentaires ou une analyse plus poussée.

Les chiffres doivent être interprétés comme un degré d'intervention sur un obstacle. Les indicateurs proches de zéro indiquent qu'il est nécessaire d'intervenir pour assurer une libre circulation des migrateurs ciblés. Les classes de franchissabilité ne seront pas analysées pour chaque obstacle, que cela soit en fonction de sa typologie ou de chaque groupe d'espèce ciblé. Cela s'éloigne du cadre de ce mémoire. Néanmoins, les passes à bassins à échancrures verticales et les passes à anguilles sont détaillées dans ce document (voir section [1.2.2]).

L'implantation des passes à poissons

Plusieurs critères sont à surveiller quant à l'implantation, au sens large du terme, d'une passe à poissons :

1. Son **attractivité**. Afin qu'un ouvrage de franchissement soit efficace, il faut que les migrateurs en trouvent l'entrée. La façon d'attirer les poissons vers l'entrée de la passe se réalise au moyen du champ de vitesse au pied de l'ouvrage. Cependant, la notion d'attractivité varie en fonction de l'espèce ciblée. Pour certaines espèces amphibiotiques, le but sera plutôt d'attirer tous les poissons parvenant au pied de l'ouvrage tout en minimisant les retards à la migration. Pour d'autres espèces comme les holobiotiques, et en particulier les cyprinidés, moins d'importance sera accordée à l'attractivité. L'accent sera plutôt mis sur le fait que les conditions à l'intérieur de la passe soient favorables au poisson.
2. Son **implantation** à proprement parler en fonction du type et de la configuration de l'obstacle à franchir. Selon la nature de l'obstacle, les configurations sont plus ou moins différentes. Généralement, il est plus judicieux de placer l'entrée d'une passe au point de la ligne de plus haute remontée du migrateur, ou du moins le plus proche possible de cette zone. En fonction de la configuration de l'obstacle, la position de l'entrée de la passe varie :

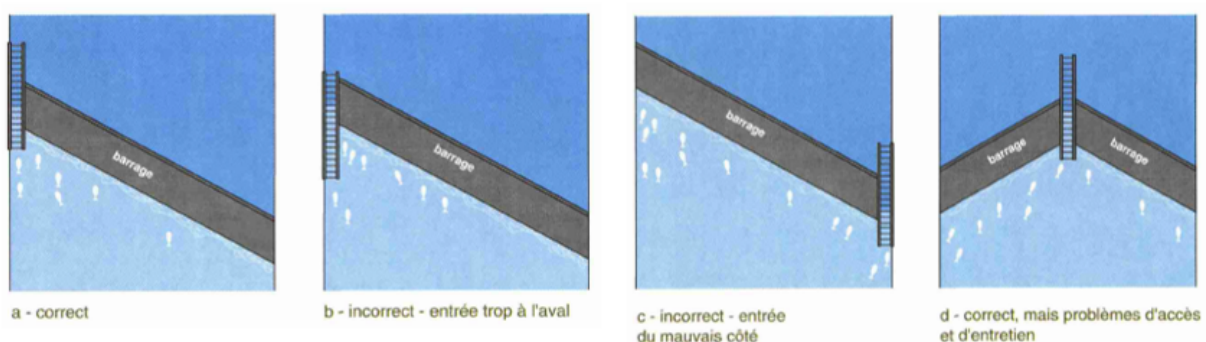


FIGURE 4.2 – Schéma illustrant l'implantation d'une passe dans le cas d'un obstacle oblique à la rivière (Larinier et al., 1994).

— L'obstacle est incliné par rapport à la rivière

Dans ce genre de configuration, l'entrée de la passe doit se trouver le plus à l'amont de l'ouvrage possible et le plus à l'amont du pied du barrage (Figure [4.2-a]). Des situations inefficaces consisteraient à avoir un cas où l'entrée serait située à l'aval de l'obstacle [4.2-b] ou trop à l'aval du pied de l'obstacle [4.2-c]. Une dernière situation

serait d'avoir un barrage dit *en chevron* (Figure [4.2-d]). Dans cette configuration, il est également nécessaire de placer l'entrée de la passe le plus à l'amont de l'obstacle et de son pied. C'est-à-dire au centre de l'ouvrage, bien que cela puisse poser des problèmes liés à l'accessibilité ou encore à l'entretien.

— **L'obstacle est perpendiculaire par rapport à la rivière**

Dans ce cas de figure, l'entrée de la passe devra se situer sur l'extrémité gauche ou droite de l'ouvrage en fonction des contraintes propres au site, des écoulements d'eau préférentiels et surtout du profil du lit de la rivière à l'aval de l'obstacle. Il est préférable d'installer l'entrée de la passe au niveau de fosses de stabulation et d'un chenal d'écoulement préférentiel (Figure [4.3-a]). Lorsque l'obstacle atteint des largeurs importantes, il est nécessaire d'équiper celui-ci de dispositifs de franchissement à ses deux extrémités (Figure [4.3-b]). Il est aussi envisageable de faciliter l'accès des migrateurs vers l'entrée de la passe en installant un tapis d'enrochement au centre de la rivière à une cote plus haute directement à l'aval de l'obstacle. Les chenaux d'accès vers les entrées des passes sont installés plus profondément pour diriger les poissons vers celles-ci (Figure [4.3-c]). Une autre possibilité est de contourner l'obstacle lorsque le site l'oblige (Figure [4.3-d]). Dans ce type de cas, il est nécessaire qu'une fraction importante du débit du cours d'eau soit amenée dans la passe en période de migration pour pallier la situation défavorable de l'entrée.

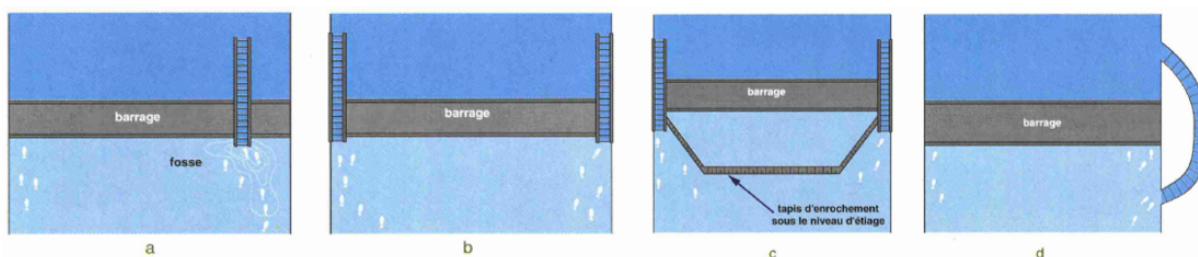


FIGURE 4.3 – Schémas illustrant l'implantation d'une passe dans le cas d'un obstacle perpendiculaire à l'axe de l'écoulement (Larinier et al., 1994).

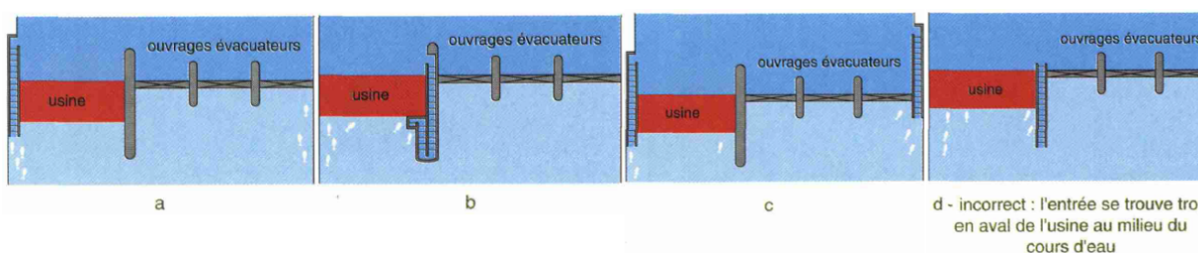


FIGURE 4.4 – Schémas illustrant l'implantation d'une passe au niveau d'un aménagement hydroélectrique (Larinier et al., 1994).

— **L'obstacle est un aménagement hydroélectrique**

Un aménagement hydroélectrique au travers de la rivière va attirer les poissons vers les aspirateurs lorsque tout le débit est turbiné. Il est donc nécessaire de placer une entrée proche de l'usine, de préférence en rive (Figures [4.4-a] et [4.4-b]). Dans le cas où le barrage déverse, il est utile de prévoir une entrée aussi du côté barrage en rive (Figure [4.4-c]). Comme dans les cas précédents, il est peu efficace d'installer

l'entrée de la passe trop à l'aval du pied de l'obstacle (Figure [4.4-d]). Pour des centrales hydroélectriques plus importantes équipées de plusieurs turbines, il peut être envisagé d'installer une galerie collectrice afin de récupérer les poissons sur toute la largeur de l'usine. Cette galerie perforée d'entrées et équipée de vannes sera placée au-dessus des aspirateurs des turbines (Figure [4.5]).

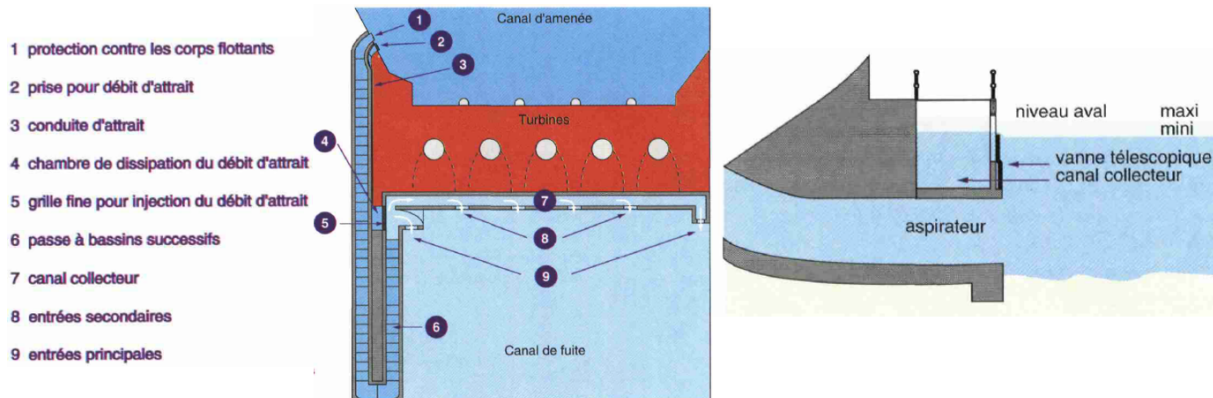


FIGURE 4.5 – Schéma de principe d'une galerie collectrice comportant plusieurs entrées au-dessus des aspirateurs des turbines (Larinier et al., 1994).

3. Des **conditions hydrodynamiques, de vitesses et de débits** à l'entrée de l'ouvrage. Pour que le poisson trouve l'entrée de la passe, l'écoulement qui en sort doit être décelé par le poisson aussi loin que possible de celle-ci. Le jet d'eau sortant de la passe doit être bien individualisé dans le bief aval. Les vitesses à l'entrée de la passe doivent être élevées mais ne pas dépasser certains seuils afin que la passe reste franchissable par tous les migrateurs ciblés. Cependant, si l'ouvrage est contraint à conserver des vitesses élevées, il faut éviter les ressauts hydrauliques. Une attention toute particulière doit donc être apportée au dimensionnement de l'entrée d'une passe afin qu'elle reste attractive en toute circonstance pendant les périodes de migration. Larinier et al. (1994) recommandent le fait que les débits dans la passe soient à l'échelle des débits du cours d'eau en période de migration. Plus le pourcentage du débit dans la passe sera important, plus la passe sera attractive.

Les conditions hydrodynamiques à l'entrée de l'ouvrage

L'attractivité de l'ouvrage sera liée à la situation et à l'orientation du jet issu de la passe ainsi qu'à sa quantité de mouvement, c'est-à-dire à la fois à son débit et à sa vitesse (Larinier et al., 1994). Dans le cas d'une centrale hydroélectrique ou d'un évacuateur de crues, il faut éviter que le jet sortant de la passe à poissons soit orienté perpendiculairement à l'écoulement général de la rivière. En effet, dans ce cas de figure, le jet serait cisaillé par l'écoulement en sortie des turbines ou de l'évacuateur de crues et ne pourrait pas se développer loin à l'aval. La solution dans ce cas de figure est d'orienter le jet parallèlement à l'axe de l'écoulement.

Les conditions de vitesses à l'entrée de l'ouvrage

Il est indispensable de créer au niveau de l'entrée d'une passe des vitesses élevées qui doivent néanmoins rester compatibles avec le passage de toutes les espèces migratrices concernées (Larinier et al., 1994). Il faut veiller à ce que les vitesses restent élevées durant

toutes les périodes de l'année. Il convient donc de connaître les niveaux d'eau amont et aval de l'obstacle.

Les conditions de débits

Le débit dans le dispositif de franchissement doit être à l'échelle des débits du cours d'eau en période de migration (Larinier et al., 1994). Il est difficile de donner des critères bien définis. De façon générale, les débits qui transitent dans le ou les dispositif(s) de franchissement doivent être de l'ordre de 1 à 5% des débits rentrant en compétition (Larinier et al., 1994). Une augmentation du débit d'attraction implique de manière générale une amélioration de l'efficacité de la passe.

4.1.2 Critères d'attention d'une passe à bassins

Principe des passes à bassins successifs

Le principe de fonctionnement des passes à bassins successifs a déjà été présenté précédemment (voir section [1.2.2]). Les paramètres intervenant dans le dimensionnement de ce type de dispositif sont multiples : dénivellations entre bassins, taille des bassins, dimensions des orifices/fentes ainsi que les cotes des niveaux amont et aval. Ces paramètres vont définir le comportement hydraulique de la passe : débit, zones de recirculation, chute entre bassins, etc.

Dénivellation entre bassins et nature des écoulements

La vitesse V [m/s] du jet entre deux bassins, créé par une chute de hauteur DH [m], peut être calculée de façon simplifiée de la manière suivante :

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot DH}$$

où $g = 9,81$ [m/s^2] représente l'accélération de la pesanteur.

Plus la hauteur de chute DH sera faible, plus la vitesse du jet sera réduite. Cela facilitera par conséquent la remontée du migrateur. En revanche, cette chute ne peut pas être trop petite non plus car cela nécessiterait la construction d'un nombre trop important de bassins. La chute DH entre chaque bassin doit être choisie principalement en fonction de la capacité de nage (ou de saut) des espèces ciblées afin de franchir le seuil de chaque ouverture.

Dans la catégorie des passes à bassins, deux types de jets sont distingués :

- Le **jet plongeant** (Figure [4.6]) : Dans ce cas de figure, le niveau d'eau dans le bassin aval est inférieur à la hauteur de la crête déversante : $(DH - H1) > 0$. Ici, le jet plonge dans le fond du bassin et y dissipe son énergie par mélange turbulent et formation d'un ressaut hydraulique en pied de chute.
Le poisson va devoir utiliser ses capacités de saut pour franchir le seuil. Dès lors, ce genre d'écoulement devra plutôt être réservé aux salmonidés en raison de leur capacité de saut.
- Le **jet de surface** (Figure [4.7]) : Dans ce cas de figure, le jet ne plonge pas mais reste en surface. Ceci est rendu possible lorsque le tirant d'eau aval au-dessus de la crête est supérieur de 0.5 à 0.6 fois à la charge d'eau dans le bassin amont. L'énergie est dissipée dans le bassin aval par la création de zones de recirculation.

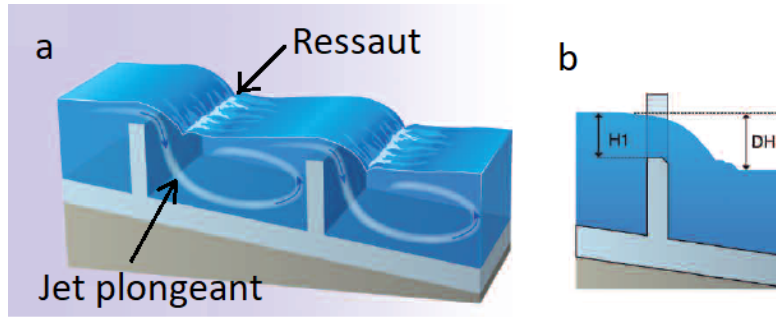


FIGURE 4.6 – Schémas du mode d'un écoulement à jet plongeant au niveau des cloisons d'une passe. (a) vue 3D d'un écoulement à jet plongeant, (b) vue en coupe d'un écoulement à jet plongeant (Baudouin et al., 2014).

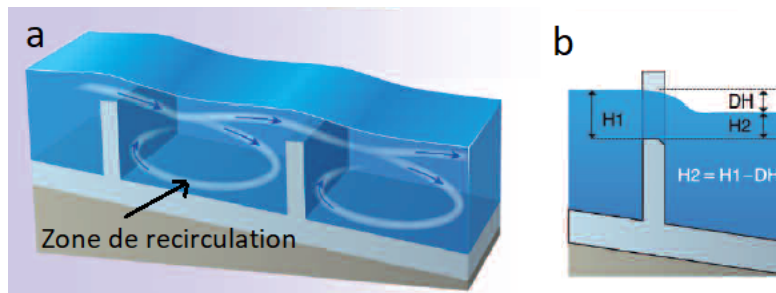


FIGURE 4.7 – Schémas du mode d'un écoulement à jet de surface au niveau des cloisons d'une passe. (a) vue 3D d'un écoulement à jet de surface, (b) vue en coupe d'un écoulement à jet de surface (Baudouin et al., 2014).

Dimension des bassins

La dimension des bassins, tant en termes de longueur que de profondeur, doit être notamment fonction de la taille des poissons ciblés. Pour la longueur minimale des bassins, celle-ci doit être comprise entre 2.5 et 3 fois la longueur du plus grand poisson susceptible d'emprunter la passe. Quant à la profondeur, cette dernière doit impérativement être de l'ordre de 1.0 [m] pour les grands salmonidés et de l'ordre de 0.75 [m] pour les truites.

En pratique, ce sont plutôt les conditions hydrodynamiques (débit, chute entre chaque bassin, configuration des jets) qui vont définir les dimensions des bassins. En effet, plus la turbulence et l'aération est importante dans les bassins, plus les migrateurs auront des difficultés à la franchir. Le niveau d'agitation peut être caractérisé par la puissance volumique dissipée P_v [W/m^3] qui se calcule comme suit :

$$P_v = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot DH}{V}$$

avec

- $\rho = 1000$ [kg/m^3], la masse volumique de l'eau ;
- $g = 9,81$ [m/s^2], l'accélération de la pesanteur ;
- Q [m^3/s], le débit dans la passe ;
- DH [m], la chute entre deux bassins ;
- V [m^3], le volume d'eau dans le bassin considéré.

Pour les passes à salmonidés, la limite supérieure doit être considérée à $P_v = 200 [W/m^3]$. Pour des passes plus petites, cette valeur a intérêt à être diminuée à $P_v = 150 [W/m^3]$.

Dimensions minimales des échancrures

En fonction du fait que l'écoulement soit à jet de surface ou à jet plongeant la configuration change.

- **Jet de surface** : la largeur minimale des fentes doit être de 0.3 à 0.4 [m] pour les grands salmonidés, de 0.4 à 0.5 [m] pour les aloses, de 0.35 [m] pour les cyprinidés et de 0.15 [m] pour les très petites espèces.
- **Jet plongeant** : dans ce cas de figure, il faut penser à augmenter la largeur des échancrures, surtout si le poisson doit sauter pour accéder au bassin suivant.

Dans tous les cas, pour éviter des problèmes de colmatage, il est nécessaire, même pour les plus petites espèces, d'avoir des largeurs de l'ordre de 15 – 20 [cm].

Valeurs proposée par l'ONEMA

L'ONEMA (Baudouin et al., 2014) propose les dimensions suivantes concernant les deux espèces étudiées dans ce mémoire (Tableau [4.1]). Elles sont données pour des individus adultes et sont comparées à la passe de Rivière.

Groupe	Espèce	Chute max.	Chute préconisée	Largeur minimale échancrure	Profondeur minimale de bassin	Longueur minimale de bassin
1	Saumon Atl.	0.35 [m]	0.30 [m]	0.30 [m]	1.0 [m]	2.5 [m]
11a	Anguille Europ.	0.25 [m]	0.20 [m]	0.15 [m]	0.50 [m]	1.25 [m]
Passe de Rivière		0.30 [m]	0.30 [m]	0.30 [m]	1.0 [m]	5.0 [m]

TABLE 4.1 – Valeurs guides des passes à bassins dites à *jets de surface* (Baudouin et al., 2014).

4.1.3 Critères d'attention d'une passe à anguilles

Le principe des passes à anguilles a été présenté précédemment (voir section [1.2.2]). Deux grandes catégories de passes à anguilles existent : les passes fermées et les passes à ciel ouvert (Armstrong et al., 2004).

Les passes fermées sont généralement de longues conduites dotées de rugosités qui se divisent en plusieurs paliers suivant la taille de l'obstacle à gravir. Elles ont l'avantage d'être économiques et de protéger les poissons d'éventuels prédateurs. En revanche, elles sont plus susceptibles de s'obstruer et sont très sensibles aux crues. Les dimensions générales recommandées pour ce genre de conduites sont indiquées au Tableau [4.2].

Diamètre de la conduite	Différence de charge par palier	Longueur par palier	Pente optimale	Vitesse
10 – 25 [cm]	2 – 3 [m]	4 – 5 [m]	15 – 30° Jusqu'à 90°	≤ 0.2 [m/s]

TABLE 4.2 – Valeurs de dimensionnement optimales pour une passe à anguille fermée (Armstrong et al., 2004).

Les passes ouvertes sont majoritairement présentes en Belgique, elles peuvent s'associer à des rampes dont le fond est recouvert d'un substrat. Ce type de dispositif est souhaitable pour différentes raisons. Il est économique, standardisable et facilement démontable. De plus, il nécessite un faible débit et peut être emprunté par des poissons de petite taille autres que l'anguille. En revanche, il demande un entretien régulier. Les principales dimensions requises pour ce type d'ouvrage sont rassemblées au Tableau [4.3].

Largeur	Différence de charge par palier	Longueur par palier	Pente optimale	Vitesse
0.2 – 1.0 [m]	2 – 3 [m]	variable	$\leq 30\%$ (5 – 45%)	≤ 0.2 [m/s]

TABLE 4.3 – Valeurs de dimensionnement optimales pour une passe à anguille à ciel ouvert (Armstrong et al., 2004).

Les rampes spécifiques aux civelles et anguillettes sont composées de deux parties (Figure [1.12]) : la rampe de montée et la partie amont. La rampe de montée possède un revêtement rugueux qui varie d'une passe à l'autre en fonction de la gamme de taille d'individu visée.

La rampe de montée

Elle est immergée dans le plan d'eau aval. La rampe est équipée d'un substrat qui peut être composé d'un matériau soit naturel (pierre ou végétation) soit artificiel (brosse, plot, matière synthétique). Il permet de faciliter la remontée des anguilles. Afin d'assurer son efficacité, le substrat est humidifié en permanence, soit par un arrosage à l'aide d'une pompe, soit gravitairement depuis le bief amont. Les principaux substrats utilisés dans ce genre de passe sont ceux de type brosse et de type plot. D'autres genres de fonds, composés de matières synthétiques, existent mais ils sont moins utilisés en Belgique. Des exemples de substrats sont listés ci-dessous :

- **Type plot** : Il s'agit d'une dalle en béton ou en polyuréthane formé d'un alignement de plots dont la géométrie varie (Figure [4.8]). Ce genre de substrat convient mieux aux stades biologiques plus avancés comme l'anguillette et l'anguille en raison de leurs caractéristiques techniques (dimensions et densité).

Les substrats de type plot comptent d'autres modèles qui varient en fonction des pays. En Amérique du Nord, l'entreprise Milieu Inc. a réalisé un substrat composé de tubes creux synthétiques nommé *Eel ladder* pour les individus compris entre 15 et 75 [cm] (Figure [4.9-a]). Une version adaptée aux espèces plus petites a également été développée (Figure [4.9-b]).



FIGURE 4.8 – Exemple d'un substrat de type plot utilisé pour la passe de Monsin (Belgique).

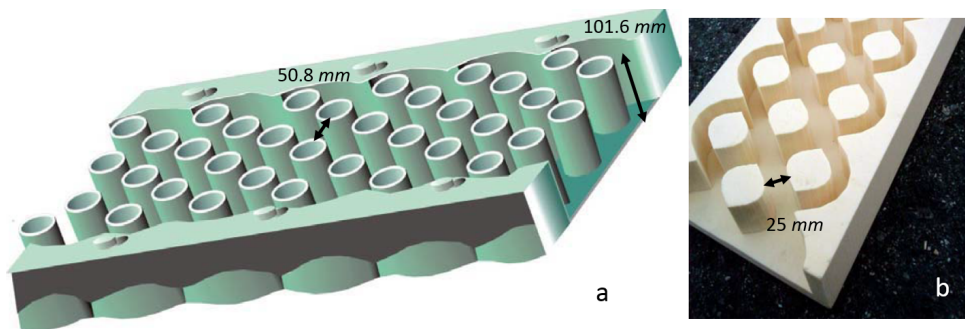


FIGURE 4.9 – Substrats synthétiques développés par Milieu Inc. (a) Modèle pour les anguilles de 15 à 75 centimètres, (b) Modèle pour les anguilles inférieures à 15 centimètres (Solomon and Beach, 2004).

La compagnie française Fish-Pass a inauguré son propre substrat en acrylonitrile butadiène styrène (Figure [4.10]). Celui-ci est composé de petits dômes d'une hauteur de 30 [mm] et espacés de 14 [mm]. Il ne convient que pour les lames d'eau de 2 à 12 [mm] et des pentes longitudinales ne surpassant pas 35°.



FIGURE 4.10 – Substrat développé par l'entreprise Fish-Pass (Solomon and Beach, 2004).

D'autres alternatives sont encore disponibles sur le marché mondial. C'est le cas du revêtement plastique *Akwadrain* (Figure [4.11-a]) surtout utilisé en Amérique du Nord et du dispositif *Pelcar* en béton (Figure [4.11-b]) aussi développé par Fish-Pass. Ce dernier est percé de trous qui permettent à la végétation de le traverser.

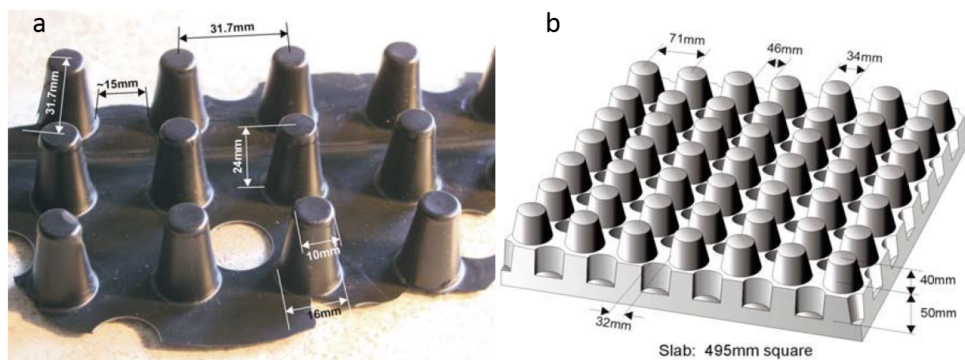


FIGURE 4.11 – Substrats de type plot en plastique et béton. (a) Akwadrain (b) Pelcar (Solomon and Beach, 2004).

- **Type picot** : Ce substrat repose sur le même principe que celui de type plot mais présente des différences géométriques. En effet, il possède des protubérances de taille et d'espacement différents dont la forme ressemble plus à un picot. Il convient mieux aux petites anguilles (≤ 15 [cm]) en raison de l'espacement des picots. Une exemple de ce type de substrat est illustré à la Figure [4.12-a].



FIGURE 4.12 – Substrats de type picot et brosse. (a) Type picot (Pauty, nd) (b) Type brosse (Solomon and Beach, 2004).

- **Types brosse** : Il s'agit d'un assemblage de filaments en matière synthétique (généralement du polyester) de diamètre 1 [mm] et de hauteur allant de 40 à 70 [mm]. Ils sont montés en touffes de 25 brins fixés sur un support en PVC (Figure [4.12-b]). Leur espacement varie entre 7 et 21 [mm] en fonction de la taille des individus ciblés. Ce type de substrat est adapté aux civelles et est très employé en France. L'étude de la pente longitudinale à adopter pour ce type de rugosité n'a pas encore donné de résultats concluants (Legault, 1992). Cependant, la pente à adopter devrait se situer en deçà de 35° (Legault, 1993).
- **Géotextiles** : Certains géotextiles peuvent servir de revêtement rugueux. Cela s'est développé au Danemark avec les appellations *Enkamat* (Figure [4.13]). Il a été recommandé par Dahl (1991) mais est déconseillé par Voegtli and Larinier (2000). En effet, ce type de revêtement est abrasif et peut endommager le mucus qui recouvre l'anguille. De plus, celui-ci ne convient que pour des espèces ne dépassant pas 260 [mm].
- **Matières synthétiques** : Différents matériaux initialement destinés à d'autres fins ont été utilisés par le passé. C'est le cas de sacs cousus main (Tesh, 1977), de filets de chalutier (Shotzberger and Strait, 2002) ou de filets de jardin en nylon (Knights

and White, 1998). D'autres matières synthétiques comme de la fausse végétation ou du faux gazon ont également été testés (Eckersley, 1982).



FIGURE 4.13 – Substrat de type géotextile, Enkamat (Geo-Synthetic, nd).

- **Matières naturelles** : Ce type de substrat est calqué sur le principe des passes à enrochements présentées à la section [1.2.2]. Il utilise des matières naturelles comme les gravats ou la végétation afin de faciliter la remontée des anguilles.

Le choix de la pente longitudinale des rampes est le résultat d'un compromis. Il s'agit de limiter les vitesses d'eau dans la passe afin de les rendre tolérables pour les anguilles tout en réduisant au maximum la longueur de l'ouvrage. Cette conciliation intervient fréquemment pour les obstacles qui présentent de grandes chutes. La pente longitudinale varie généralement entre 10% (5.7°) et 100% (45.0°). Elle est fonction du type de substrat mis en place et de la taille des anguilles ciblées. Cependant, ce paramètre nécessite encore de l'attention et son optimisation est encore à l'ordre du jour.

Dans les passes où les rampes atteignent des longueurs importantes, des bassins intermédiaires sont ajoutés sur le parcours pour permettre aux migrateurs de s'y reposer pendant leur remontée.

La partie amont

Afin d'assurer l'accès des anguilles au plan d'eau amont, il est nécessaire qu'aucun élément ne bloque le passage des migrateurs entre la sortie de la rampe et le bief amont. Une discontinuité dans l'alimentation d'eau ou la présence de vitesses excessives dans cette zone de transition peuvent occasionner un défaut de fonctionnement de la passe.

Le principal problème provient des variations de niveau d'eau du bief amont. En cas de diminution de ce niveau sous un certain seuil, le dispositif de franchissement perdrait en efficacité à cause de son assèchement. A l'inverse, en cas d'augmentation du niveau du plan d'eau amont, la passe serait suralimentée. Cela empêcherait la remontée des anguilles à partir d'un certain seuil pour cause de vitesses trop importantes. Différents systèmes existent pour pallier ces problèmes :

- Soit la **rampe est installée avec un dévers latéral** (Figure [1.12]). De cette façon, elle conserve son efficacité en acceptant les variations du niveau d'eau à l'amont. Elle conserve aussi une zone à faible tirant d'eau latéralement tout en limitant la vitesse de l'écoulement. La pente des dévers varie entre 20% (11.3°) et 100% (45.0°)

en fonction notamment du type de substrat utilisé. Cela permet de faire varier la lame d'eau sur la largeur de la rampe. L'optimisation de ce paramètre est encore à l'étude puisqu'il dépend directement des autres caractéristiques de la rampe et des longueurs de spécimens ciblés.

- Soit la **rampe n'atteint pas directement le niveau d'eau du bief amont** mais plutôt un point situé plus bas (Figure [4.14-a]). Les anguilles sont retenues dans un bassin à l'amont de la rampe. Lorsque la différence de niveaux entre l'aval et l'amont reste modérée, il est possible d'installer un passage entre la zone de retenue et le plan amont (Figure [4.14-b]). Ce passage est équipé d'un lit de branchages bloqué sous une vanne dont le but est de diminuer localement les vitesses de l'écoulement.

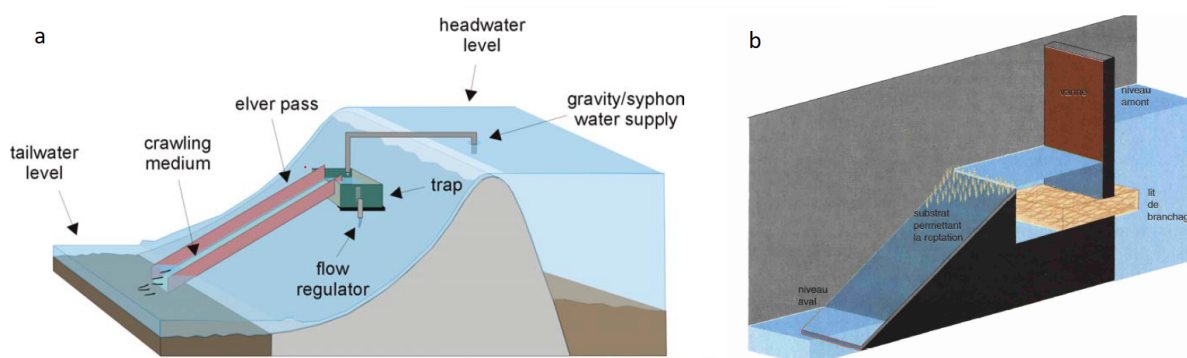


FIGURE 4.14 – (a) Schéma du principe de fonctionnement d'une passe à anguilles par piégeage, (b) Schéma du principe de fonctionnement d'un passage pour anguilles au moyen d'un lit de branchages sous une vanne (Solomon and Beach, 2004; Larinier et al., 1994).

- Soit la **rampe atteint une cote supérieure à celle du plan d'eau** (Figure [4.15]). Elle est alimentée par pompage et aspersion. Arrivés au sommet de la rampe, les migrateurs sont entraînés par gravité sur une rampe descendante vers un vivier de stockage (pour les dénombrer et/ou les transporter) ou bien directement vers le plan d'eau amont.

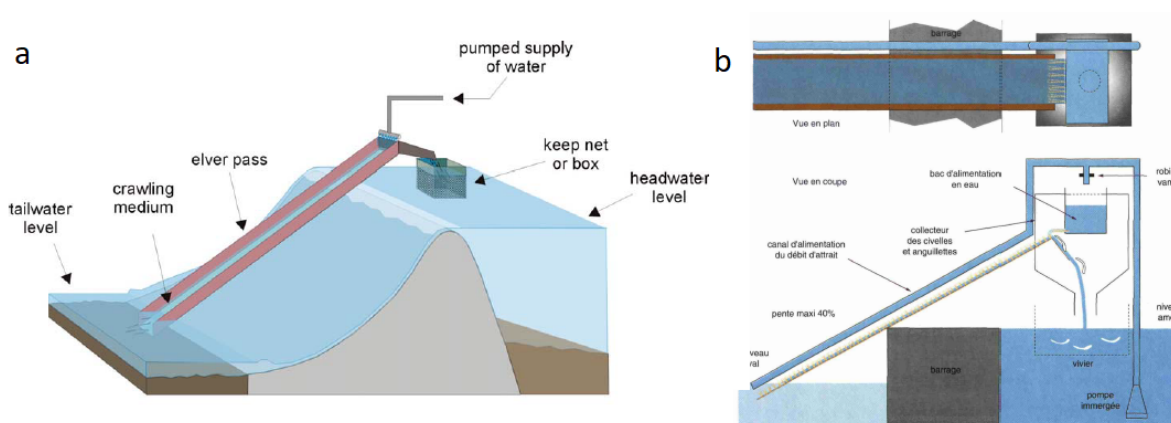


FIGURE 4.15 – (a) Schéma du principe de fonctionnement d'un type de passe à anguilles alimentée par pompage (vue 3D), (b) Schéma du principe de fonctionnement d'un type de passe à anguilles alimentée par pompage (vue en plan et vue en coupe) (Larinier et al., 1994; Solomon and Beach, 2004).

4.2 Modèles physiques

4.2.1 Description du modèle de la passe à fentes verticales de Rivière

Caractéristiques

Cette section va s'intéresser aux caractéristiques du modèle réduit de la passe à poissons du barrage de Rivière, construit dans le Laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie à Châtelet.

Le modèle réduit est à échelle 1 : 5. En effet, les dimensions du modèle sont adaptées aux capacités de pompage et à l'espace disponible dans le hall d'essais puisque ce dernier abrite d'autres modèles. Travailler avec un modèle présente l'avantage d'avoir une dimension réduite. Ceci facilite les manipulations et les observations contrairement aux situations réelles in-situ. La passe à poissons présente dans le laboratoire est une passe à bassins successifs à fentes verticales copiant la passe projetée à Rivière. Elle a été dimensionnée de façon à cibler prioritairement les salmonidés tout en gardant la possibilité d'être empruntée par d'autres espèces.

Le dénivelé de 2.05 [m] entre l'amont et l'aval du prototype est divisé en 7 paliers afin de former l'échelle à poissons. D'une part, le prototype doit satisfaire aux critères d'acceptabilité piscicole recommandés par la Direction des Etudes Techniques et définis en fonction des espèces cibles. D'autre part, les dimensions du modèle doivent respecter des contraintes géométriques strictes afin de garantir une mise à l'échelle correcte. Les grandeurs mesurées sur le modèle permettent de confirmer cela (Tableau [4.4]).

Critère	Prototype	Modèle
Débit total Q_t	$> 2.5 [m^3/s]$	$> 0.045 [m^3/s]$
Chute ΔH_e au droit du seuil à l'entrée	$\leq 0.2 \text{ .. } 0.25 [m]$	$\leq 0.04 \text{ .. } 0.05 [m]$
Débit dans la passe Q_p	$\sim 0.5 [m^3/s]$	$\sim 0.008 [m^3/s]$
Chute ΔH_b entre bassin	$\leq 0.3 [m]$	$\leq 0.06 [m]$
Puissance dissipée P	$< 130 [W/m^3]$	$< 58 [W/m^3]$
Vitesse de pointe maximale $U_{\max}$	$\leq 1 [m/s]$	$\leq 0.45 [m/s]$
Vitesse moyenne maximale U_{moy}	$\leq 0.25 \text{ .. } 0.3 [m/s]$	$\leq 0.13 [m/s]$

TABLE 4.4 – Valeurs cibles pour la conception de la passe à poissons de Rivière respectant les critères d'acceptabilité piscicole recommandés par la Direction des Etudes Techniques selon Zorzan et al. (2016).

Le schéma de la vue en plan du modèle réduit de la passe à poissons construite dans le hall d'essais (Figure [4.16]) montre la situation actuelle dans laquelle se trouve le modèle. Il est entre autres composé de 6 bassins (numérotés de P1 à P6), dont trois (numérotés de P1 à P3) sont de dimension standard, d'un bassin aval (numéroté P7) et d'un bassin amont (numéroté P0). Ces deux derniers représentent respectivement les biefs aval et amont de la Meuse. Finalement, un canal d'attrait, dont une partie se situe sous le modèle, vient compléter l'ensemble des éléments de la passe à poissons.

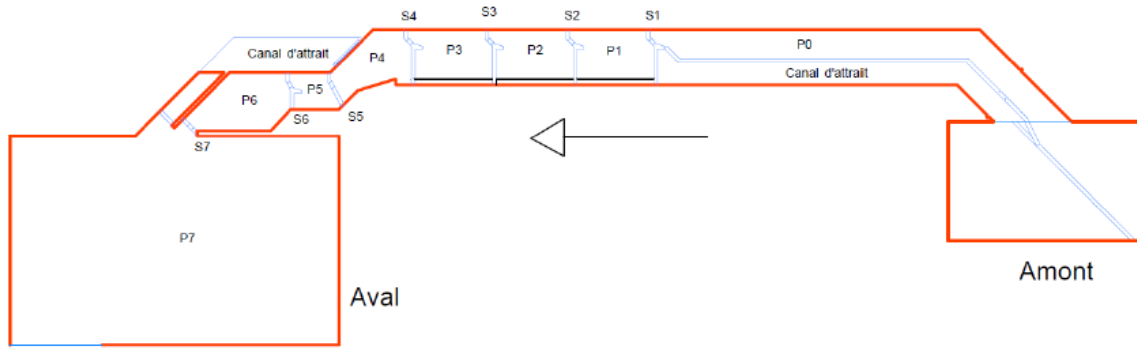


FIGURE 4.16 – Vue en plan de la géométrie du modèle réduit de la passe de Rivière.

Chaque bassin est séparé d'un seuil (numérotés de S1 à S7) que le poisson doit franchir pour accéder au suivant. La flèche noire indique le sens d'écoulement de l'eau. Le Tableau [4.5] reprend les dimensions du prototype et celles du modèle réduit. En annexe sont repris des plans détaillés du modèle réduit (voir Annexe [A.1]).

Critère	Prototype	Modèle réduit
Longueur totale	50 [m]	10 [m]
Longueur bassin	5.0 [m]	1.0 [m]
Largeur bassin	3.0 [m]	0.6 [m]
Hauteur d'eau	1.0 [m]	0.2 [m]
Chute entre bassins	0.3 [m]	0.06 [m]
Hauteur du seuil	0.1 [m]	0.02 [m]
Largeur échancrure	0.3 [m]	0.06 [m]

TABLE 4.5 – Dimensions principales de la passe à poissons de Rivière selon Zorzan et al. (2016).

De plus, le fond de la passe est équipé de plots. Ceux-ci ont été ajoutés par Bodarwé and Cabo (2018) lors de leurs expériences réalisées sur des poissons moins bon nageurs (Figure [4.17]).

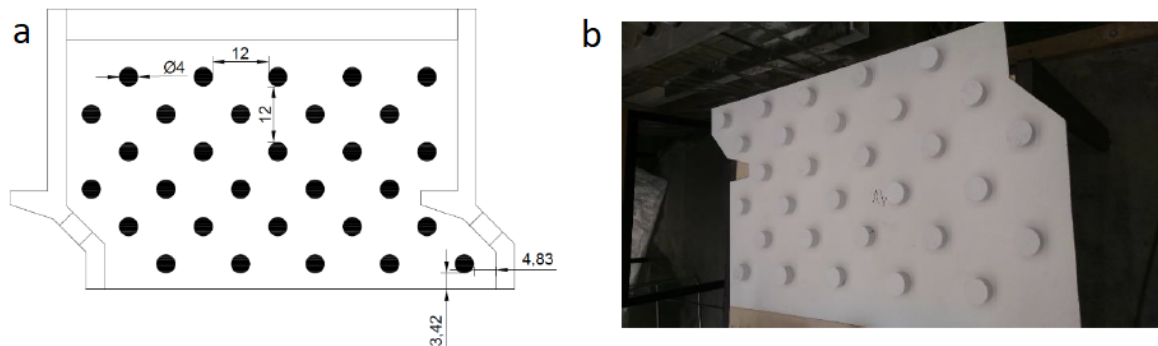


FIGURE 4.17 – (a) Répartition des plots pour le substrat du fond du modèle réduit de la passe de Rivière, (b) Photo de la répartition des plots pour le substrat dans le fond du modèle réduit de la passe de Rivière.

Selon les études réalisées par [Zorzan et al. \(2016\)](#) pour la Direction des Etudes Techniques, le débit préconisé dans la passe à poissons de Rivière doit être de $0.5 [m^3/s]$ (Tableau [4.4]). En utilisant la loi de similitude, le débit dans la passe est de $8 [L/s]$. Cette valeur correspond à celle préconisée par [Larinier et al. \(1994\)](#) pour le dimensionnement des passes à échantures verticales (Figure [4.18]). En effet, le débit prescrit par Larinier pour les dimensions du modèle réduit est calculé de la façon suivante :

$$Q = C_d \cdot b \cdot H_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot DH} = 0.00846 \sim 0.008 [m^3/s] = 8 [L/s]$$

avec

- $C_d = 0.65 [-]$, le coefficient de débit ;
- $b = 0.06 [m]$, la largeur de la fente ;
- $H_1 = 0.2 [m]$, la charge sur la fente ;
- $g = 9.81 [m/s^2]$, l'accélération gravitationnelle ;
- $DH = 0.06 [m]$, la chute entre deux bassins successifs.

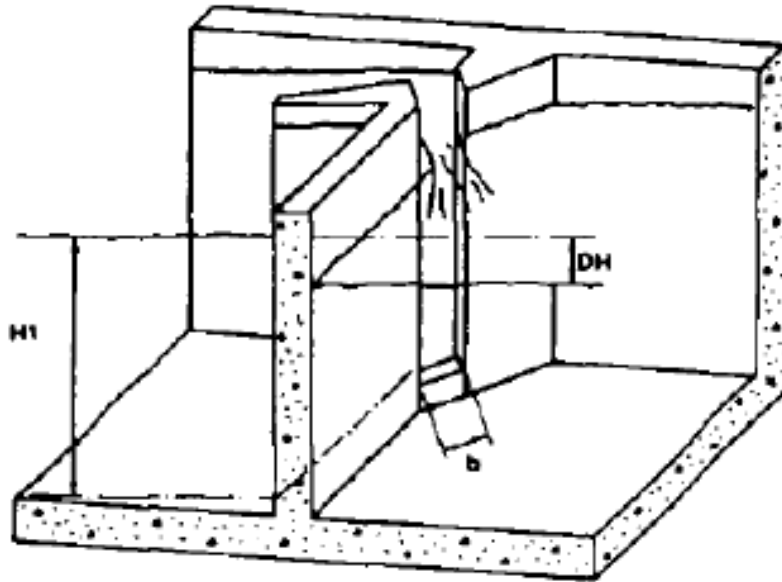


FIGURE 4.18 – Expression du débit passant dans une passe à échantures ([Larinier et al., 1994](#)).

4.2.2 Description du modèle simplifié d'une passe à anguilles

L'année 2020 a été marquée par l'arrivée de la Covid-19 accompagnée de ses complications. En raison de la propagation du virus, les essais prévus initialement dans le modèle réduit ont été annulés à cause du confinement. Les objectifs du mémoire ont donc été modifiés et pour valoriser les anguilles qui étaient déjà disponibles, un modèle réduit simplifié d'une passe à anguilles a pu être construit à domicile. Ses caractéristiques vont être présentées dans cette section. Le modèle simplifié est une rampe spécifique à anguille (Figure [4.19]).



FIGURE 4.19 – Photos du modèle simplifié d’une rampe à anguilles.

La rampe est modélisée à l’aide d’une auge d’alevinage dans le fond de laquelle est placé un substrat de fond de type picot (Figure [4.20]). L’auge est posée sur des bacs servant à moduler les pentes longitudinale et transversale de celle-ci. Une pompe alimente le circuit (voir section [5.2.4]) et peut être régulée à l’aide d’un bypass. Cet équipement rudimentaire permet d’atteindre une gamme plus ou moins large de débits variant entre $0.45 [L/s]$ et $1.53 [L/s]$. Les caractéristiques dimensionnelles liées à ce modèle simplifié de rampe à anguilles sont reprises dans le Tableau [4.6].

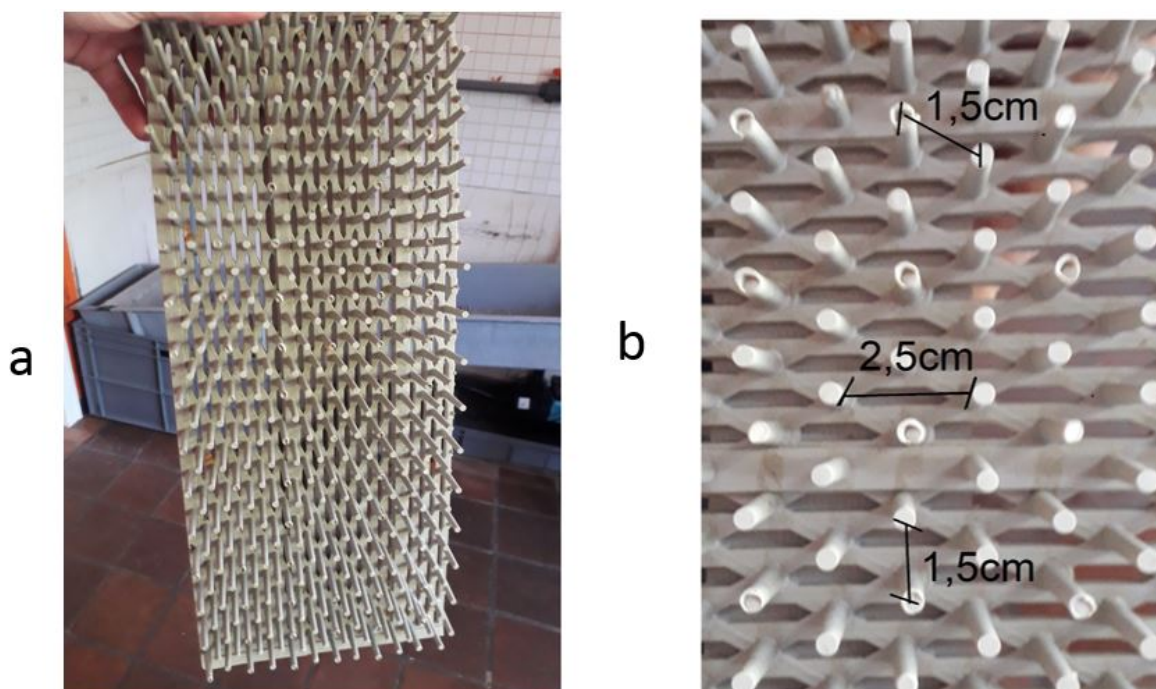


FIGURE 4.20 – (a) Photo générale d’un substrat de type picot utilisé dans le modèle simplifié d’une rampe à anguilles, (b) Dimension d’un substrat de type picot utilisé dans le simplifié d’une rampe à anguilles.

Longueur totale	Longueur utilisable	Largeur de fond	Profondeur	Hauteur des picots	Diamètre des picots
2.1 [m]	1.57 [m]	0.39 [m]	0.17 [m]	0.025 [m]	3 [mm] (tête) 4 [mm] (pied)

TABLE 4.6 – Dimensions principales du modèle simplifié utilisé comme rampe à anguilles et du substrat de fond de type picot.

Contrairement au modèle de la passe de Rivière, de par les dimensions imposées par le substrat disponible, ce modèle de rampe à anguilles peut être considéré comme un modèle à l'échelle 1 : 1 dont seule l'extension est plus limitée qu'une rampe réelle.

4.2.3 Similitudes

Travailler avec un modèle réduit permet d'effectuer des expériences en laboratoire. Cela peut présenter certains avantages par rapport à des tests effectués directement sur le prototype réel de la passe. En effet, une représentation simplifiée de la réalité mobilise moins de moyens et d'espace qu'un exemplaire à l'échelle réelle. De plus, cela permet non seulement de prendre des mesures plus aisément puisque le matériel est de plus petite dimension mais également de reproduire les essais en toutes circonstances à l'abri des éventuelles intempéries. Le modèle peut également être adapté dans une optique de réutilisation pour d'autres travaux. Afin de pouvoir transposer les résultats du modèle réduit au prototype, il faut appliquer des règles de similitudes. Celles-ci permettent de respecter la physique de l'écoulement à une échelle réduite.

Dans un premier temps, nous reprendrons les coefficients d'échelle à appliquer aux variables physiques de l'écoulement. Ensuite, une proposition de coefficient d'échelle pour le matériel vivant sera avancée sur bases de mémoires précédents (Courtois and Van Audenhaege, 2017; Bodarwé and Cabo, 2018).

Critères liés aux variables physiques

L'écoulement qui se produit dans une passe à bassins, dont il est question ici, est turbulent en raison des contractions de la veine fluide au niveau des échancrures. Une accélération du flux se produit au niveau des fentes verticales en raison de la réduction du passage du courant à ces endroits. En outre, l'écoulement se produit à surface libre. Les équations qui régissent les écoulements sont celles de Navier-Stokes (Legat and Winckelmans, 2015). L'équation de la conservation de la quantité de mouvement est :

$$\underbrace{\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}}_{\text{Acc. locale}} + \underbrace{\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}}_{\text{Acc. convective}} = \underbrace{-\nabla p}_{\text{Grad. pression}} + \underbrace{\rho \vec{g}}_{\text{Terme de pesanteur}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \vec{v}}_{\text{Terme visqueux}} \quad (4.1)$$

Sur base de cette équation, il est possible de dégager plusieurs nombres adimensionnels (Comolet, 1958).

- le nombre d'Euler, lié à la pression : $Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2}$;
- le nombre de Reynolds, lié au terme visqueux : $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$;

— le nombre de Froude, lié à la pesanteur : $Fr = \frac{v^2}{gL}$.

Ceux-ci doivent être égaux d'un écoulement à l'autre afin de respecter les règles de similitudes pour les écoulements à surface libre (Zech, 2007). Ceci ne peut se réaliser que par la solution triviale où les deux modèles ont les mêmes propriétés. Afin de contourner ce problème, il est possible d'émettre une hypothèse supplémentaire qui consiste à négliger l'influence du terme visqueux. Ainsi, les termes de pesanteur et d'inertie prédominent l'équation [4.1] et la similitude de Froude suffit pour caractériser l'écoulement.

De ce constat, il est possible d'attribuer des valeurs de coefficients d'échelles aux différentes variables qui définissent un écoulement. En partant de la similitude de Froude et en posant $\lambda = \lambda_L$, le rapport des longueurs, on trouve le coefficient d'échelle des vitesses λ_V :

$$Fr_1 = Fr_2 \implies \frac{L_2}{L_1} = \frac{v_2^2}{v_1^2} \implies \lambda_L = \lambda_V^2 \implies \lambda_V = \lambda^{1/2}$$

Le coefficient d'échelle lié au débit se trouve, quant à lui, à l'aide de l'équation de continuité :

$$Q [m^3/s] = v [m/s] \cdot A [m^2] \quad (4.2)$$

Ce résultat [équ. 4.2] est ramené à ses dimensions caractéristiques exprimées par rapport à la longueur L :

$$Q = v \cdot L^2 \sim L^{1/2} \cdot L^2 \quad (4.3)$$

Finalement le coefficient d'échelle du débit λ_Q est déterminé :

$$\lambda_Q = \lambda^{1/2} \cdot \lambda^2 = \lambda^{5/2}$$

En outre, la puissance dissipée par l'écoulement est donnée par la relation suivante :

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h = \gamma \cdot Q \cdot h \quad (4.4)$$

Puisque le modèle est soumis à la même accélération gravitationnelle que le prototype, nous posons $\lambda_N = 1$, le coefficient d'échelle associé aux forces. Ainsi, il est possible de dégager le coefficient d'échelle de la puissance dissipée λ_P partant de sa définition [équ. 4.4] :

$$\lambda_P = \lambda_\gamma \cdot \lambda_Q \cdot \lambda_L = \frac{\lambda_N}{\lambda_L^3} \cdot \lambda_Q \cdot \lambda_L \implies \lambda_P = \lambda^{1/2}$$

Finalement, il est possible de fixer les coefficients d'échelle du temps λ_t et de la pression λ_p en partant de l'équation de Navier-Stokes [équ. 4.1] :

$$\lambda_t = \lambda^{1/2} \quad \lambda_p = \lambda$$

Critères liés aux variables biologiques

Afin de travailler en modèle réduit avec des poissons à l'échelle, le choix se porte naturellement vers des poissons de plus petite taille. Une solution possible est l'utilisation de juvéniles dont le comportement sera extrapolé au stade adulte via les règles de similitudes. Cependant, cette approche soulève deux incertitudes. La première est de savoir si des biais éventuels sont envisageables entre le comportement du juvénile et celui de l'individu adulte puisque les mouvements des poissons dépendent de leur stade biologique (voir section [3.2]). La seconde est de respecter les règles de similitudes des variables biologiques

qui ne peuvent pas être déterminées sur la même base que les variables physiques. Les précédents travaux utilisant du matériel vivant ont longtemps cherché à savoir quelle loi d'échelle régissait la taille des individus. Plusieurs hypothèses de travail sont avancées suivant l'étude menée.

Certains s'accordent à dire que le matériel vivant peut être simplement caractérisé par sa longueur. Cela rend la mise à l'échelle assez simple et généralisable à tout type de poisson. D'autres estiment que c'est la capacité de nage qui devrait primer sur la taille à utiliser en modèle réduit. La vitesse de nage des poissons devrait donc disposer de son propre coefficient d'échelle afin de respecter au mieux les lois de similitudes. Cette approche a été utilisée dans les deux derniers travaux en date effectués sur le modèle réduit de la passe de Rivière (Courtois and Van Audenhaege, 2017; Bodarwé and Cabo, 2018). Celle-ci sera rappelée ici afin de différencier les cas du saumon atlantique et de l'anguille européenne.

Pour rappel, la vitesse d'un poisson dépend de son activité de nage. Deux vitesses sont généralement utilisées : la vitesse maximale de sprint U_{mb} [m/s] et la vitesse critique U_{crit} [m/s]. La signification de ces vitesses se trouve à la section [3.3.3]. En reprenant les travaux de Katopodis and Gervais (2016), il est possible d'observer que chaque vitesse peut s'exprimer en fonction de la longueur du poisson L_p [m] comme :

$$U = C \cdot L_p^x \sim L_p^x$$

avec C , une constante et x , un exposant numérique.

Deux coefficients d'échelle vont être calculés, un par type d'espèce étudiée dans ce travail. En effet, l'exposant x sera identique pour l'estimation de la vitesse maximale de sprint et la vitesse critique [éq. 3.14].

Cas du saumon atlantique :

En partant de l'équation adimensionnelle de la vitesse reprise au Tableau [3.1] :

$$v \sim L^{0.566} \implies L_p \sim v^{1/0.566}$$

En définissant λ_{L_p} comme le coefficient d'échelle de la longueur du poisson, celui-ci peut s'exprimer comme :

$$\lambda_{L_p} = \lambda_v^{1/0.566} \implies \lambda_{L_p} = \lambda^{0.88}$$

Dans un modèle à l'échelle 1 : 5, la taille des saumons respectant les similitudes de nage sera de :

$$\left(\frac{1}{5}\right)^{0.88} \cdot L_p = 0.241 \cdot L_p \quad \text{soit 24.1\% de la taille réelle visée} \quad (4.5)$$

Cas de l'anguille européenne :

En partant de l'équation adimensionnelle de la vitesse reprise au Tableau [3.4] :

$$V \sim L^{0.702} \implies L_p \sim v^{1/0.702}$$

En utilisant la même procédure que précédemment, la taille des anguilles respectant les similitudes de nage vaudra :

$$\left(\frac{1}{5}\right)^{0.71} \cdot L_p = 0.318 \cdot L_p \quad \text{soit 31.8\% de la taille réelle visée} \quad (4.6)$$

Récapitulatif des coefficients d'échelles

Le Tableau [4.7] reprend de manière condensée l'ensemble des résultats d'échelle obtenus précédemment. Le facteur d'échelle est noté λ .

Variables physiques					
Longueur	Vitesse	Débit	Puissance Dissipée	Temps	Pression
$L [m]$	$v [m/s]$	$Q [m^3/s]$	$P [W/m^3]$	$t [s]$	$p [Pa]$
$\lambda_L = \lambda$	$\lambda_v = \lambda^{1/2}$	$\lambda_Q = \lambda^{5/2}$	$\lambda_P = \lambda^{1/2}$	$\lambda_t = \lambda$	$\lambda_p = \lambda^{1/2}$

Variables biologiques	
Taille saumon atlantique	Taille anguille européenne
$L_p [m] : \lambda_{L_p} = \lambda^{0.88}$	$L_p [m] : \lambda_{L_p} = \lambda^{0.71}$

TABLE 4.7 – Tableau récapitulatif des coefficients d'échelle utilisés.

Application des lois au modèle réduit

Une fois les coefficients d'échelle établis, les dimensions de la passe peuvent être proportionnées en conséquence. De même, les grandeurs physiques de l'écoulement seront calculées par le biais des règles de similitudes. Un rappel des principales grandeurs de l'écoulement de la passe de Rivière est présenté au Tableau [4.8]. Les coefficients d'échelles utilisés sont ceux mentionnés au Tableau [4.7].

Echelle	Facteur multiplicateur	Grandeur	Prototype	Modèle Réduit
Longueur	$\lambda_L = 1/5$	Longueur totale	50 [m]	10 [m]
		Chute totale	2.05 [m]	0.41 [m]
		Largeur échancrure	0.30 [m]	0.06 [m]
Débit	$\lambda_Q = (1/5)^{5/2}$	Débit total	2.5 [m ³ /s]	0.045 [m ³ /s]
Vitesse	$\lambda_v = (1/5)^{1/2}$	Vitesse maximale	1.0 [m/s]	0.45 [m/s]
Puissance	$\lambda_P = (1/5)^{1/2}$	Puissance dissipée	130 [W/m ³]	58 [W/m ³]

TABLE 4.8 – Valeurs principales de l'écoulement de la passe à poissons de Rivière mises à l'échelle (Zorzan et al., 2016).

4.3 Modèles numériques

Cette section a pour but de résumer les résultats obtenus antérieurement sur la modélisation numérique de l'écoulement de la passe de Rivière. Ceux-ci avaient comme objectifs principaux de confirmer les valeurs caractéristiques théoriques et de détailler les champs de vitesse à l'aide de calculs discrets performants. Dans un premier temps, la modélisation numérique réalisée par Baugnée and De Greef (2014) sera explicitée. Celle-ci se base sur le logiciel TELEMAC. Dans un second temps, la simulation numérique tenant compte de l'écoulement en présence d'un substrat de fond sera présentée sur base du

mémoire de Bodarwé and Cabo (2018). Cette dernière s’est faite au moyen du logiciel SolidWorks.

4.3.1 Modélisation TELEMAC

Comme déjà mentionné, l’écoulement qui se propage dans une passe à bassins est un écoulement turbulent à surface libre. Tenir compte des turbulences consiste, d’un point de vue physique, à intégrer l’influence du coefficient de viscosité dynamique (ν_t) dans l’expression des contraintes visqueuses. Les équations de Navier-Stokes [éq. 4.1] et de Saint-Venant sont donc modifiées. L’estimation de ce paramètre peut se faire de diverses façons : coefficient constant, modèle de Smagorinsky ou modèle k-epsilon ($k - \epsilon$). Dans le dernier modèle cité, k représente l’énergie cinétique turbulente et ϵ la dissipation de cette même énergie.

Le logiciel d’éléments finis TELEMAC permet de simuler un écoulement turbulent à surface libre en tenant compte de la viscosité dynamique du fluide dont il est question. Deux simulations distinctes ont été lancées, l’une en deux dimensions et la seconde en trois dimensions. Celles-ci ont mis en évidence des grandeurs propres à l’écoulement comme la vitesse, le débit et la hauteur d’eau.

La simulation 2D implémentée avec le modèle $k - \epsilon$ a donné les résultats les plus proches de la réalité. Cependant, il tend à sous-estimer la vitesse des zones aux vitesses plus élevées, notamment au droit des échancrures. Ceci s’explique par le fait que le logiciel surévalue la dissipation d’énergie de l’écoulement. Une représentation graphique des résultats du modèle 2D est illustré à la Figure [4.21].

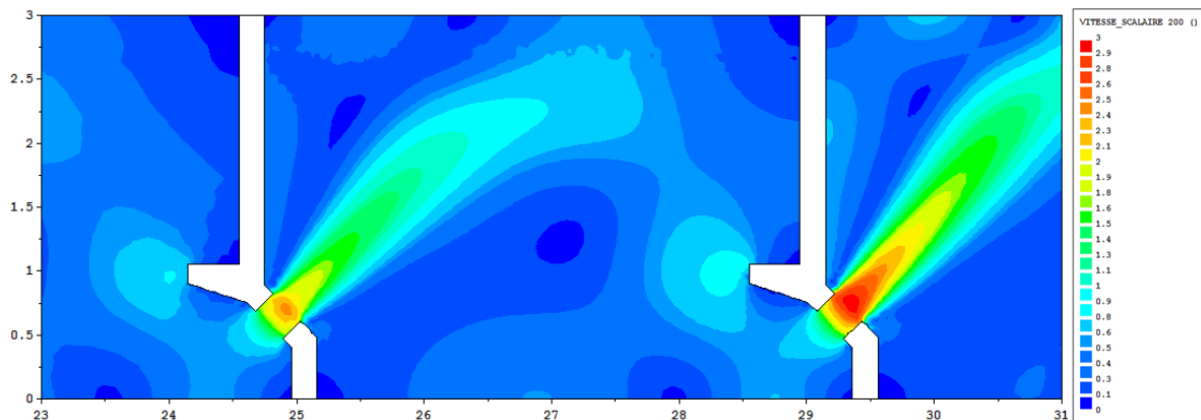


FIGURE 4.21 – Illustration des vitesses dans le bassin 4 de la passe à poissons de Rivière, simulation 2D (Bagnée and De Greef, 2014).

La modélisation 3D (Figure [4.22]) donne quant à elle des résultats peu convaincants comparés aux mesures de vitesse et de pression prises en parallèle sur terrain.

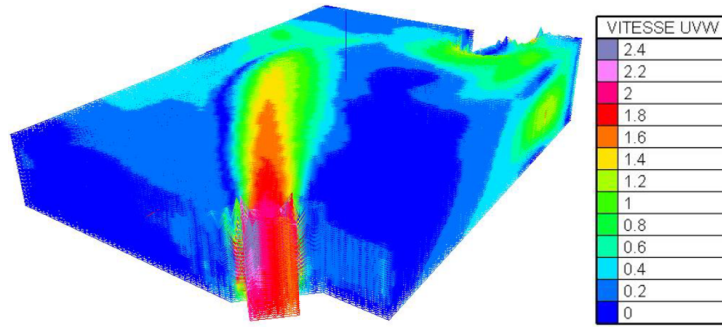


FIGURE 4.22 – Illustration des vitesses dans le bassin 4 de la passe à poissons de Rivière, simulation 3D (Bagnée and De Greef, 2014).

Comme tout modèle utilisant des éléments finis, les résultats obtenus aux frontières du modèle sont peu fiables pour des raisons de précision du maillage à ces endroits. Néanmoins, elle permet de confirmer l’allure de la veine fluide de l’écoulement. Celle-ci se rétrécit au niveau des échancrures en raison du passage de l’eau par les portes verticales plus étroites que les bassins. Des zones de recirculation apparaissent également. Ces zones sont privilégiées par les poissons incapables de franchir la passe en une seule étape comme mentionné dans les travaux de Pype (2015) et de Courtois and Van Audenhaege (2017). Une représentation des lignes de courant et des zones de recirculation est schématisée à la Figure [4.23].

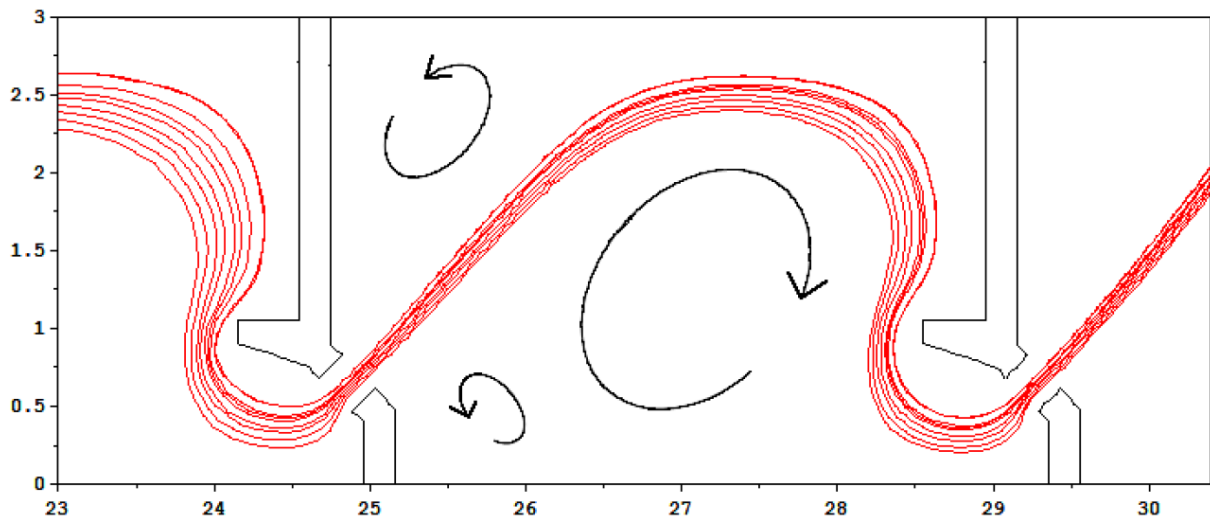


FIGURE 4.23 – Illustration des lignes de courant (en rouge) et des zones de recirculation (en noir) dans le bassin 4 de la passe de Rivière (Bagnée and De Greef, 2014).

Par ailleurs les relevés de vitesse et de pression ont permis de confronter la modélisation numérique au prototype réel et par extension au modèle réduit. Une synthèse des résultats numériques obtenus est rassemblée au Tableau [4.9]. En utilisant le facteur d’échelle de la vitesse $\lambda_v = \lambda^{1/2}$, les résultats ont pu être étendus au modèle réduit. Premièrement, les chiffres obtenus pour la vitesse maximale surpassent fortement les prescriptions piscicoles collectées au Tableau [4.8]. Cela s’explique par le fait que les vitesses données par Zorzan et al. (2016) sont celles prévues au sein des bassins et non au droit des échancrures.

Vitesse	Zone	Prototype	Modèle réduit
$V_{\max}$	Echancrures	2.0 à 3.0 [m/s]	0.89 à 1.34 [m/s]
V_{moy}	Courant principal	1.0 à 1.5 [m/s]	0.44 à 0.67 [m/s]
$V_{\min}$	Zones de recirculation	0.30 [m/s]	0.13 [m/s]

Vitesse préconisée par Zorzan (2016)	1.0 [m/s]	0.45 [m/s]
--------------------------------------	-----------	------------

TABLE 4.9 – Valeurs des vitesses obtenues via la modélisation numérique de l’écoulement de la passe de Rivière.

D’autre part, les mesures de vitesse prises sur la maquette ont montré que les vitesses les plus élevées à la surface de l’écoulement ne dépassent pas 0.5 à 0.6 [m/s] dans le courant principal. Ceci dépasse tout de même la prescription d’une vitesse de 0.45 [m/s] prévue par Zorzan et al. (2016). En admettant que la vitesse de l’écoulement dans la colonne d’eau soit légèrement inférieure à celle mesurée en surface, le modèle peut être considéré comme conforme aux normes prévues.

4.3.2 Modélisation SolidWorks

Dans un deuxième temps, le modèle réduit a été équipé de plots sur son fond dans le but d’accroître le taux de remontée des espèces benthiques (Bodarwé and Cabo, 2018). Une nouvelle simulation numérique a donc été envisagée afin de s’assurer que l’ajout de ce substrat ne perturbe pas les normes de l’écoulement établi. Cette dernière s’est opérée à l’aide du logiciel d’analyse dynamique des fluides SolidWorks. Il se base sur les équations de Navier-Stokes qui définissent un écoulement turbulent à surface libre. Une représentation des lignes de courant obtenues est montré à la Figure [4.24].

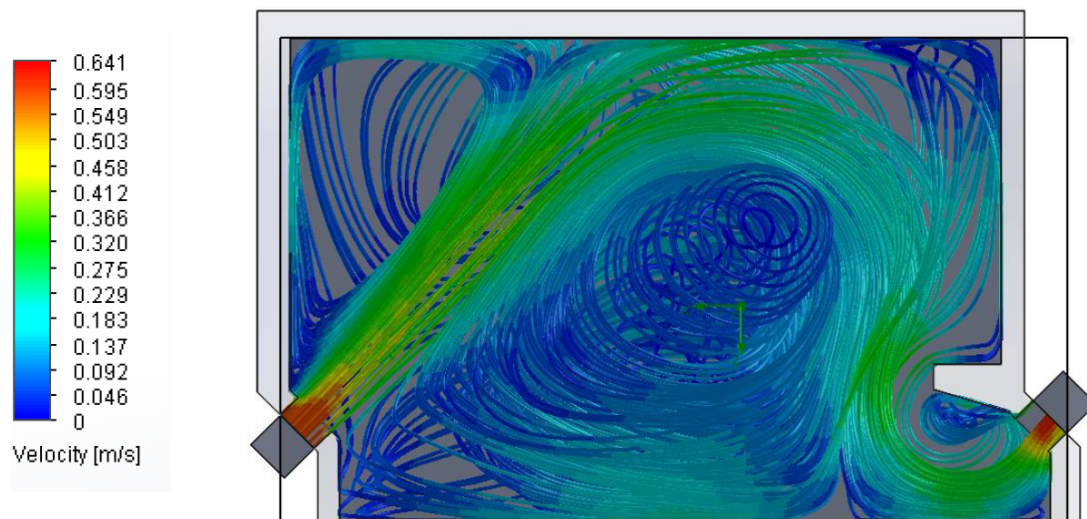


FIGURE 4.24 – Représentation numérique de l’écoulement du bassin 4 de la passe de Rivière en présence d’un substrat de fond (Bodarwé and Cabo, 2018).

Les résultats numériques montrent de manière générale que la présence d’un substrat de fond ne modifie pas significativement les vitesses au sein de la passe. Des mesures

proches du fond ont été prises et rapportent une vitesse moyenne de $0.64 [m/s]$ alors que la valeur calculée par le logiciel TELEMAC avoisinait $0.67 [m/s]$. L'optimisation du substrat utilisé s'est déterminée au moyen d'essais. L'activité des poissons en présence des différents substrats a permis de trancher quel type de plot et d'espacement serait utilisé dans la passe.

Chapitre 5

Matériel

5.1 Matériel vivant

Cette section se penchera sur la description du matériel vivant utilisé dans le cadre des expérimentations. Premièrement, une brève description physique de chaque espèce étudiée sera présentée. Ensuite, une analyse morphologique des spécimens utilisés sera donnée. Elle mettra en relation le poids et la taille des individus qui auront pris part aux expériences. Enfin, la vitesse des individus sera prédite et mise en relation d’une part avec les modèles de vitesse existants présentés à la section [3.4.2], et d’autre part avec les résultats de la littérature.

5.1.1 Les saumons

Description

Le saumon atlantique est un poisson migrateur anadrome qui vit tantôt en mer tantôt en eau douce. Le saumon atlantique, comme le renseigne son nom, se retrouve dans l’ensemble des pays qui possèdent une frontière maritime avec l’Atlantique Nord (NOAA, 2020a). Une illustration d’un saumon adulte est montrée à la Figure [5.1].

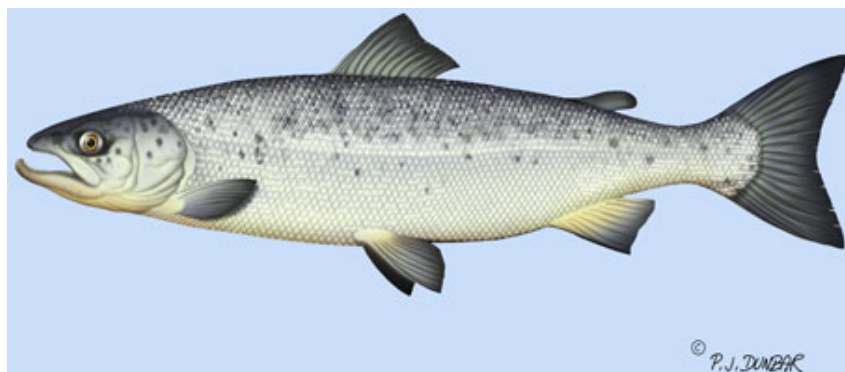


FIGURE 5.1 – Représentation d’un saumon atlantique adulte (Dunbar, ndb).

Son nom scientifique, *Salmo Salar*, possède des racines latines. *Salmo* signifie *saumon* tandis que le terme *Salar* peut faire référence à deux choses. Etymologiquement, *salar* définit un résident d’eau salée. Cette première signification tient la route puisque la croissance du saumon atlantique s’effectue en mer et plus spécifiquement dans l’Océan Atlantique. Cependant, le terme *salar* pourrait également signifier sauteur (Barton and Bond, 2007).

Cette seconde définition ferait donc référence à la capacité du saumon atlantique à pouvoir sauter hors de l'eau afin de remonter les rivières.

Le corps du saumon est allongé et élancé (Logrami, nd). Sa silhouette fusiforme est effilée aux extrémités tandis qu'elle s'arrondit et s'élargit au milieu (NOAA, 2020a). Ses écailles sont plutôt larges (Massie, 1998) et changent de couleur selon la croissance. Le saumon adulte possède une robe argentée qui se pigmente en rouge par endroits à l'approche de la reproduction (Malbrouck et al., 2007). Avant d'arborer cette teinte métallique, le jeune saumon est plutôt brun, voire bronzé, avec des stries verticales plus foncées (NOAA, 2020b).

La tête du saumon est petite et aplatie sur sa face supérieure (Logrami, nd). Elle ne dépasse pas un cinquième de sa longueur totale (NOAA, 2020a). Son nez est émoussé (Massie, 1998) et la forme du museau varie suivant le sexe (Dunbar, ndb). Le mâle possède un museau plus allongé alors que celui de la femelle est plus arrondi.

La bouche du saumon ne dépasse pas l'aplomb du bord postérieur de son oeil (Dunbar, ndb). Sa mâchoire est relativement grande (Logrami, nd) et munie de grosses dents de forme conique (Massie, 1998). Ses yeux sont assez petits (Massie, 1998).

Le saumon possède également une grande nageoire caudale (Logrami, nd) légèrement fourchue (Massie, 1998). Il a la particularité de posséder une nageoire adipeuse (Dunbar, ndb), symbole de la famille des salmonidés et absent chez la majorité des autres poissons. C'est la seule nageoire qui n'est pas bordée d'une teinte noire à l'âge adulte.

Certains adultes atteignent des tailles supérieures à 1.5 [m] avec un poids dépassant les 10 [kg] (Logrami, nd). Cependant, la majorité des saumons atteignent une longueur comprise entre 50 et 70 [cm] pour une masse de 2.3 à 9.1 [kg] (Dunbar, ndb). Un cycle de vie dure généralement entre 4 et 6 ans lorsqu'une seule reproduction est réalisée au cours de son existence (NOAA, 2020a). Certains saumons retournent en mer après la reproduction. Ceux-là peuvent vivre jusqu'à 14-15 ans (Dunbar, ndb).

Les individus qui effectueront les essais seront des tacons de moins d'un an qui n'auront pas encore smoltifié et dont les écailles ne seront pas encore argentées. Leur taille est plus petite et comprise entre 10 et 15 [cm]. Une représentation imagée d'un tacon est illustrée à la Figure [5.2].



FIGURE 5.2 – Représentation d'un saumon atlantique juvénile (Maine, nd).

Carte d'identité

Une carte d'identité succincte des caractéristiques du saumon atlantique est exposée au Tableau [5.1].

Nom	Saumon atlantique
Nom scientifique	Salmo Salar
Famille	Salmonidés
Ordre	Salmoniformes
Coloration	Argenté avec pigments rouges (adulte) Brunâtre avec stries noires (juvénile)
Régime alimentaire	Carnivore : crustacés, poissons, céphalopodes
Situation géographique	Nord de l'Océan Atlantique
Comportement	Crépusculaire
Domaine de vie	Zone pélagique
Habitat	Ruisseaux à fonds de graviers (eau douce) Aires d'engraissement du nord de l'Atlantique (en mer)
Maturité sexuelle	Très variable, entre 1 et 6 ans
Période de reproduction	Octobre à janvier
Lieu de fraie	En amont des rivières
Type de nage	Subcarangiforme
Taille courante	50 à 70 [cm]
Poids courant	2.3 à 9.1 [kg]
Longévité courante	4 à 6 ans
Vessie natatoire	Oui
Danger d'extinction	Oui, catégorie LC (less concerned) UICN
Groupe ICE	1
Présence en Meuse	Oui
Présence dans les passes à bassins	Oui

TABLE 5.1 – Synthèse des caractéristiques propres au saumon atlantique.

Description des lots

L'ensemble des tacons qui ont participé aux expériences provenaient de la pisciculture d'Erezée située dans la province de Liège. Ils ont été capturés à l'aide d'une épuisette dans un des bassins d'élevage dont la vidange avait été enclenchée pour faciliter leur prise. Ces jeunes saumons sont élevés en captivité au **Conservatoire du Saumon Mosan** (Cosmos) avant d'être réintroduits dans la Meuse. La naissance de ces poissons est manœuvrée et contrôlée par les employés de la pisciculture qui veillent au bon déroulement de la reproduction.

Six tacons ont été marqués en première instance afin d'effectuer des tests préliminaires mais n'ont finalement pas servi aux expériences. Ensuite, 200 tacons ont été marqués, mesurés et pesés par des professionnels de la pisciculture afin de mener à bien les recherches visées. En raison d'erreurs de manipulations et des contraintes de mortalité, 152 tacons

ont participé au total des neuf expériences entreprises sur l’ombrage.

Taille [mm]				Poids [g]			
Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
125.3	10.6	104	157	22.3	6.0	11.3	46.3

TABLE 5.2 – Valeurs caractéristiques mathématiques de l’échantillon de 152 tacons.

Chaque tacon possédait une puce qui l’identifiait de manière individuelle du reste du lot utilisé pour l’expérience. Les détails de la formation des lots sont expliqués à la section [6.2.1]. En effet, certains poissons ont effectué plusieurs essais dans des conditions de mélange de lot. Afin de définir l’échantillon, une distribution statistique des caractéristiques morphologiques a été dressée. Les paramètres mathématiques principaux permettant de réaliser ces courbes sont indiqués au Tableau [5.2]. Ils ont été déterminés à l’aide du logiciel Excel développé par l’entreprise américaine Microsoft. La Figure [5.3] reprend la proportion de taille et de poids des 152 saumons juvéniles testés. Les distributions relatives à chaque lot d’expériences ainsi que leurs paramètres mathématiques sont disponibles en annexe (respectivement Annexes [B.1.1] et [B.1.2]).

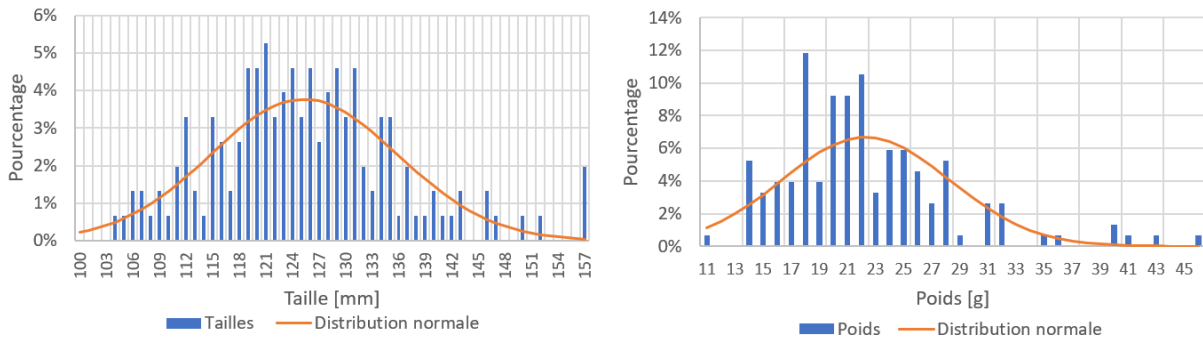


FIGURE 5.3 – Distributions statistiques de la taille et du poids de l’échantillon de 152 tacons.

En plus de l’élaboration de la distribution statistique du lot, il a été jugé utile de mettre en relation le poids et la taille des individus. En effet, ce rapport est un indicateur de l’état de santé des poissons. Des corrélations présentes dans la littérature existent pour ces deux paramètres morphologiques. Comparer ces valeurs à celle des individus du lot étudié rendra compte de leur représentativité vis-à-vis de l’ensemble des spécimens de cette espèce.

La relation qui lie la longueur d’un poisson L [cm] à son poids P [g] est donnée par une interpolation de type puissance dont les paramètres a et b sont modulés suivant l’espèce :

$$P = a \cdot L^b \quad (5.1)$$

Les paramètres a et b sont déterminés au moyen de la compilation de résultats expérimentaux disponibles sous forme de bases de données. Pour le saumon atlantique, la moyenne des études menées a permis d’obtenir les valeurs suivantes : $a = 0.012$ et $b = 3.00$ (Luna, 2020).

Concernant l'échantillon de tacons traité dans ce travail, les valeurs obtenues sont proches de celle recensées par la littérature. Elles valent respectivement $a = 0.0127$ et $b = 2.9475$. Elles ont été déterminées par régression à l'aide du logiciel **Excel**. Malgré de légères différences, la proximité des valeurs de l'échantillon avec les valeurs provenant des bases de données témoigne de sa représentativité à l'échelle de l'espèce. La loi de type puissance est représentée à la Figure [5.4]. Le coefficient de détermination R^2 s'approche de l'unité ce qui confirme que l'échantillon est caractéristique de l'espèce. Un détail des valeurs propres à chaque lot d'expérimentation est disponible à l'Annexe [B.2].

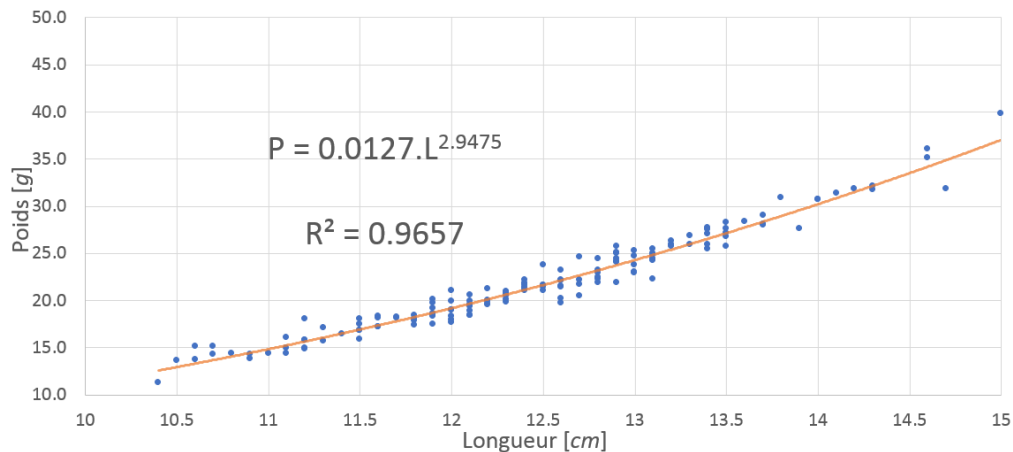


FIGURE 5.4 – Relation liant la taille et le poids de l'échantillon de 152 tacons.

Justification de la taille

Comme les expériences se déroulent sur un modèle réduit, les rapports de similitudes, présentés à la section [4.2.3], doivent également être appliqués au matériel vivant. De plus, il faut s'assurer que les contraintes liées aux dimensions du modèle soient respectées. C'est notamment le cas de la largeur des échancrures.

Les tacons qui ont servi aux expériences possédaient une taille située entre 10 et 15 [cm]. Cet intervalle n'a pas été choisi au hasard. D'une part, il permet de satisfaire le coefficient d'échelle 1 : 5 du modèle réduit. En effet, les saumons adultes qui remontent la Meuse afin de se reproduire ont une taille moyenne proche des 75 [cm] si l'on se base sur les résultats obtenus à Lixhe en 2018 (Benitez et al., 2019). Le coefficient d'échelle déterminé pour la longueur du poisson sur base de ses performances de nage permettrait même d'employer des poissons de taille supérieure (voir [eq. 4.5]).

De plus, des essais précédents menés sur des salmonidés par Pype (2015) sur ce même modèle ont montré que cette gamme de taille de tacons était tout à fait capable de franchir le dispositif sans difficulté majeure. Ces résultats sont d'ailleurs confirmés par les modèles de nage établis pour l'activité de sprint (Tableau [3.1]) et la vitesse maximale de croisière (Tableau [3.2]).

Un saumon de 10 [cm] est capable de nager à une vitesse supérieure à 1.0 [m/s], ce qui lui permettra de franchir les échancrures de la passe. En effet, des mesures rappelées à la section [4.3.1] ont permis de montrer que les vitesses ne dépassaient pas 0.5 à 0.6 [m/s]

dans les zones les plus critiques.

Par ailleurs, la vitesse critique de croisière des jeunes tacons est proche de $0.6 [m/s]$. Il n'aura donc pas de difficulté à trouver des zones où la vitesse est inférieure à ce seuil afin de se reposer entre chaque effort de franchissement de bassin à bassin.

5.1.2 Les anguilles

Description

L'anguille européenne est une espèce migratrice catadrome qui alterne son cycle de vie entre milieu marin et rivière. Elle se retrouve, lors de sa période de croissance, dans les cours d'eau, les mares et les estuaires qui bordent l'Europe. Pendant sa période de reproduction, l'anguille européenne colonise la mer afin de pondre ses oeufs dans la mer des Sargasses (Als et al., 2011). Une représentation imagée d'une anguille européenne adulte est illustrée à la Figure [5.5].



FIGURE 5.5 – Illustration d'une anguille européenne adulte (Dunbar, nda).

Le nom scientifique attribué à l'anguille européenne est *Anguilla anguilla* afin de la distinguer de ses pairs américaine (*Anguilla rostrata*) et japonaise (*Anguilla japonica*). L'étymologie de l'appellation anguille provient du terme latin *anguis* qui signifie *serpent*. Ceci est dû à la proximité physique qu'entretient ce poisson avec le reptile (ICEM, nd).

La forme du corps de l'anguille est qualifiée de serpentiforme (ERB, nd) pour la raison évoquée ci-dessus. La silhouette de l'anguille est très allongée et cylindrique sur sa partie antérieure (Dunbar, nda) alors qu'elle s'aplatit et se comprime sur sa partie postérieure (Bauchot, 1986).

Sa peau est épaisse et recouverte d'une multitude de minuscules écailles de forme ovale (ERB, nd). Elle possède un aspect lisse et visqueux (Dunbar, nda) en raison de l'épais mucus qui la recouvre. Celui-ci rend l'anguille pratiquement insaisissable à mains nues.

Les nageoires pectorales de l'anguille sont petites (Dunbar, nda) et bien développées (ERB, nd). Ses nageoires impaires quant à elles sont longues et fusionnent au niveau de l'extrémité de sa queue (Dunbar, nda). En effet, les nageoires dorsale et anale confluent

avec la nageoire caudale sur son extrémité (FAO, 2020).

Après le stade larvaire, l'anguille juvénile appelée civelle arbore une teinte transparente (FAO, 2020). L'anguille se pigmente au fur et à mesure de sa croissance déployant des nuances brunes sur son dos et des flancs jaune (ERB, nd). Elle est d'ailleurs qualifiée d'anguille jaune à cette étape de sa vie. Lorsqu'elle se rapproche de la maturité sexuelle, l'anguille présente un dos noir avec des reflets argentés sur sa partie inférieure (ERB, nd).

Sa tête est longue (FAO, 2020) et présente de fines ouvertures branchiales (Schofield and Fuller, 2011). La mâchoire inférieure est légèrement plus grande que la mâchoire supérieure (Bauchot, 1986). L'oeil de l'anguille est petit et rond (Dunbar, nda). Il grossit à l'approche de la migration de reproduction (ERB, nd) afin de s'acclimater aux profondeurs marines.

Nom	Anguille européenne
Nom scientifique	Anguilla anguilla
Famille	Anguillidés
Ordre	Anguilliformes
Coloration	Argentée avec dos noir (adulte) Transparente (juvénile)
Régime alimentaire	Carnivore : vase, petits crustacés, larves d'insectes, petits poissons
Situation géographique	Rivières, mares et estuaires d'Europe
Comportement	Nocturne
Domaine de vie	Zone benthique
Habitat	Substrats et graviers des rivières (eau douce) Zones profondes (en mer)
Maturité sexuelle	8 à 10 ans pour les mâles 12 à 15 ans pour les femelles
Période de reproduction	Mars - Avril
Lieu de fraie	Mer des Sargasses
Type de nage	Anguilliforme
Taille courante	40 à 60 [cm] pour les mâles 100 à 150 [cm] pour les femelles
Poids courant	0.5 à 1.0 [kg] pour les mâles 2 à 4 [kg] pour les femelles
Longévité courante	10 à 15 ans
Vessie natatoire	Oui
Danger d'extinction	Oui, catégorie CE (critically endangered) UICN
Groupe ICE	11a (anguilles), 11b (civelles)
Présence en Meuse	Oui
Présence dans les passes à bassins	Non

TABLE 5.3 – Synthèse des caractéristiques propres à l'anguille européenne.

Carte d'identité

Une carte d'identité sommaire des caractéristiques de l'anguille européenne est présentée au Tableau [5.3].

Description des lots

Les anguilles ont été cherchées dans une ferme d'élevage (Rijpelaal B.V.) aux Pays-Bas à Eindhoven et transportées jusqu'au hall d'essais à Châtelet. Les anguilles de cette pisciculture sont a priori destinées à la consommation humaine. Elles sont soit revendues à la grande distribution ou aux particuliers, soit consommées directement sur place. En effet, le domaine est également pourvu de sa propre fumerie. Néanmoins, il a été possible de récupérer de jeunes anguilles en parfaite santé sélectionnées pour les expérimentations.

Un test préliminaire réalisé avec 20 civelles a permis de montrer que les espèces susceptibles de pouvoir franchir la passe à bassins devaient posséder une taille supérieure. C'est pourquoi un lot de 250 anguilles a été récupéré. Ces dernières ont été marquées par des employés spécialisés du département de biologie de l'Université de Liège. Originellement, elles devaient être réparties en différents lots et étudiées dans le cadre du franchissement d'une passe à bassins. Suite à la situation sanitaire imposée par les autorités gouvernementales (Covid-19), l'accès au laboratoire, et par extension au modèle réduit, a été interdit. Pour cette raison, un échantillon de 50 individus a été prélevé afin d'observer leur comportement dans une rampe réduite simplifiée présentée précédemment à la section [4.2.2].

Tous les individus avaient été tagués et caractérisés. De la même manière que pour les tacons, une distribution statistique de la taille et du poids des anguilles a été établie (Figure [5.6]). Les paramètres mathématiques principaux qui ont permis de réaliser la loi statistique correspondant à chaque variable sont indiqués au Tableau [5.4]. Ils ont aussi été calculés au moyen du logiciel Excel.

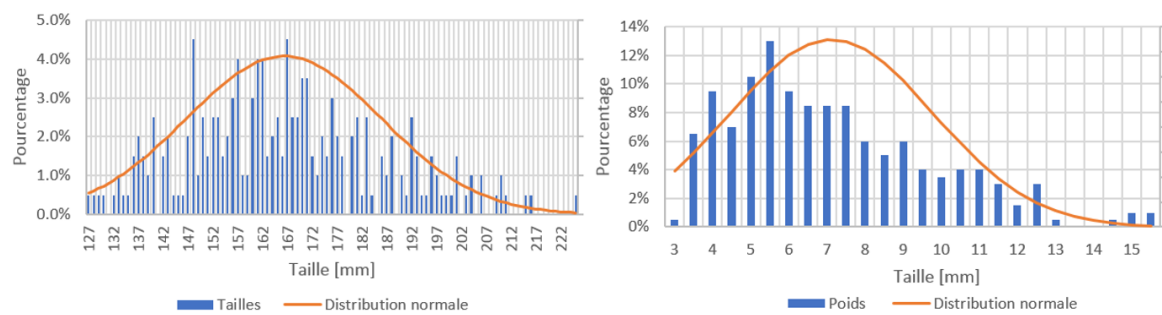


FIGURE 5.6 – Distributions statistiques de la taille et du poids de l'échantillon de 250 anguilles.

Taille [mm]				Poids [g]			
Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
166.3	19.6	127	225	7.1	2.7	3.2	15.7

TABLE 5.4 – Valeurs caractéristiques mathématiques de l'échantillon de 250 anguilles.

La Figure [5.6] reprend la distribution des tailles et des poids des 250 anguilles marquées. Il sera supposé que les 50 anguilles utilisées pour l'étude de la rampe possèdent les mêmes distributions. Cette hypothèse est audacieuse mais compte tenu de l'échantillon assez large, elle ne devrait pas s'éloigner fortement des valeurs mentionnées.

Tout comme pour les jeunes saumons, le poids et la taille des individus peuvent être corrélés suivant une régression de type puissance (voir [eq. 5.1]). Les paramètres a et b sont déterminés au moyen de la compilation de résultats expérimentaux disponibles sous forme de bases de données. Pour l'anguille européenne, la moyenne des études menées a permis d'obtenir les valeurs suivantes : $a = 0.001$ et $b = 3.14$ (Froese, 2020).

Les valeurs obtenues pour l'échantillon d'anguilles s'éloignent légèrement des paramètres moyennés de la littérature. Elles ont été calculées par les fonctions prédéfinies d'Excel et valent respectivement $a = 0.0025$ et $b = 2.8095$. Le coefficient de détermination R^2 reste relativement correct d'un point de vue représentatif même s'il n'est pas aussi précis qu'il pourrait l'être. Ceci s'explique en partie par le fait que les anguilles n'ont pu être choisies au cas par cas compte tenu des possibilités de capture d'anguilles vivantes à la ferme d'élevage d'Eindhoven. En dépit de ces petites variations, l'échantillon peut néanmoins être jugé représentatif de jeunes anguilles. La loi de type puissance est représentée à la Figure [5.7].

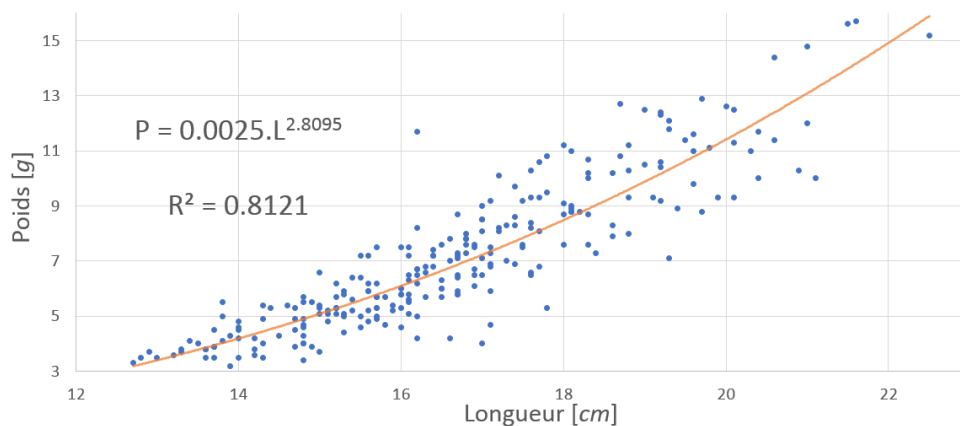


FIGURE 5.7 – Relation liant la taille et le poids de l'échantillon de 250 anguilles.

Justification de la taille

Le choix de la taille des individus s'est basé sur le même principe de similitudes que le choix des tacons. C'est ainsi que l'échantillon d'anguilles possédait une taille comprise entre 12.5 et 22.5 [cm]. Leur diamètre n'a pas pu être mesuré de façon exacte mais celui-ci était de l'ordre de 5 [mm]. Cette gamme de taille permet de globalement respecter le coefficient d'échelle du modèle. En effet, les derniers résultats de captures réalisées en Meuse sur les anguilles ont recensé des individus dont la taille moyenne était de 41.9 [cm] avec des individus pouvant mesurer jusqu'à 76.0 [cm]. Ces données ont été établies au barrage de Lixhe entre mai et septembre 2018 (Benitez et al., 2019). Le coefficient d'échelle théorique déterminé à la section [4.2.3] pour la longueur d'une anguille (voir [eq. 4.6]) respecte la loi de similitude. Il faut néanmoins souligner que des anguilles de taille inférieure ont été pêchées à Lixhe, avec un minimum évalué à 10 [cm] (Benitez et al., 2019). Ces anguilles de

taille inférieure ne respectent pas le coefficient d'échelle théorique. Les résultats obtenus ne pourraient donc être valables que pour les anguilles de gabarit supérieur.

Par ailleurs, des tests préliminaires sur des civelles avaient été tentés au cours du travail mené par Bodarwé and Cabo (2018). Ceux-ci n'avaient pas abouti pour des raisons d'identification et de taille trop petite. Les spécimens sélectionnés dans le cadre de notre étude sont de taille supérieure et permettent d'atteindre des vitesses de nage plus élevées. En effet, ces derniers entrent dans la classe ICE 11a définie par l'ONEMA (Baudouin et al., 2014). Cette catégorie stipule une vitesse maximale théorique de $1.5 [m/s]$ pour les spécimens de taille supérieure à $12 [cm]$. Cependant, ce modèle est restrictif et peu précis puisqu'il ne distingue que deux catégories de taille.

Enfin, une approche peut également se pencher sur les modèles de vitesses de nage développés pour l'activité de sprint (Tableau [3.4]) et la vitesse maximale de croisière (Tableau [3.5]). Une anguille de l'échantillon sélectionné est ainsi capable de nager à une vitesse maximale dépassant $0.60 [m/s]$, qui pour rappel est la vitesse maximale mesurée sur le modèle réduit. Ce résultat peut être confirmé par les études de la littérature dont les données sont rappelées au Tableau [3.6].

Remarquons que la vitesse critique de croisière des anguillettes s'approche de $0.15 [m/s]$. Cette valeur pourrait être légèrement réévaluée à la hausse en se basant sur la littérature citée. Cependant, cela signifie que l'anguille a besoin de zones de recirculation avec des vitesses très faibles non seulement afin d'éviter de se fatiguer mais également pour imaginer une possible remontée de la passe à bassins. Des modifications du modèle réduit sont donc nécessaires afin de garantir des zones de repos aux anguilles.

5.1.3 Bien-être animal

Lorsqu'un travail scientifique met en jeu des organismes vivants tels que des animaux, de nombreuses inconnues s'ajoutent à celles déjà présentes. Dans ce cas-ci, certaines imprécisions liées au modèle réduit sont inévitables. C'est le cas notamment des lois de similitudes appliquées pour le vivant (voir section [4.2.3]). Dès lors, il est primordial de fournir les meilleures conditions possibles à l'animal afin que celui-ci se comporte de manière identique à son milieu naturel. Un manque de vivacité, un taux de mortalité trop élevé et un surplus de stress chez l'animal sont des paramètres qui peuvent biaiser les résultats recherchés.

Au cœur de la présente étude, la question du bien-être animal est particulièrement relevante. En effet, dès que du matériel vivant est utilisé dans un cadre expérimental, il s'agira de le traiter de façon correcte d'un point de vue éthique. Différentes mesures ont été prises afin de garantir des conditions de manipulation et de détention acceptables. Les conseils prodigués par les responsables des piscicultures d'Erezée et d'Eindhoven ont été suivis le plus fidèlement possible. Un récapitulatif des dispositions mises en place est mentionné ci-dessous.

Marquage des poissons

Le matériel vivant utilisé a été marqué à l'aide de puces afin de pouvoir retracer leurs mouvements. Cette opération a été réalisée par des professionnels afin de limiter les risques

de blessures et d'infections (Figure [5.8]).



FIGURE 5.8 – Photo de l'opération d'insertion des PIT-tags réalisée sur des anguilles par des employés de l'Université de Liège.

Le protocole expérimental de marquage par PIT-tag (**P**assive **I**ntegrated **T**ransponder) est repris de manière détaillée à l'Annexe [B.7]. Lors de l'opération, les caractéristiques morphologiques du poisson (poids et longueur) sont relevées. La taille du poisson est mesurée à la précision du millimètre au moyen d'une règle graduée. Le poids est quant à lui déterminé par une balance électronique précise au dixième de gramme. A titre d'illustration, la pesée d'une anguille est montrée à la Figure [5.9]. Le recensement complet des caractéristiques des tacons est disponible à l'Annexe [B.3] et celui des anguilles à l'Annexe [B.4].



FIGURE 5.9 – Photo de la pesée des individus lors de leur marquage.

Influence du marquage sur le comportement du poisson

La technique de collecte des données se base sur une opération intrusive. En effet, le poisson est incisé afin d'y introduire une puce traçable par des antennes. Ce dispositif fait appel

à la technologie RFID détaillée à la section [5.2.1]. Ainsi, il est utile de savoir si l'ajout de cette puce aura une influence sur le comportement natatoire du poisson. Nous avons lu de manière approfondie la littérature traitant de cette problématique. De manière générale, il en ressort que le tag n'a pas d'influence sur le comportement natatoire du poisson.

Le marquage des poissons est pratiqué depuis la fin des années 1800. Il avait comme but de fournir des informations sur les caractéristiques des populations sauvages et d'élevage. A titre d'exemples, cela permettait d'obtenir des données sur les mouvements migratoires des individus, sur l'abondance des populations, sur l'âge et la croissance, sur la mortalité ou encore sur le comportement individuel des poissons (McFarlane and Wydoski, 1990; Lucas and Baras, 2000). Par ailleurs, le marquage a historiquement souvent été associé à des aspects négatifs : infections, croissance réduite, mortalité accrue et perte des tags (Nielsen, 1988; Dekker, 1989). Les progrès réalisés dans la technologie du marquage au cours des 20 dernières années ont toutefois permis d'améliorer les méthodes utilisées. C'est le cas des implants visibles en élastomères (Simon and Dörner, 2011), des étiquettes codées (Thomassen et al., 2000) et des tags électroniques (émetteurs et transpondeurs) (Lucas and Baras, 2000).

Les tags à transpondeur intégré passif (en anglais : **P**assive **I**ntegrated **T**ransponder (PIT)) sont considérés comme la méthode la plus appropriée pour marquer les poissons en raison de leur taux élevé de rétention et de survie chez le poisson tagué (Bolland et al., 2009; Hirt-Chabbert and Young, 2012). Ils ont été largement utilisés dans la recherche sur les poissons (Gibbons and Andrews, 2004). Néanmoins, on ne peut pas supposer que le PIT-tag convienne à toutes les espèces de poissons et à toutes les situations (Hirt-Chabbert and Young, 2012). Les effets du PIT-tag restent très variables, que cela soit sur la mortalité, sur le taux de croissance ou encore sur la conservation des marques (Hirt-Chabbert and Young, 2012).

Il est essentiel que les techniques de marquage n'affectent pas la croissance, la survie, le comportement ou la probabilité de capture des individus marqués (Mazel et al., 2013). Les effets dépendent de l'espèce, de la zone incisée, de la méthode d'insertion, du stade de vie et des circonstances environnementales (Jepsen et al., 2002; Dieterman and Hoxmeier, 2009; Cooke et al., 2011). La clé d'une étude de marquage réussie est la capacité à *attacher* le tag au poisson sans affecter négativement sa physiologie ou son comportement ni entraîner sa mortalité (Baras and Lagardère, 1995; Bridger and Booth, 2003; Rub et al., 2014).

Hirt-Chabbert and Young (2012) indiquent que l'incision au scalpel nécessite moins de temps de manipulation que l'injection. De plus, la profondeur de pénétration est mieux contrôlée. En général, l'incision chirurgicale entraîne un taux de survie et de rétention des tags plus élevé que les injecteurs manuels (Baras et al., 1999, 2000). Les résultats ont également confirmé des observations antérieures selon lesquelles l'incision du marquage par PIT-tag guérit bien dans un délai relativement court (Barbin Zydlewski et al., 2001; Larsen et al., 2013).

Dans le cas de l'anguille, l'utilisation d'une aiguille d'injection sur l'anguille américaine (*Anguilla rostrata*) peut augmenter le risque de mortalité en raison des dommages potentiels portés aux organes internes (Zimmerman and Welsh, 2008). Dans le cas du saumon, bien que les taux de perte de tag aient été relativement faibles dans tous les traitements, l'incision a mieux cicatrisé pour les marquages avec implantation chirurgicale au moyen

d'un scalpel (PIT-tag = 100%) (Huusko et al., 2016).

Bien que la fermeture de l'incision par suture après l'implantation d'un PIT-tag de 23 [mm] ait eu un impact positif sur la croissance des poissons de moins de 100 [mm], Larsen et al. (2013) déconseillent leur utilisation en raison des taux élevés d'infection fongique repérée autour de la zone d'incision.

Il a été démontré à plusieurs reprises que le PIT-tag n'a aucun effet sur la croissance, le comportement ou les migrations des poissons, à condition que la taille minimale raisonnable du poisson marqué soit respectée (Prentice, 1990; Baras et al., 2000; Ostrand et al., 2011; Hühn et al., 2014). Hirt-Chabbert and Young (2012) ont montré qu'il n'y a pas eu de différences significatives dans la masse corporelle, la longueur totale, le taux de croissance spécifique et la survie entre les anguilles *A. australis* marquées (avec PIT-tag) et non marquées dans un essai en laboratoire de 108 jours. Cette méthode de marquage était très efficace, avec une rétention de plus de 95% (Hirt-Chabbert and Young, 2012).

Matondo and Ovidio (2018) indiquent tout de même que la mortalité due à la manipulation et le rejet des PIT-tags par les anguilles jaunes pourraient être plus importantes sur le terrain qu'en captivité. En effet, une rétention parfaite (100% des anguilles taguées) du tag et la survie de l'ensemble du lot ont été observées lors des tests. A l'inverse, Laffaille et al. (2005) ont rapporté que 14% des tags ont été rejetés dans l'heure suivant le marquage lors de leurs essais. Néanmoins, le taux de perte de tags supplémentaires était faible (Feunteun et al., 2000; Baisez, 2001).

En outre, Mazel et al. (2013) ont observé une différence de plus de 50% entre la croissance des anguilles jaunes marquées (avec PIT-tag) et non marquées. Cette faible croissance semble s'opérer sur le long terme et ne serait donc pas due à l'opération elle-même. En effet, les anguilles recapturées entre 1 et 11 ans après le marquage affichent les mêmes taux de croissance réduits. En revanche, il n'a pas été prouvé que cette faible croissance soit nécessairement liée à la procédure invasive de la méthodologie de marquage PIT.

Huusko et al. (2016) indiquent que lors des traitements avec des étiquettes externes, les zones d'insertion des tags étaient souvent enflammées. Il semblerait que les tags en forme d'antennes, qui bougent lorsque le poisson nage ou se maintient en position opposée au courant d'eau, peuvent ralentir la cicatrisation de la zone d'insertion (Jepsen et al., 2008).

Formation

Avant de manipuler tout individu vivant, une formation élémentaire de technicien animalier a été suivie dans le but d'appliquer les règles de bien-être animal. Celle-ci a été suivie dans les locaux de la faculté de médecine de l'UCLouvain à Bruxelles. La formation comprenait une base théorique des gestes à adopter lors du traitement d'animaux vivants. Les attestations certifiées par les responsables de la formation sont jointes en annexe (Annexe [B.5]).

Capture

La première étape concerne la capture des individus. Les poissons employés durant les expérimentations provenaient de piscicultures spécifiques suivant l'espèce. La pisciculture d'Erezée pour les jeunes saumons et la pisciculture d'Eindhoven pour les anguillettes. Ils n'ont donc pas été pêchés dans leur milieu naturel. Les tacons comme les anguilles ont été pêchés à l'aide d'une épuisette. L'opération a été effectuée par des techniciens expérimentés locaux afin de limiter tout risque de lésion ou de dommage.

Transport

Capturés, les poissons ont été transportés de leur lieu d'élevage au hall d'expérimentations de Châtelet. Les jeunes saumons ont été placés dans des sacs plastiques de transport hermétiques (Figure [5.10-a]). De l'oxygène sous pression était ajouté à raison de deux volumes de gaz pour un volume d'eau afin de fournir un taux d'oxygène suffisant tout au long du trajet. Les sacs étaient placés de façon horizontale afin de garantir une surface d'échange maximale entre l'oxygène et l'eau. Ils étaient également doublés par prévention et fermés à l'aide de colsons. Le transport entre Erezée et Châtelet s'est fait en voiture et a duré environ 90 minutes.



FIGURE 5.10 – Moyens utilisés pour le transport des poissons. (a) sac de transport (b) cuve de transport.

Les anguilles ont quant à elles été transportées dans une cuve de transport (Figure [5.10-b]). Le trajet entre la pisciculture d'Eindhoven et le hall d'essais s'est fait en voiture. Il a approximativement duré deux heures. Aucune mortalité n'a été déplorée dans le premier cas comme dans le second.

Acclimatation

Une fois les poissons arrivés au hall d'essais, le changement de milieu peut s'exécuter en accordant une attention particulière à la différence de température. Afin de ne pas provoquer de choc thermique, les poissons ne sont pas plongés directement dans les bacs de stockage. Toujours conditionnés dans les sacs de transport, ils sont d'abord posés dans un bac rempli d'eau du modèle. Cela permet d'équilibrer la température entre l'eau de transport et l'eau de Châtelet.

Ensuite, un volume d'eau du modèle réduit de Châtelet est ajouté de façon progressive et à intervalles réguliers à l'eau provenant de la pisciculture. Cette étape est nécessaire afin d'acclimater l'individu aux propriétés physico-chimiques d'un autre milieu que celui de son élevage.

Stockage

Les poissons présents dans le modèle au moment des expériences sont introduits par lots prédéfinis. Les autres poissons sont entreposés dans des grands bacs d'un volume proche de 500 litres remplis aux trois quarts (Figure [5.11-a]). Chaque lot d'expériences est conditionné dans un bac spécifique pour un total de quatre lots répartis dans quatre bacs. Chaque bac est alimenté à l'aide d'une pompe à air et d'un bulleur. Cela permet de maintenir un taux d'oxygène dissous suffisant dans l'eau. Les bacs étaient recouverts afin d'éviter qu'un individu ne parvienne à s'échapper (en sautant pour les saumons et en rampant sur les parois pour les anguilles).

L'eau des bacs a été changée régulièrement afin d'assurer une hygiène suffisante. Tous les deux à trois jours, un volume d'eau usée était pompé et remplacé par un volume d'eau du modèle à la même température. De cette façon, une quantité minimale de dépôts était présente dans l'eau et celle-ci gardait une bonne transparence, indicateur de propreté. Il est à noter que le bac n'était pas vidé au-delà du tiers de sa capacité afin de ne pas provoquer de stress inutile chez les poissons.



FIGURE 5.11 – Exemple de cachettes utilisées pour le stockage des anguilles.

Concernant les anguilles, des cachettes supplémentaires ont été introduites dans les bacs de stockage. Ces cachettes étaient constituées de morceaux de tubes en PVC (Figure [5.11-b]) que les anguilles ont semblé apprécier dès leur installation dans les bacs. En effet, cette espèce étant lucifuge, il était nécessaire de pouvoir lui garantir des zones d'ombre afin de ne pas trop perturber son mode de vie.

A la suite des circonstances exceptionnelles liées à la pandémie de Covid-19, la cinquantaine d'anguilles utilisées pour le modèle simplifié de rampe étaient entreposées dans la cuve de transport. Des abris y étaient présents pour les mêmes raisons que celles expliquées au paragraphe précédent. Une pompe à filtre (Figure [5.10-b]) tournait en continu afin de maintenir une hygiène et un taux d'oxygène adéquats.

Température

Les conditions thermiques entre le lieu d'élevage et le lieu de détention variaient quelque peu. A la pisciculture d'Erezée, les tacons étaient maintenus dans des bassins dont la température avoisinait les 4 [°C]. Ceci permet de freiner le métabolisme des individus afin de pouvoir contrôler leur croissance et les reproductions. Ceci s'explique par le fait que la température corporelle du poisson s'adapte à son milieu, c'est un individu poïkilotherme. Au hall d'essais *André Sterling* à Châtelet, l'eau de la cuve qui permet d'alimenter le modèle réduit était située aux alentours de 15 – 16 [°C] durant la totalité des expériences du mois de décembre. Compte tenu de la capacité de la cuve et des outils mis à disposition, il n'a pas été possible de modifier ce paramètre tout au long des expérimentations.

Concernant les anguilles, la température d'élevage était bien plus élevée et tournait autour de 25 [°C]. Cela s'explique non seulement par le fait que cette espèce nécessite de façon générale des températures plus élevées mais également par la volonté d'accélérer leur métabolisme. En effet, le but de la ferme d'élevage d'Eindhoven étant de produire des anguilles pour la consommation humaine, accélérer la croissance permet d'atteindre des rendements supérieurs. Au moment des expériences, la température de l'eau de Châtelet était tombée à 12 – 13 [°C]. Cette température assez basse ralentit le métabolisme des anguilles qui entrent dans une forme d'hibernation. En raison de l'interdiction d'accéder au lot d'anguilles durant la pandémie de Covid-19, ce ralentissement n'a pas été problématique et leur a permis d'économiser leur énergie. Au contraire, le lot de 50 anguilles qui a pris part aux expériences menées sur le modèle simplifié de rampe a été stocké à une température ambiante tournant autour de 19 – 20 [°C] (Figure [6.13]). Il s'agit de la température de la pièce où les anguilles étaient entreposées.

Paramètres physico-chimiques de l'eau

Les principales propriétés physico-chimiques de l'eau du modèle sont indiquées au Tableau [5.5]. Ces paramètres proviennent de l'analyse la plus récente effectuée au mois d'avril 2019 par l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP). Ils sont comparés aux normes imposées pour la Directive 2006/44/CE du Parlement Européen et du Conseil datant du 6 septembre 2006 pour la qualité des eaux douces (UE, 2006). Cette directive est un bon indicateur de qualité des eaux et d'accueil des poissons par la même occasion. Le principal point d'attention est la quantité d'oxygène présent dans l'eau. Afin de ne pas prendre de risque sur cette quantité d'oxygène, chaque poisson gardé en captivité avait accès à un apport continu d'oxygène alimenté par une pompe à air.

Paramètre	O ₂ dissous [mg/L]	O ₂ dissous [%]	pH [–]	DBO ₅ [mg/L]	P total [mg/L]	Nitrites [mg/L]	Hydro- carbures [mg/L]
Mesure	10.23	102.3	8.53	< 3	< 0.06	< 0.003	< 0.1
Norme	≈ 9	≈ 100	6 – 9	≤ 3	/	≤ 0.01	/

TABLE 5.5 – Paramètres physico-chimiques de l'eau de Châtelet.

L'analyse effectuée a également montré qu'aucune trace d'éléments microbiologiques (coliformes, *Escherichia coli*, salmonelles, etc.) n'a été détectée. Ceci témoigne d'un risque

d'infection minime voire inexistant des poissons par l'eau de Châtelet. Les résultats complets de l'analyse sont présentés en annexe (Annexe [B.8]).

Nourrissage

Il avait été décidé de ne pas nourrir les saumons juvéniles durant la durée des expériences pour des raisons pratiques. D'une part, le hall d'essais n'est a priori pas adapté à entreposer du matériel vivant durant de longues périodes. D'autre part, comme les saumons étaient stockés à des températures relativement faibles, cela ralentissait leur métabolisme et diminuait leur demande d'énergie. Enfin, la durée d'un mois d'essais opérés est une période durant laquelle les tacons sont capables de jeûner sans risque de mortalité.

Pour les anguilles, la décision inverse avait été prise puisque la perte de biomasse constatée chez les tacons n'était pas négligeable. Les anguilles demeurant à Châtelet n'ont pas été nourries compte tenu de leur baisse d'activité physique et de l'interdiction d'accès forcée par les conditions sanitaires strictes. En revanche, le lot d'anguilles qui a participé aux remontées de la rampe a été nourri de façon régulière. La nourriture donnée consistait en un mélange de protéines, d'acides aminés, d'acides gras, de vitamines et de nutriments divers appelé Dan-ex 0.8 et produit par la société danoise Biomar (Annexe [B.6]). Il s'agit du mélange utilisé par Rijpelaal B. V., la ferme d'élevage d'où elles provenaient.

Fin des expériences

Quand les essais sont arrivés à leur terme, les poissons ont pu quitter le hall d'essais. Les saumons restants ont été ramenés à la pisciculture d'Erezée d'où ils provenaient. Les anguilles ont quant à elles été ramenées au hall d'essais afin d'entreprendre les essais initialement prévus sur l'adaptation d'une passe à bassins. Ces travaux seront dirigés ultérieurement par Gil Zorzan.

Mortalité

Un indicateur évident du bien-être des poissons est le taux de mortalité constaté tout au long des expériences menées. Un taux de mortalité élevé a été constaté chez les saumons tandis qu'un taux de mortalité faible a été observé chez les anguillettes. Concernant la mortalité élevée des saumons, plusieurs causes peuvent être avancées.

Premièrement, un certain nombre de saumons est parvenu à s'échapper des bacs au tout début des expériences. Des mesures de protection avaient été prises en plaçant un film attaché avec des pinces par-dessus les bacs. Celui-ci n'était pas suffisant et il a été décidé de couvrir complètement les bacs par la suite. Aucun tacon n'a réussi à s'échapper à partir de ce moment et ce jusqu'à la fin des essais.

Deuxièmement, un grand nombre de saumons est parvenu à smoltifier. Ce changement morphologique (détaillé à la section [3.4.1]) prépare le saumon à sa vie en mer et ce stade biologique nécessite donc des conditions d'eau différentes. En effet, la photopériode imposée durant les essais se rapprochait de celle des mois de printemps, période à laquelle les saumons réalisent leur processus de smoltification. De plus, la salinité souhaitée par le saumon à ce moment n'est pas celle qui était présente à Châtelet.

Enfin, malgré les précautions prises, un certain nombre de poissons ont disparu au cours des expériences (échappés par les orifices et recoins du modèle) ou sont morts pour des causes diverses : stress provoqué lors du transport, infection au niveau de l'incision du tag, fragilité au milieu due à l'immunodépression de certains individus, etc. Le Tableau [5.6] reprend de manière sommaire les mortalités recensées au cours de la totalité des expériences.

Saumons	Nombre	Echappés	Disparus	Morts	Vivants
Test	6	0	0	2	4
Expériences	200	32	16	57	95

Anguilles	Nombre	Echappées	Disparues	Mortes	Vivantes
Test	20	0	0	3	17
Expériences	250	0	0	2	248

TABLE 5.6 – Recensement des mortalités constatées au cours de l'ensemble des essais.

5.2 Matériel logistique

5.2.1 Matériel d'acquisition des données

Matériel RFID

Le matériel d'acquisition des données utilisé pour les saumons a été fourni par la branche Electronic Identification de la firme néerlandaise Dorset. Cette compagnie est spécialisée dans le traçage électronique des animaux d'élevage. Afin de recenser les mouvements des poissons au sein du modèle réduit, la technologie RFID (**R**adio **F**requency **I**Dentification) a été utilisée. Cette dernière permet d'enregistrer les mouvements des poissons à l'aide d'un dispositif électronique. Le poisson marqué est détecté à chaque passage au travers d'une antenne.

Les puces, préalablement insérées dans les poissons, permettent de comptabiliser les allées et venues des spécimens étudiés. Ce type d'outil possède de nombreux avantages. D'une part, il fournit un suivi individuel. D'autre part, il permet d'évaluer les mouvements d'un poisson sur une plus longue période sans besoin d'un suivi caméra. Enfin, il est capable d'obtenir des résultats de nuit, là où le suivi caméra commence à montrer ses limites.

Dans la mesure où l'étude s'attarde non seulement sur l'influence de l'éclairement mais également sur une espèce nocturne, le choix de cette technologie prend tout son sens. Elle permet d'étudier à la fois l'attractivité et la franchissabilité de la passe de jour comme de nuit. En effet, le parcours de chaque individu peut être retracé en collectant la chronologie des détections au sein du modèle réduit.

Le matériel d'acquisition des données se compose de trois éléments : des tags, des antennes de détection et un système d'enregistrement composé de cinq boîtiers distincts (Figure [5.12]). Les puces proviennent de la société britannique Trovan et sont lisibles par les antennes LID650 fournies par Dorset. Chaque puce possède un identifiant qui lui est

propre. Les antennes sont à spires multiples, elles sont au nombre de huit et fonctionnent par paire. Chaque couple d'antennes est relié à un boîtier qui collecte les informations. Chacun des quatre boîtiers est lui-même relié au cinquième boîtier appelé *data-logger*. Il s'agit du boîtier central de collecte des informations. Il rassemble l'ensemble des données récupérées par chacun des boîtiers qui mémorisent quant à eux les renseignements obtenus par deux antennes spécifiques.



FIGURE 5.12 – Ensemble des cinq boîtiers composant le système d'acquisition des données RFID.

Le système RFID détecte le passage des puces au moyen d'un système électromagnétique. Chaque antenne émet des pulsations électromagnétiques en continu à intervalles réguliers, définis préalablement par l'utilisateur. Lorsque l'onde envoyée par l'antenne détecte dans ses abords la présence d'un PIT-tag (**P**assive **I**nformation **T**ransponder), le signal est réfléchi par la puce et renvoyé vers l'antenne d'où il provient. L'antenne envoie alors un autre signal dans le câble qui la relie au boîtier de collecte de données et l'information d'un passage à travers ladite antenne est mémorisé. A chaque détection, un signal sonore bref est émis par l'antenne concernée. Les tags utilisés sont des puces passives dans le sens où elles réfléchissent un signal et n'en émettent pas elles-mêmes.

Les dimensions des PIT-tags utilisés sont celles d'un cylindre de diamètre 1 [mm] et de longueur de 12 [mm]. Une représentation physique de la dimension d'une telle puce est illustrée à la Figure [5.13]. La taille des puces utilisées est adaptée à la longueur des poissons exploités durant les expériences. Des tests préliminaires ont été opérés sur des puces de taille inférieure (8 [mm]) mais le calibrage des antennes n'a pas permis de détecter les poissons de manière optimale. En effet, certains passages observés manifestement à l'œil nu n'ont pas été captés par l'antenne. Ceci s'explique en partie par la plus petite taille de la puce et le passage parfois trop rapide de certains poissons à travers ces dernières.



FIGURE 5.13 – Représentation physique de la taille d'un PIT-tag de 12 [mm] comparé à une pièce de monnaie (Courtois and Van Audenhaege, 2017).

Sept antennes ont été placées au droit des échancrures de la passe à bassins et une à l'entrée amont du canal d'attrait (Figure [5.14]). Cet emplacement n'a pas été choisi au hasard. D'une part, il permet d'être certain de détecter le passage du poisson puisque la seule possibilité pour lui de progresser dans la passe est d'emprunter les fentes verticales. D'autre part, la zone de détection de l'antenne étant réduite, il était opportun de placer celle-ci à un endroit où la largeur de la passe s'étrécissait localement.

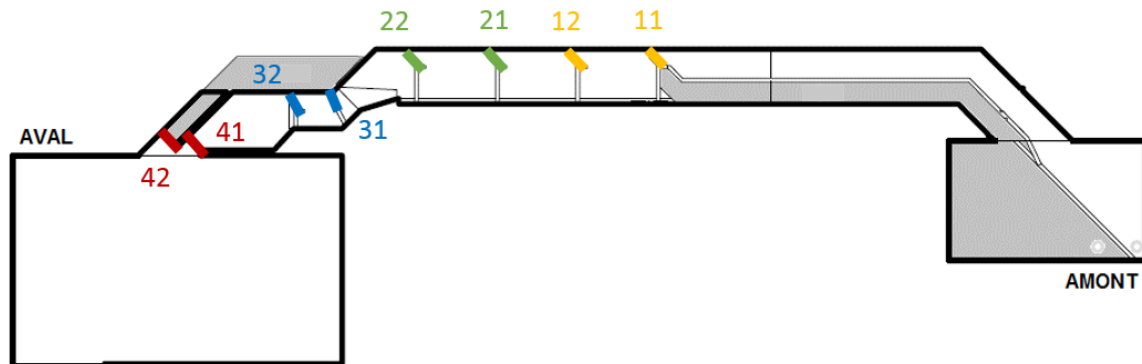


FIGURE 5.14 – Emplacement schématique des huit antennes fixées sur le modèle réduit (Chaque couleur correspond à une paire d'antennes reliées au même boîtier).

Enfin, cette position ne perturbe en aucun cas l'écoulement à surface libre de la passe. Les antennes sont placées dans les échancrures et fixées à l'aide de duct tape. Cette adaptation avait été opérée dans l'optique où des poissons de petit diamètre tels que les anguilles puissent se faufiler derrière l'antenne et s'y réfugier. Une représentation photographique d'une antenne au droit d'une échancrure est reprise à la Figure [5.15].

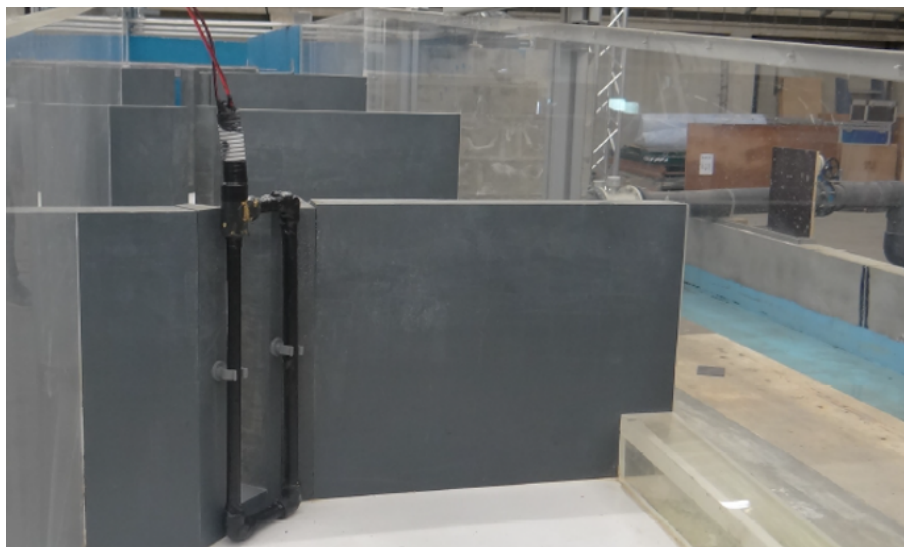


FIGURE 5.15 – Disposition physique d'une antenne aux abords d'une fente verticale du modèle réduit (Courtois and Van Audenhaege, 2017).

Les données collectées sont enregistrées dans le boîtier principal (*data-logger*). Les résultats sont enregistrés sous la forme d'un fichier CSV qui peut être converti en fichier adaptable de tableau. Les variables reprises dans ce fichier se présentent sous forme de tableau illustré à la Figure [5.16]. Elles reprennent plusieurs éléments dont ceux

indispensables à l'interprétation des résultats : la date du passage, l'heure du passage, le numéro de l'antenne concernée et le numéro du PIT-tag.

Identifiant	Date	Time	Unit number	Antenna number	Transponder type	Transponder code	Weight	Input status	Output status	Event	GPS coordinates
502	06-12-19	17:14:19	42	-	Trovan Unique	0007BCA9AD	-	0	0	-	

FIGURE 5.16 – Exemple de sortie d'un fichier CSV des données collectées par le système RFID.

Ainsi, au moyen de ces données, le trajet de chaque individu peut être retracé dans le temps. A noter que la sensibilité des antennes a été réglée de façon optimale. Cela n'empêche pas le système d'avoir certaines limites liées au calibrage des antennes. Il n'est par exemple pas rare de constater deux passages du même individu, à la même heure, à la même antenne. Ceci s'explique par la fréquence des signaux envoyés par l'antenne. Il est donc suggéré implicitement à la personne qui analyse les résultats que ce type de passage corresponde à un passage unique.

Système d'enregistrement vidéo

Concernant la deuxième problématique consacrée aux anguilles, le système d'acquisition des données RFID n'a pas été réutilisé. En effet, en raison des conditions sanitaires imposées par la pandémie de Covid-19, les expériences ont été réalisées sur un modèle simplifié de rampe à anguilles. Celui-ci a été élaboré dans des conditions relativement rudimentaires dans une pièce de vie non destinée à accueillir un modèle réduit de rampe à anguilles. Le comportement des anguilles a été filmé au moyen d'enregistrements vidéo.

Le système de caméra utilisé est une caméra *Canon EOS 200D* (Figure [5.17-a]). Celle-ci a été positionnée en hauteur dans un boîte en bois afin de garantir une image nette et fixe (Figure [5.17-b]). Les enregistrements ont permis de compléter les observations visuelles déjà faites au moment des expériences.



FIGURE 5.17 – Système d'enregistrement vidéo. (a) caméra (b) système de support.

5.2.2 Matériel d'éclairage

Isolation du modèle réduit

Le modèle réduit de la passe à poissons a été isolé des paramètres extérieurs du hall d'essais de Châtelet. Pour ce faire, le modèle a été complètement bâché (Figure [5.18]). Ces dispositions ont été prises pour différentes raisons. Tout d'abord, isoler le modèle d'expérimentations de la luminosité extérieure permet d'assurer un éclairage régulier et contrôlé. En effet, la première problématique s'occupe d'analyser l'effet éventuel de l'ombrage sur la remontée des individus. Ensuite, le fait de fermer le modèle empêche le poisson d'être stressé durant les essais. Les parois de la passe étant composées de plexiglass transparent, le passage d'un technicien pourrait angoisser ou perturber le comportement des poissons. Ceci doit être évité afin de ne pas risquer de biaiser les résultats en modifiant les hypothèses de départ ou les conditions d'essais.



FIGURE 5.18 – Vue extérieure du modèle réduit protégé de la luminosité extérieure par une bâche.

Lampes utilisées

Le modèle réduit est éclairé au moyen de cinq lampes LED dirigées vers le haut. Celles-ci sont attachées au cadre métallique qui délimite et surplombe l'ensemble du modèle. Ce type d'éclairage est qualifié d'indirect, il agit par diffusion. Cette méthode d'installation a pour but de ne pas éblouir les poissons. La situation des cinq lampes par rapport au modèle réduit est illustrée à la Figure [5.19].

Simulation de la lumière naturelle

Afin de simuler des conditions d'éclairage les plus proches possibles d'un éclairage naturel, un système d'allumage et d'extinction automatique des lampes a été configuré. Un déclenchement progressif des lampes a été programmé par le logiciel LOGO! de la société allemande Siemens. Ce programme utilise la programmation filaire. Il permet de simuler de façon approchée l'aurore et le crépuscule d'un cycle circadien.

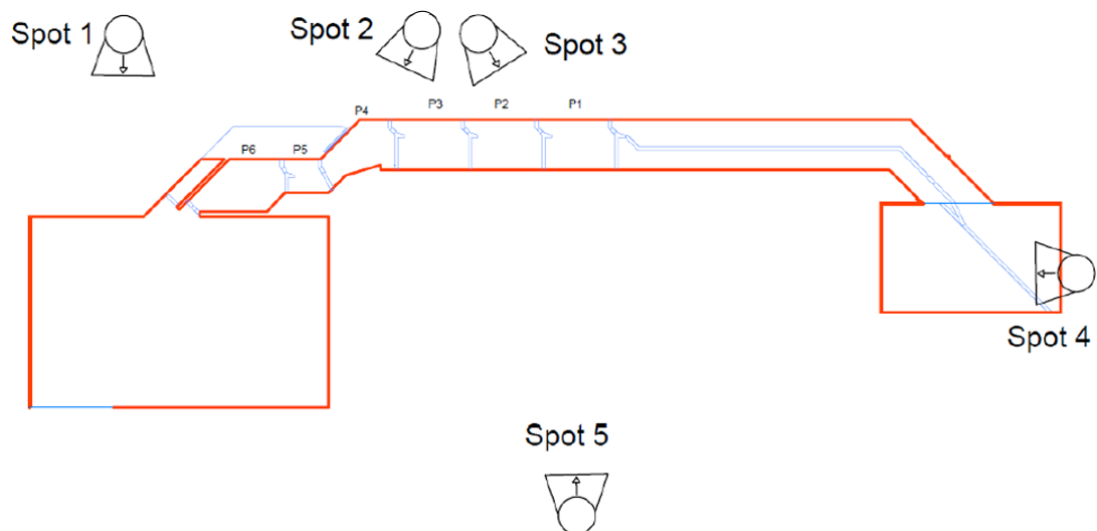


FIGURE 5.19 – Positionnement des cinq spots placés autour du modèle réduit. L’amont est à droite.

La photopériode choisie était celle de l’équinoxe de printemps avec des périodes de jour et de nuit égales. La séquence d’allumage qui modélisait le lever du soleil démarrait à 7h du matin avec le déclenchement de la première lampe. L’aurore était simulée sur une période de trente minutes afin que les cinq lampes soient allumées à 7h30. Cela signifie que chaque lampe s’allumait avec un intervalle de 7 [min] 30 [s] entre 7h et 7h30. Le phénomène inverse était opéré pour le crépuscule avec la première extinction à 19h et l’ensemble des lampes éteintes à 19h30. Le coucher du soleil était donc également simulé sur un intervalle de temps de trente minutes.

Mesures de lumière

Pour la question de l’influence de l’ombrage, des mesures d’éclairement ont été opérées à l’aide d’un luxmètre. Cet appareil mesure l’intensité lumineuse par unité de surface ($[cd \cdot sr/m^2]$). Son unité est le lux ($[lx]$). L’instrument est à la fois capable de recueillir les valeurs absolues extrêmes du spectre capté ainsi que sa valeur moyenne. Une illustration du luxmètre testo utilisé est montrée à la Figure [5.20].



FIGURE 5.20 – Illustration de l’appareil de mesure d’intensité lumineuse.

Dans le cas étudié, des valeurs moyennes ont été enregistrées pour chaque bassin de la passe à deux endroits extrêmes avec deux luxmètres différents. Cette reproductibilité des mesures permet d'uniformiser les résultats et d'éliminer les erreurs expérimentales qui pourraient survenir. Une moyenne des résultats a été effectuée pour chaque configuration analysée : dispositif brut, dispositif aux parois opacifiées et dispositif ombragé. Les résultats chiffrés de ces trois cas de figure sont présentés à la section [6.2.1].

Le dispositif qualifié de *brut* consiste en la passe sans aucune modification, avec ses parois transparentes. La configuration *opacifiée* change du modèle brut au niveau des parois de la passe. En effet, celles-ci ont été couvertes à l'aide de papier kraft et de duct tape. Enfin, le dispositif *ombragé* est basé sur le précédent avec un élément supplémentaire recouvrant le dessus de la passe : du film moustiquaire. Ce film a pour but de simuler l'effet d'un éventuel ombrage sur la passe à poissons. Des représentations imagées de ces trois dispositions sont visibles à la section [6.2.1].

5.2.3 Matériel de mesure de température

La mesure de température de l'eau du vivier de stockage et du modèle simplifié de rampe a été réalisé avec un thermomètre TP101 (Figure [5.21]).



FIGURE 5.21 – Photo du thermomètre utilisé pour les mesures de températures d'eau du modèle simplifié de rampe et du vivier de stockage.

5.2.4 Matériel hydraulique

Débitmètre

Les valeurs des débits qui circulent dans le modèle réduit sont recensées en continu par un débitmètre de la marque suisse-suédoise ABB. Deux valeurs numériques sont collectées et affichées en permanence. Une des deux valeurs correspond au débit circulant dans la passe elle-même. Sa valeur oscille aux alentours des 8 $[L/s]$, ce qui correspond aux valeurs prescrites au départ par les règles de similitudes (Tableau [4.4]). Le débit d'attrait quant à lui fluctue aux alentours de 30 $[L/s]$.

Pompe (Châtelet)

L'eau qui circule dans le modèle réduit provient de la cuve en béton située sous le hall d'essais. Celle-ci possède une capacité totale de 3000 $[L]$ mais la contenance actuelle est plus proche des 1500 $[L]$. Cette eau est mise en mouvement continu dans la passe au moyen d'une pompe à variateur de fréquences de la marque hollandaise Stork. Cette

dernière est reliée à une conduite principale, elle-même subdivisée en deux conduites qui alimentent respectivement la passe et le canal d'attrait. Le débit est adapté au moyen de vannes papillons.

Pompe du modèle simplifié de rampe à anguilles

L'eau circulant dans le modèle simplifié de rampe provient du réseau de distribution. Elle a servi à remplir la cuve aval d'une capacité utilisable de 60 [L]. Cette eau est pompée via une pompe de la marque ESPA (modèle : PISCIS2-M) à fréquence fixe (Figure [5.22]). Ensuite, un système de bypass doté d'une vanne (Figure [4.19]) permet de réguler le débit amont. Ce dernier peut varier entre 0.45 [L/s] et 1.5 [L/s].



FIGURE 5.22 – Photo de la pompe utilisée dans le modèle simplifié de rampe à anguilles.

Chapitre 6

Méthodes

6.1 Buts recherchés

Ce chapitre reprendra de manière détaillée les méthodes qui ont été suivies afin de mener à bien les expérimentations. Chaque protocole sera expliqué, commenté et illustré. Une analyse critique du travail expérimental complètera ce chapitre. Pour rappel, les problématiques étudiées sont l'ombrage, l'adaptation d'une passe à bassins à l'anguille et l'influence des pentes sur une rampe à anguilles.

L'influence de l'ombrage sur une passe à poissons est un paramètre qui n'est pas encore très documenté dans la littérature. Cependant, comme les passes à poissons ont déjà prouvé leur efficacité dans le processus de restauration de la continuité écologique, il est possible de se pencher sur les facteurs qui pourraient améliorer leur fonctionnement. Lorsqu'il est question de faire progresser l'efficacité d'un tel ouvrage, ce sont l'attractivité et la capacité de franchissement qui sont évaluées. Dans ce cadre, les remontées effectuées en journée sont notamment mises en avant.

En effet, la prédation ailée reste un danger pour les poissons lorsqu'ils s'engagent dans une passe. En raison de l'effort qu'un tel déplacement nécessite, il ne faudrait pas qu'un individu se rende encore plus vulnérable. C'est pourquoi notre travail se penche sur l'ajout d'un dispositif d'ombrage au-dessus d'un ouvrage de franchissement. L'objectif est de vérifier si l'ombrage favorise les remontées en journée en procurant au poisson un effet de protection supplémentaire contre les dangers qui le guettent. Le matériel vivant utilisé est le saumon atlantique en raison de ses qualités de très bon nageur.

Nous avons précédemment indiqué que plusieurs types de passes à poissons existent suivant les caractéristiques morphologiques, natatoires et migratoires des espèces. La volonté d'améliorer l'efficacité de la passe de Rivière trouve son origine dans une campagne visant à réintroduire le saumon atlantique dans le bassin mosan. En effet, les travaux réalisés sur base de son modèle réduit ont montré que celle-ci pouvait convenir à différentes espèces. Des modifications du revêtement, au moyen de substrats de fond, ont même révélé que la remontée des espèces benthiques tel que le chabot était envisageable. La poursuite de ces travaux aux résultats encourageants a semblé évidente et c'est pourquoi l'anguille est apparue comme une espèce de fond qui méritait une étude particulière.

Les anguilles sont des poissons aux capacités de nage très faibles en raison de leur

morphologie. Habituellement, des passes et rampes spécifiques leur sont consacrées. Leur dimensionnement est élaboré de manière à valoriser les rugosités de fond afin de profiter des capacités de reptation de l’anguille. Comme l’utilisation d’un substrat de fond s’est révélée convaincante pour les chabots, repartir des conclusions tirées semblait être une bonne base de départ pour la remontée des anguilles dans une passe à bassins. L’observation de ces dernières lors de tests préalables permettrait de déterminer quelles aides supplémentaires seraient nécessaires afin qu’elles puissent franchir les différents bassins. Ce travail visait donc à considérer la possibilité d’utilisation d’une passe à bassins adaptée à l’anguille.

En raison de l’interdiction d’accès au laboratoire et donc au modèle réduit entre les mois de mars et de mai, un nouvel objectif a dû être imaginé. En utilisant les anguilles disponibles, des expériences ont été menées sur un modèle simplifié visant à étudier l’effet des pentes longitudinale et transversale d’une rampe à anguilles. Cet aspect vise à valider de manière expérimentale les rampes à anguilles existantes sur la Meuse. Dans un contexte plus large, cette étude permet également de rapporter des observations comportementales d’une anguille dans un tel dispositif de franchissement.

6.2 Protocoles d’essais

6.2.1 Protocole d’essai de l’influence de l’ombrage

Ce premier protocole traite de la problématique de l’ombrage qui s’est opérée sur le modèle réduit au moyen de jeunes tacons provenant de la pisciculture d’Erezée.

Essais préliminaires

En préambule des expériences, des tests préliminaires ont été opérés. Ils visaient à définir la taille du PIT-tag à utiliser pour l’ensemble des essais sur l’ombrage. Le calibrage des antennes avait été défini et configuré de façon à être le plus précis possible. L’objectif était d’éviter toute perte d’information au niveau des détections de chaque poisson. Après avoir optimisé les antennes RFID, nous avons vérifié si des puces de taille inférieure pouvaient être insérées dans le matériel vivant.

Six tacons ont été marqués avec des tags de deux tailles différentes : trois avec des puces de 8 [mm] et trois avec des puces de 12 [mm]. Il est préférable, dans le cas d’une méthode intrusive, que la puce soit la moins handicapante possible pour le poisson. Une puce plus petite est donc privilégiée, même si pour la gamme de tailles de poissons utilisés, l’effet d’un tag de cette envergure ne change pas considérablement les choses (voir section [5.1.3]). Après avoir laissé quelques tacons dévaler la passe, nous avons noté que les puces de longueur inférieure n’ont pas été captées lors de leur passage sous chaque antenne. Dès lors, l’utilisation du PIT-tag de 12 [mm] a été choisie pour le marquage des 200 saumons juvéniles.

Trois conditions d’essais

Afin de pouvoir estimer l’effet d’un quelconque dispositif d’ombrage sur la montaison des poissons, il a fallu définir des conditions d’essais distinctes. Nous en avons retenu trois.

Le premier dispositif avait pour objectif de partir de la passe vierge sans modification notable. Ce dispositif, qualifié de **brut**, représente le témoin négatif qui servira de point de comparaison. Il s'agit du modèle réduit construit tel quel avec les parois transparentes en plexiglass. Tous les autres travaux effectués lors des années précédentes étaient basés sur cette configuration. Une image illustrant ce dispositif est montrée à la Figure [6.1].



FIGURE 6.1 – Cliché du modèle réduit dans sa configuration brute.

Le deuxième cas considéré est une configuration où les parois de la passe ont été couvertes de papier kraft opaque. C'est pour cette raison que le dispositif a été qualifié d'**opacifié**. Cette configuration tente de rendre compte des conditions naturelles de la passe à poissons de Rivière. En effet, les parois en béton du modèle réel sont opaques et ne laissent pas traverser la lumière contrairement aux cloisons en plexiglass du modèle réduit. Afin de bloquer cet apport de lumière, du papier kraft a été utilisé pour ses propriétés occultantes et sa facilité de mise en œuvre. Ce deuxième cas de figure vise à se rapprocher de manière plus correcte des conditions réelles d'éclairement de la passe. Une représentation du modèle réduit doté de ce dispositif est visible à la Figure [6.2].

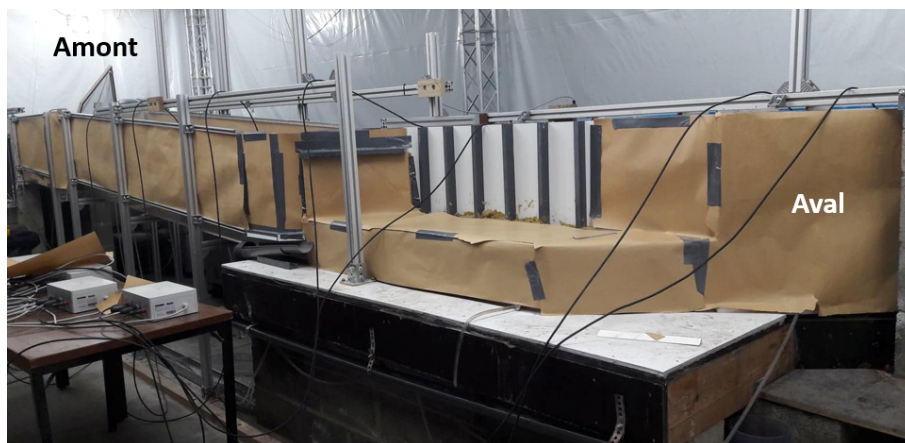


FIGURE 6.2 – Cliché du modèle réduit dans sa configuration opaque.

Le troisième type de conditions s'est attaché à simuler l'effet d'un ombrage sur l'ensemble des bassins de la passe. Pour ce faire, du film moustiquaire a été utilisé afin de recouvrir

l'ensemble de la passe. Il a été tendu au-dessus de celle-ci à l'aide de chevrons ou de duct tape lorsque cela s'avérait nécessaire. Le papier kraft qui était appliqué sur les parois extérieures pour le dispositif précédent n'a pas été enlevé pour cette dernière configuration. Cette modification a permis de rendre l'intérieur de la passe plus sombre et **ombragée**. Une illustration du film moustiquaire est présente à la Figure [6.3].

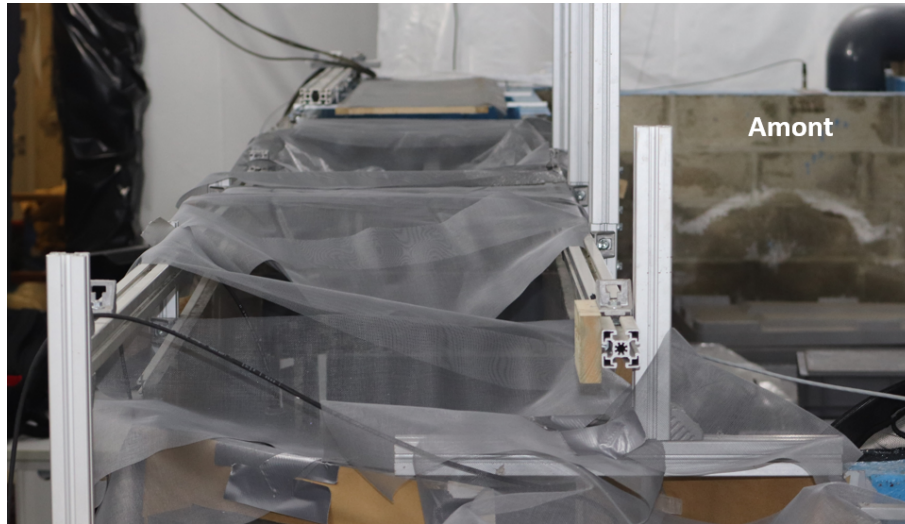


FIGURE 6.3 – Cliché du modèle réduit dans sa configuration ombragée.

Chaque condition d'essai a été testée à trois reprises. Cela comptabilise le nombre total d'expériences à 9. Les répliques de chaque expérience sous chacun des trois dispositifs visaient à éliminer le risque aléatoire. En effet, comme chaque lot est différent, le fait de reproduire les expériences permettait d'obtenir des résultats plus fiables d'un point de vue statistique. La façon dont les lots ont été formés et mélangés d'une expérimentation à l'autre est expliquée plus loin.

Conditions d'éclairement

Trois conditions d'éclairement ont dû être définies suivant les trois cas étudiés. Pour rappel, le cycle circadien choisi, et identique pour chaque condition, est défini à la section [5.2.2]. Il a fonctionné sans arrêt du début à la fin des expériences. Les mesures de luminosité ont été prises par bassins et moyennées sur l'ensemble de la passe. Des mesures plus intenses de lumière sont détectées lorsque la mesure est prise plus proche d'un spot lumineux. L'effet inverse survient aux positions éloignées de ces mêmes spots lumineux. Le bassin aval n'étant jamais recouvert, les mesures qui y ont été prises ne changent pas d'une configuration à l'autre. Une synthèse des résultats est présentée dans le Tableau [6.1]. Le détail complet des mesures est disponible en annexe (Annexe [C.1]). Ce dernier reprend l'endroit et la valeur de chaque mesure individuelle.

Dispositif	Brut	Opacifié	Ombragé
Moyenne	348 [lx]	243 [lx]	111 [lx]

TABLE 6.1 – Synthèse des mesures d'intensité lumineuses pour les trois configurations étudiées.

Points d'attention

Lors des expérimentations plusieurs paramètres ont nécessité une attention particulière :

- la **température** : celle-ci a été mesurée lors de chaque essai et n'a pas significativement varié d'une expérience à l'autre. Elle se situait entre 15 et 16 [°C]. Aucune prise n'était possible sur ce paramètre puisque le matériel à disposition ne permettait pas de contrôler la température d'un volume d'eau aussi conséquent que celui de la cuve du laboratoire de Châtelet.
- les **débits** : ces derniers ont été mesurés en permanence aussi bien pour l'écoulement de la passe que celui circulant dans le canal d'attrait. Les valeurs obtenues durant tous les essais sont rappelés à la section [5.2.4]. Le contrôle de ce paramètre est essentiel afin de respecter les lois d'échelles.
- le **dispositif anti-retour** : ce dernier a été placé à l'entrée du bac amont (Figure [6.4-a]) et vérifié lors de chaque expérience. Son but était de créer une sorte d'entonnoir (Figure [6.4-b]) afin de garder les poissons ayant réussi à remonter la passe à l'amont. En effet, pour éviter tout effet d'apprentissage de remontée qui viendrait perturber les résultats statistiques, ce dispositif a été placé peu avant l'entrée du bac amont. Des tubes en PVC (Figure [6.4-c]) ont été ajoutés aux bords des plaques métalliques qui le constitue pour écarter tout risque de lésion si un poisson venait à le heurter. Sa position dans la passe est visible en rose sur la vue en plan de la Figure [6.6].

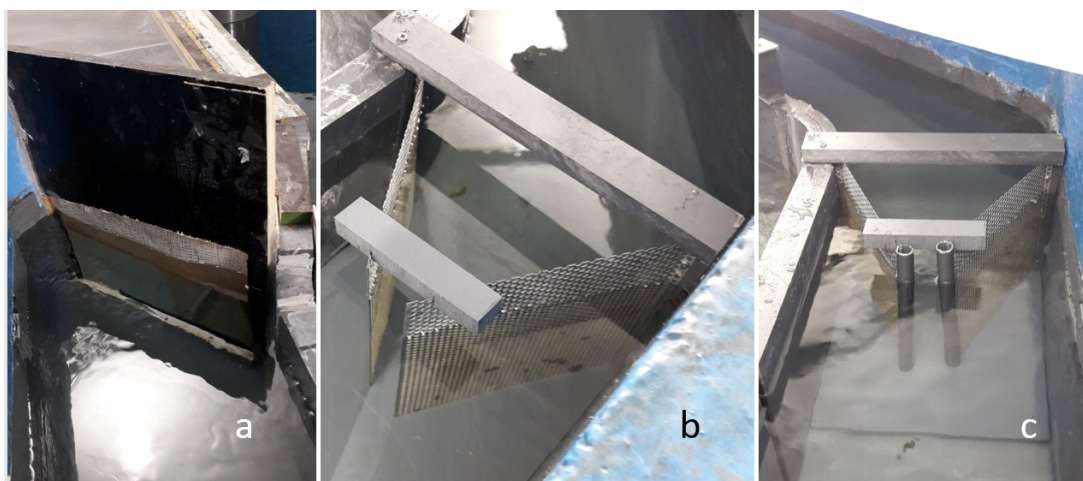


FIGURE 6.4 – Dispositif anti-retour utilisé à l'amont.

Matériel

Au cours des manipulations de confection des lots, de lancement et d'arrêt des expériences, le matériel suivant a été utilisé :

- deux épuisettes (une grande et une petite)
- deux seaux
- des bottes
- des bacs
- des caillebotis antidérapants
- une pompe dotée d'un tuyau d'arrosage
- un escabeau

Confection des lots

200 tacons ont été récupérés à la pisciculture d'Erezée afin de former quatre lots de 50 individus. Chaque expérience devait se réaliser en testant l'attractivité, la franchissabilité et le comportement des poissons pour chaque dispositif d'ombrage. 50 tacons étaient introduits simultanément par expérience dans le modèle réduit. Trois lots étaient destinés aux expérimentations mêmes tandis que le quatrième lot constituait un vivier de réserve destiné à remplacer un individu en cas de mortalité.

Afin de ne pas habituer les poissons au rythme des expériences et à l'ordre des dispositifs, ceux-ci ont été changés lors de chaque test successif. Par conséquent, chaque dispositif était alterné et changé entre chaque expérience selon l'ordre établi ci-dessous :

- Le **premier** test a été effectué sans modification extérieure de la passe, c'est-à-dire selon la configuration *brute*. C'est la condition d'essai **1**.
- Le **deuxième** test s'est déroulé dans les conditions du dispositif *opacifié*, avec l'ajout du papier kraft sur les parois des bassins. C'est la condition d'essai **2**.
- Le **troisième** test a été effectué dans les conditions de passe *ombragée* où de la moustiquaire a été rajoutée au dispositif précédent. C'est la condition d'essai **3**.

Cette suite logique s'est donc opérée trois fois pour un total de neuf expériences selon l'ordre : brut-opacifié-ombragé. Cette façon de procéder a permis d'empêcher le poisson de s'habituer à un des trois dispositifs et de modifier les conditions d'essais de façon optimisée. En effet, le papier kraft nécessaire au dispositif ombragé avait déjà été installé lors de la configuration précédente (dispositif opacifié).

Après avoir défini l'ordre des neuf expériences, il a fallu constituer les lots de chacune d'elles en s'assurant que tout poisson soit considéré comme une variable aléatoire à part entière. Les trois lots de 50 individus servant aux expériences ont été formés au hasard en supposant que la distribution de chaque lot soit suffisamment proche de l'ensemble de l'échantillon. Ils ont servi de base pour les trois premières expériences (1 à 3). A l'issue du premier tiers d'expérience, ces trois lots ont été remélangés pour former trois nouveaux lots qui ont servi aux trois expériences suivantes (4 à 6). Cette opération a été réalisée une seconde fois afin d'obtenir de nouveaux lots pour les trois dernières expériences (7 à 9). Ceci devait théoriquement permettre à chaque poisson de réaliser chaque type d'expérience (brut-opacifié-ombragé) dans un ordre qui pouvait différer.

En raison de la perte d'un grand nombre de tacons en début de tests, les lots ont été réduits de 50 à 40 individus pour les huit dernières expériences. Lorsqu'un poisson mourrait, celui-ci était remplacé par un poisson du lot de réserve. Cette façon de procéder permettait de considérer chaque poisson comme variable aléatoire indépendante. Un récapitulatif visuel de la formation des lots est résumé à la Figure [6.5].

D'un point de vue pratique, les trois lots destinés à chaque type de tests étaient formés avant chaque lancement d'expérience. Pour la première batterie d'expérimentations, les poissons ont été divisés par lot de 50 dans quatre bacs de stockage selon la division qui avait été faite par la pisciculture d'Erezée. En effet, chaque sac de transport comprenait 50 individus et cette répartition a été conservée. Lors du remélange des lots après trois expériences, chacun de ceux-ci était divisé en trois tiers afin de reformer un nouveau lot

de 40 individus. Typiquement, 13 poissons de chaque lot étaient pêchés et complétés par un individu provenant d'un lot choisi au hasard.

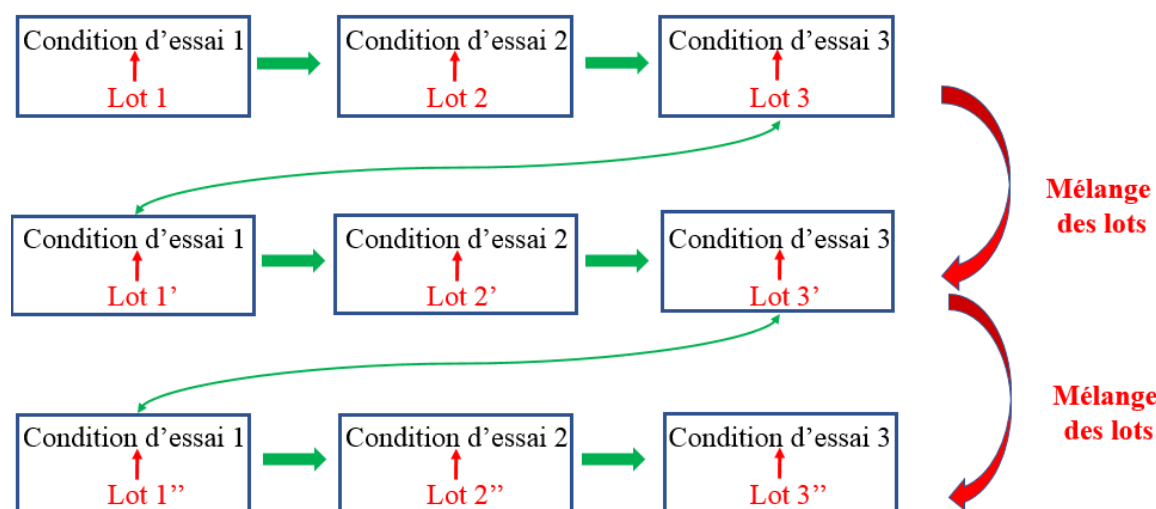


FIGURE 6.5 – Synthèse visuelle du déroulement des expériences menées sur l'ombrage.

Concernant l'identification des poissons qui constituaient un lot, ceux-ci étaient introduits à l'amont de la passe et poussés à dévaler. Ceci permettait d'identifier chaque individu avant d'effectuer chaque expérience. Cette méthode a été utilisée parce que le lecteur de puces portable était absent lors du démarrage des expériences. Les poissons qui avaient dévalé étaient ensuite repêchés dans le bassin aval et remis dans leur bac de stockage respectif. Ceci a permis de comptabiliser le nombre d'expériences réalisées pour chacun des 152 individus ayant participé aux tests (Tableau [6.2]). Un certain nombre de tacons a dû participer à quatre expériences en raison du nombre assez élevé d'individus morts durant la durée des tests.

Nombre d'expériences réalisées :	1	2	3	4
Nombre d'individus concernés :	31	38	69	14
Pourcentage :	20.4%	25.0%	45.4%	9.2%

Nombre moyen d'expériences :	2.43
-------------------------------------	------

TABLE 6.2 – Nombre moyen d'expériences effectué pour les tacons.

Manipulations

Les neuf expériences réalisées ont nécessité un ensemble de manipulations qui vont maintenant être décrites de façon chronologique. Le matériel utilisé pour mener à bien ces opérations est cité à la section [6.2.1].

— Protocole de lancement :

1. Le dispositif d'ombrage est placé si nécessaire. S'il s'agit du cas brut, le papier kraft et la moustiquaire sont enlevés. Dans le cas de la configuration opacifiée, la passe est recouverte de papier kraft préalablement découpé aux bonnes dimensions. Si l'expérience à effectuer est le cas ombragé, le film moustiquaire est placé au-dessus des bassins.

2. Le matériel de la passe est vérifié (antennes, échancrures, substrat) et les débris obstruant le dévers aval (en bleu clair sur la Figure [6.6]) aspirés pour éviter tout débordement.
3. La pompe est mise en marche afin de lancer l'écoulement dans la passe et l'accès au premier bassin du modèle est empêché à l'aide d'une plaque en moustiquaire (en rouge sur la Figure [6.6]).
4. Les lots sont établis préalablement et stockés dans des bacs (en bleu foncé sur la Figure [6.6]). Ensuite, les poissons formant un lot complet sont pêchés à l'aide d'une petite épuisette et placés délicatement dans un seau par groupe d'individus (généralement une dizaine).
5. Les poissons sont introduits par groupes dans le bac aval (en brun sur la Figure [6.6]) jusqu'à ce que le lot soit au complet.
6. Une fois que l'ensemble du lot est présent dans le bac aval, l'heure est notée et l'expérience lancée pour une durée de 48h. La pompe et le système d'éclairage adapté sur le cycle circadien préenregistré fonctionnent en continu.

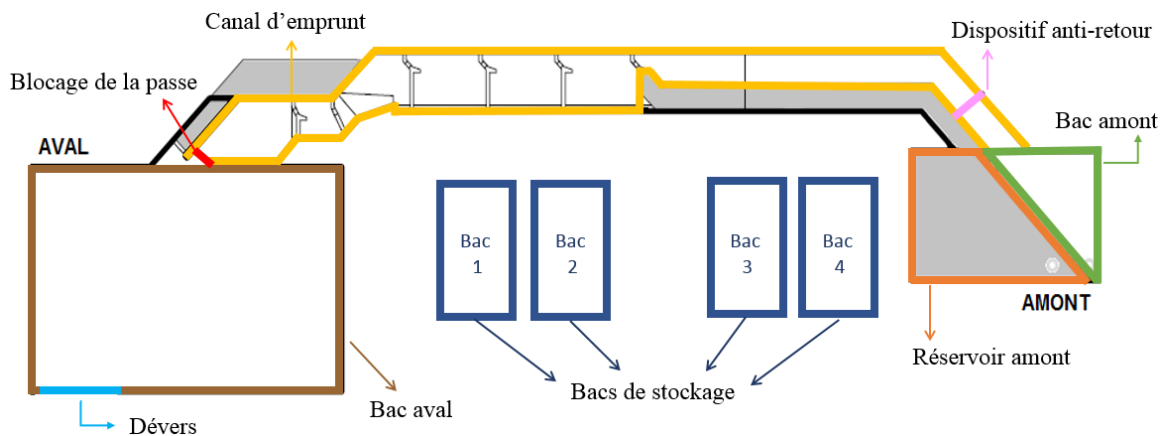


FIGURE 6.6 – Représentation en plan de la passe et des éléments utiles à la compréhension des manipulations réalisées.

— Protocole d'arrêt

1. Lorsque l'expérience est achevée, les poissons qui ont atteint le bac amont (en vert sur la Figure [6.6]) sont récupérés à l'aide d'une épuisette et remis dans leur bac de stockage.
2. Les poissons éventuellement situés dans la passe elle-même (en jaune sur la Figure [6.6]) sont encouragés à rejoindre le bac aval.
3. Lorsqu'il n'y a plus aucun individu dans la passe, son accès est coupé à l'aide de la plaque dotée d'un film moustiquaire.
4. La pompe est arrêtée et la vidange du bac aval et du réservoir amont (en orange sur la Figure [6.6]) est enclenchée afin de baisser le niveau d'eau et pouvoir accéder à l'intérieur du modèle (à l'aide de bottes).
5. Les poissons sont récupérés à l'aide de la plus grande épuisette, placés dans des seaux et remis délicatement dans leur bac de stockage.
6. Les poissons morts au cours de l'expérience sont pêchés et leurs puces récupérées.
7. L'expérience suivante peut être lancée selon le même protocole.

Durée des expériences

Un total de 9 expériences a été lancé durant le mois de décembre de l'année 2019. Un Tableau récapitulatif [6.3] reprend l'ensemble des dates et des heures de lancement de mesures pour chaque expérience.

Date Exp. 1 :	Début	06-12-19	Prise des résultats :	Début	06-12-19	Heure de lancement :	16h00
	Fin	11-12-19		Fin	11-12-19		
Date Exp. 2 :	Début	11-12-19	Prise des résultats :	Début	11-12-19	Heure de lancement :	10h30
	Fin	13-12-19		Fin	13-12-19		
Date Exp. 3 :	Début	13-12-19	Prise des résultats :	Début	13-12-19	Heure de lancement :	14h00
	Fin	16-12-19		Fin	15-12-19		
Date Exp. 4 :	Début	16-12-19	Prise des résultats :	Début	16-12-19	Heure de lancement :	12h00
	Fin	18-12-19		Fin	18-12-19		
Date Exp. 5 :	Début	18-12-19	Prise des résultats :	Début	18-12-19	Heure de lancement :	13h20
	Fin	20-12-19		Fin	20-12-19		
Date Exp. 6 :	Début	20-12-19	Prise des résultats :	Début	20-12-19	Heure de lancement :	15h15
	Fin	23-12-19		Fin	22-12-19		
Date Exp. 7 :	Début	23-12-19	Prise des résultats :	Début	23-12-19	Heure de lancement :	13h00
	Fin	27-12-19		Fin	25-12-19		
Date Exp. 8 :	Début	27-12-19	Prise des résultats :	Début	27-12-19	Heure de lancement :	11h00
	Fin	30-12-19		Fin	29-12-19		
Date Exp. 9 :	Début	30-12-19	Prise des résultats :	Début	30-12-19	Heure de lancement :	11h00
	Fin	02-01-20		Fin	01-01-20		

TABLE 6.3 – Dates des expériences effectuées sur l'effet de l'ombrage.

Chacune de ces expériences était répartie sur deux cycles circadiens avec une simulation automatique du lever et du coucher du soleil à l'aide de luminaires LED. La décision de prendre deux cycles circadiens s'est justifiée pour deux raisons. Tout d'abord, cela permettait de lancer chaque test à l'heure souhaitée puisque sur le total de l'expérience, la durée d'éclairement était identique. Ensuite, prendre deux cycles offraient une période suffisamment étendue pour collecter des résultats pertinents.

La prise de mesures des résultats débute dès le moment où l'accès à la passe est rendu possible. La prise des résultats comptabilisés pour le test s'arrête 48h après son lancement. Cependant, il n'a pas toujours été possible d'arrêter l'essai directement après 48h. En effet, l'accès au laboratoire n'était pas autorisé le samedi et le dimanche ainsi que les jours fériés (25 décembre et 1 janvier). Les résultats obtenus après deux cycles n'ont donc pas été retenus.

Interprétation des résultats

Afin de pouvoir calculer les taux d'attractivité et de franchissabilité ainsi qu'être en mesure d'analyser le comportement des tacons en présence ou non d'un système d'ombrage, il a fallu récolter un ensemble de données qui ont été comptabilisées à l'aide d'un système RFID d'acquisition de données. Celles-ci sont rassemblées sur une clé USB placée sur le boîtier central sous forme d'un fichier CSV dont un exemple de sortie est rappelé à la Figure [5.16]. Afin d'interpréter les résultats de manière correcte, nous avons dû prendre certaines décisions.

Dans un premier temps, il a fallu exfiltrer les données parasites. En effet, il était fréquent qu'un poisson soit détecté plusieurs fois par seconde à la même antenne. Ceci s'explique par le calibrage optimisé des antennes qui peut détecter une puce lorsque celle-ci se trouve à proximité et non complètement sous elle. Ce phénomène était inévitable car il fallait garantir au moins une détection lors du passage de chaque poisson sous chaque antenne. Malgré ce souci, le calibrage sensible des antennes a permis de n'avoir aucun saut d'antenne dans la trajectoire des poissons. En effet, au cours des anciens travaux menés à Châtelet avec la technologie RFID, certains poissons voyaient leur trajet coupé comme s'ils avaient *sauté* une antenne. Cela est dû à une vitesse de nage parfois trop élevée.

Ensuite, en absence d'enregistrement vidéo, les données à disposition prêtaient parfois à confusion. En effet, comme le calibrage d'une antenne permet de capter un poisson situé à proximité même s'il n'a pas traversé complètement l'échancrure, il est parfois difficile de juger le mouvement du poisson. Il n'existe aucun moyen de savoir si le tacon est passé à plusieurs reprises devant l'antenne ou s'il l'a traversée. C'est pour cette raison que certaines hypothèses ont été prises comme c'est le cas pour le taux d'attractivité de la passe qui sera défini à la section [7.1.1].

Enfin, comme cela vient d'être expliqué, une interprétation arbitraire et personnelle est nécessaire à l'analyse des résultats. Il est parfois difficile de se prononcer sur le fait qu'un poisson passe d'un bassin à l'autre ou qu'il demeure simplement proche d'une échancrure. Des choix ont ainsi été posés. Par exemple, un certain intervalle de temps (de l'ordre de la minute) devait s'écouler entre deux moments où le poisson pouvait être attiré par la passe. C'est pour cette raison que les résultats qui seront présentés dans les deux chapitres suivants seront explicités le plus complètement et le plus objectivement possible. Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail seront dès lors plutôt axés sur des tendances que sur de véritables données chiffrées ou quantifiées.

6.2.2 Protocole d'essai propre à la rampe à anguilles

Cette section va s'intéresser au protocole expérimental réalisé pour étudier l'influence des pentes longitudinale et transversale sur une rampe à anguilles. La succession des protocoles expérimentaux présentés ci-dessous a été réalisée sur base d'une série d'essais préliminaires afin de mettre en place des conditions d'essais susceptibles de déboucher sur des résultats probants.

Essais préliminaires

Dans le cadre du modèle simplifié de la rampe à anguilles, il a été question de choisir le type de substrat et le débit adéquat sur base d'essais préliminaires. La durée de l'expérience et le nombre d'anguilles à introduire dans le modèle par condition d'essai ont également été déterminés.

Deux substrats de fond étaient à disposition : un substrat de type picot (Figure [6.7-a]), dont les caractéristiques ont été décrites au Tableau [4.6] et un substrat de type brosse (Figure [6.7-b]), dont les caractéristiques principales sont décrites dans le Tableau [6.4]. Afin de tester leurs efficacités respectives, une faible pente longitudinale (de l'ordre de $15\% = 8.5^\circ$) et une pente transversale nulle ont été installées. Les essais préliminaires ont montré que les anguilles arrivaient à se déplacer facilement dans le substrat de type picot mais pas du tout dans le substrat de type brosse. En effet, ce second substrat était trop dense et la largeur d'un brin trop épaisse. Dès lors, les anguilles n'arrivaient pas à se *faufiler* entre les touffes de brins. Il a donc été écarté des expériences.

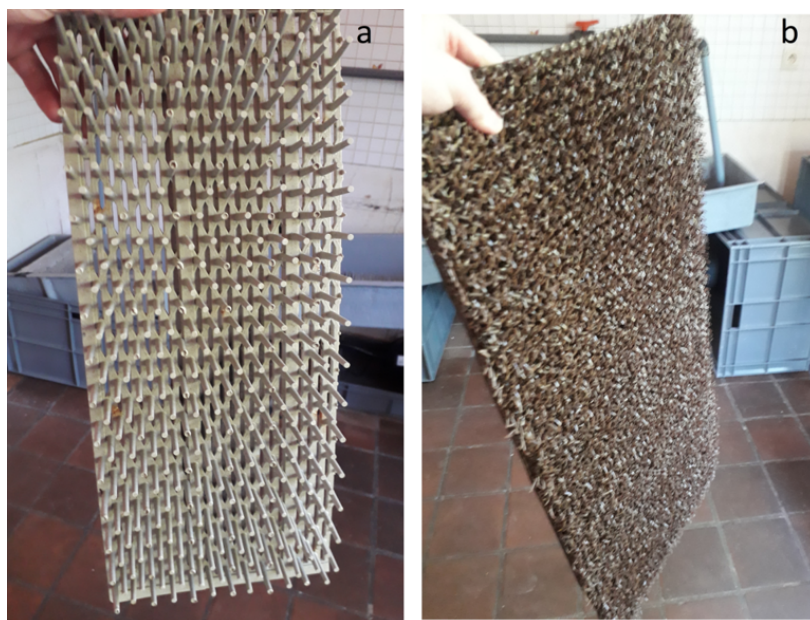


FIGURE 6.7 – Photos des substrats de fond testés lors des essais préliminaires dans le modèle simplifié d'une rampe à anguilles. (a) substrat de type picot, (b) substrat de type brosse.

Hauteur d'un brin	Nombre de brins par touffe	Espacement entre touffe (bord à bord)
15 [mm]	8	5 [mm]

TABLE 6.4 – Dimensions principales du substrat de fond de type brosse.

La pompe du modèle simplifié de la rampe permettait d'atteindre des débits allant de 0.45 à $1.5[L/s]$ grâce au bypass installé et décrit à la section [4.2.2]. Afin d'utiliser efficacement le substrat de fond, il est conseillé qu'il soit humidifié (voir section [4.1.3]). Ici, des pentes longitudinales de 8.5° ($= 15\%$) et 12.9° ($= 23\%$) combinées à une pente

transversale nulle ont été testées pour évaluer le débit nécessaire à humidifier le substrat correctement. Il s'est avéré qu'un débit de $0.45 [L/s]$ était suffisant. Cependant, afin d'assurer une homogénéité de la répartition de l'eau sur l'ensemble de la largeur du modèle, il a été nécessaire d'installer une grille à l'amont (Figure [6.8-a]) et de l'étanchéifier à l'aide de papier collant (en rouge sur la Figure [6.8-b]) sur une certaine hauteur ($\approx 3 [cm]$). Un tube en PVC (en vert sur la Figure [6.8-b]) a été introduit dans le but d'empêcher les anguilles d'aller se cacher sous le substrat.

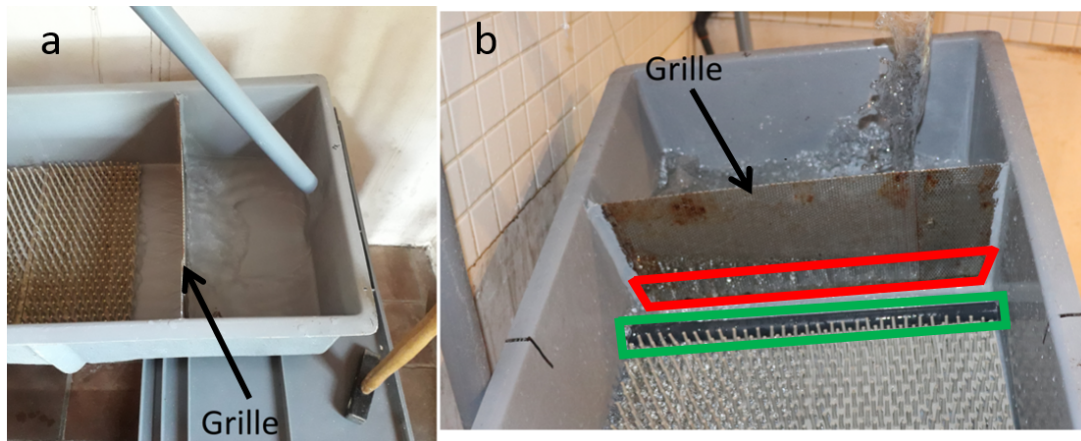


FIGURE 6.8 – Photos de l'amont du modèle simplifié de rampe.

Les essais préliminaires ont montré que les premières anguilles franchissaient la rampe en moins de 5 minutes à partir du moment où elles étaient introduites à l'aval du modèle. Il a donc été décidé de limiter chaque condition d'essai à 40 [min] car il a été jugé raisonnable d'affirmer que des résultats probants seraient obtenus sur ce délai de temps. De plus la batterie de la caméra ne tient pas plus de 3h d'affilée, il a donc fallu faire un compromis entre le nombre d'expériences à réaliser et le temps consacré à chacune d'elles.

Le nombre d'anguilles utilisé par condition d'essais a été limité arbitrairement à 5 individus. En effet, la taille assez réduite du modèle ne permettait pas d'envisager d'en introduire davantage. De plus, il était nécessaire que ces 5 anguilles aient suffisamment de place dans le bassin aval (en rouge sur la Figure [6.9-a]). Les anguilles étaient introduites dans ce bassin qui servait à la fois de zone de départ et de repos avant que les anguilles ne se lancent dans la rampe.

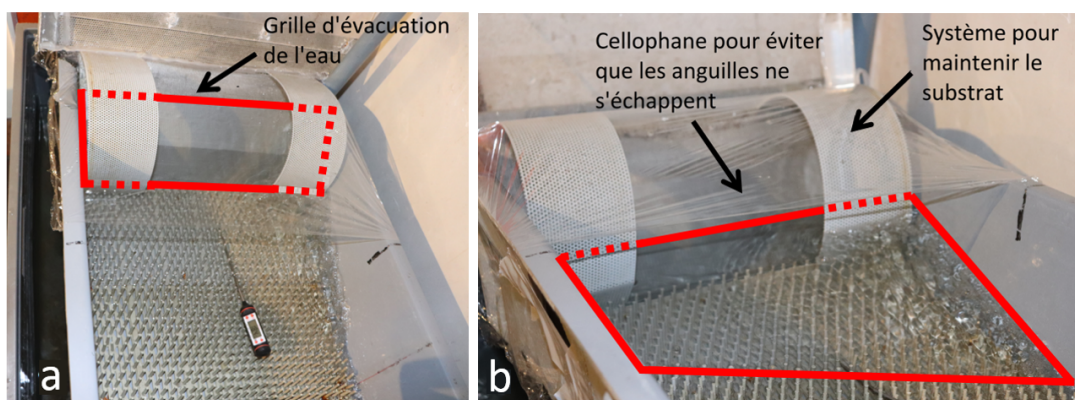


FIGURE 6.9 – Photos de l'aval du modèle simplifié de rampe.

Afin d'obtenir un bassin aux dimensions d'accueil souhaitables pour 5 anguilles, il a fallu installer du duct tape sur la grille permettant l'évacuation de l'eau (Figure [6.9-a]), sur une hauteur plus ou moins élevée en fonction de la pente longitudinale. De la cellophane a aussi été mise en place à l'aval pour éviter que les anguilles ne s'échappent (en rouge sur la Figure [6.9-b]). En effet, dès que la pente longitudinale devenait plus importante, l'eau affleurait le sommet de l'auge. Deux éléments flexibles ont été ajoutés pour maintenir le substrat en place (Figure [6.9-b]). Il était maintenu initialement avec du duct tape mais cela s'est avéré peu efficace. Celui-ci se décollait systématiquement et les anguilles en profitaient pour aller se cacher en-dessous.

Puisque le modèle de rampe ne disposait pas du système d'antennes RFID, il a fallu déterminer une autre méthode pour évaluer le moment où l'on considérerait que l'anguille faisait une tentative de remontée et l'instant qui marquait un franchissement réussi de la rampe. La méthode la plus simple a été d'inscrire deux témoins distants de 1.17 [m] sur l'auge au feutre indélébile noir pour qu'ils soient visibles à la caméra. Le premier est situé à l'aval (Figure [6.10-a]) et définit l'endroit où les anguilles font une tentative de remontée estimée. Le second est situé à l'amont (Figure [6.10-b]) et marque l'endroit où il est estimé que les anguilles parviennent à remonter entièrement la rampe. Le placement de ces témoins s'est fait sur base d'essais préliminaires antérieurs.

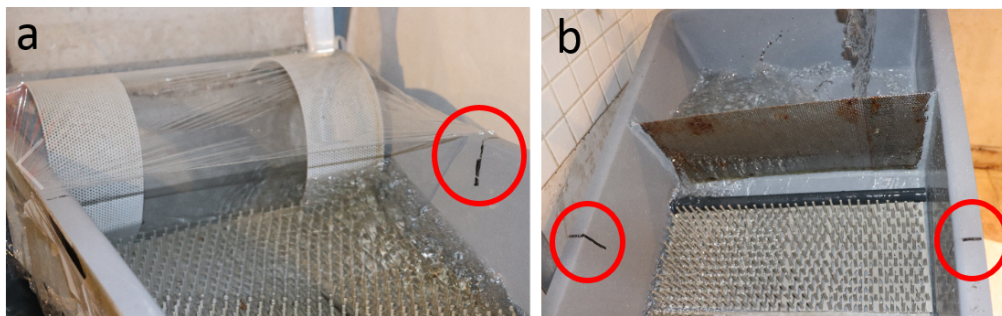


FIGURE 6.10 – Clichés des témoins du modèle simplifié de rampe. (a) aval (b) amont.

Durant les essais, il y a eu un cas de mortalité car une anguille a réussi à entrer dans le tuyau de pompage. Suite à cela, un système empêchant les anguilles d'entrer dans la pompe a été mis en place via une cellule d'alevinage (avec un fond formé d'un grillage percé de trous) dont le niveau supérieur est au-dessus de la surface de l'eau (Figure [6.11]).

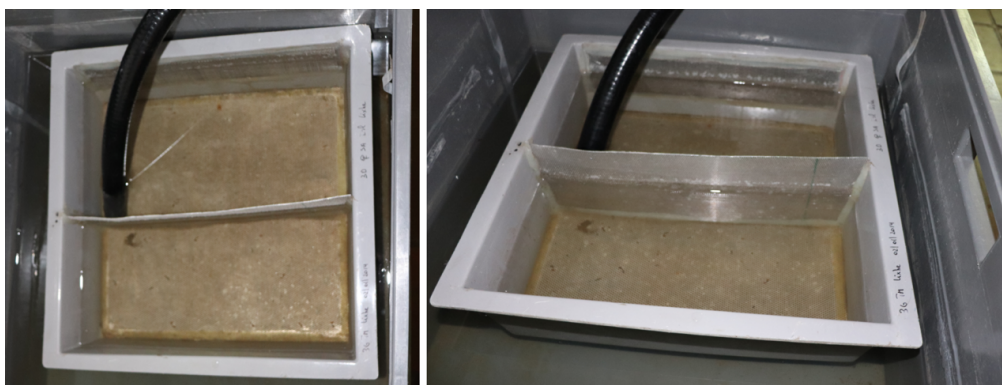


FIGURE 6.11 – Photos du système de pompage de l'eau.

Conditions d'essais

Dans le cadre des expériences servant à évaluer le comportement d'anguilles dans une rampe qui leur est spécifique, les pentes longitudinale et transversale de celle-ci ont été modifiées. Dans cette optique, différentes combinaisons de pentes longitudinale et transversale ont été étudiées. Des pentes longitudinales de 8.5° ($= 15\%$), 16.7° ($= 30\%$), 26.6° ($= 50\%$), 31.0° ($= 60\%$) et 36.9° ($= 75\%$) ont été combinées avec une pente transversale nulle. De plus, les trois premières pentes longitudinales ont aussi été combinées avec des pentes transversales non nulles de 5° ($= 8.7\%$) et 10° ($= 17.6\%$). Le but d'introduire une pente transversale est d'avoir une partie de la rampe *sous eau* et l'autre hors de l'eau (Figure [6.12]).

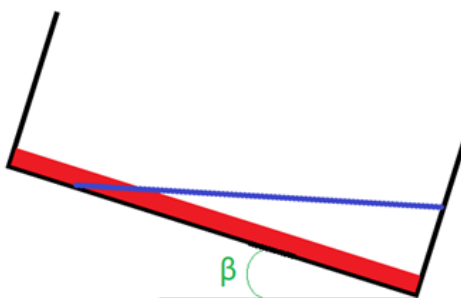


FIGURE 6.12 – Vue en coupe d'un schéma de la rampe spécifique à anguilles montrant l'effet de l'introduction de la pente transversale (β) (en rouge : le substrat de fond ; en bleu : la surface d'eau).

Chaque condition d'essais a été réalisée deux fois dans le but d'augmenter le nombre de résultats et les essais préliminaires ont montré qu'une durée de 40 minutes était suffisante par condition d'essais (voir section [6.2.2]). Un total de 5 anguilles a été utilisé par condition d'essais. Le Tableau [6.5] reprend l'ensemble de ces conditions.

Condition d'essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pente Longitudinale	8.5°			16.7°			26.6°			31.0°	36.9°
Pente transversale	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	0°

TABLE 6.5 – Conditions d'essais pour étudier l'évolution d'anguilles dans une rampe spécifique à anguilles.

Points d'attention

Comme dans le cas des expériences réalisées sur les tacons, certains paramètres ont nécessité une attention particulière.

- la **température** : celle-ci a été mesurée au début de chaque essai. Elle a oscillé entre 17.5 et 21 [$^\circ C$] durant les expériences. En effet, les expériences se réalisaient dans une petite pièce composée d'une fenêtre. En journée, la pièce était chauffée par le rayonnement solaire et le chauffage tandis que la nuit celle-ci se refroidissait. De

plus, la fenêtre était de temps à autre ouverte pour aérer la pièce. Ces différents éléments expliquent ces variations de température au cours de la journée (Figure [6.13] et Tableau [6.6]).

- le **débit** : les essais préliminaires ont montré qu'un débit de $0.45 [L/s]$ était suffisant pour humidifier le substrat. Le modèle simplifié de rampe n'était pas équipé d'un débitmètre, il a donc fallu déterminer cette valeur manuellement. Ceci s'est fait en remplissant un seau pendant un certain temps et en le pesant par la suite. Sachant que la masse volumique de l'eau est de $1 [kg/L]$, il suffisait de diviser une certaine masse d'eau accumulée par son temps d'écoulement t .

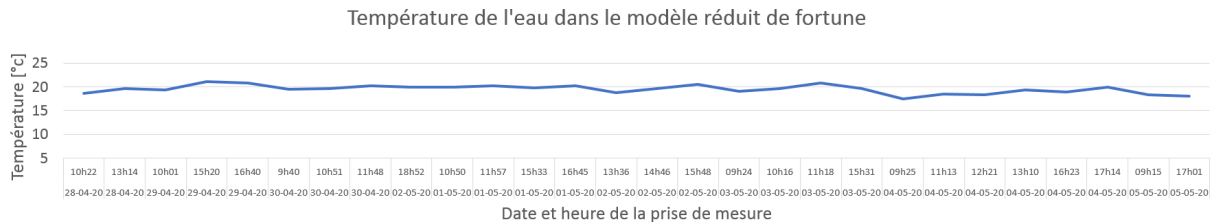


FIGURE 6.13 – Evolution de la température de l'eau du modèle simplifié de rampe.

Matériel

Au cours des manipulations pour transporter les anguilles entre le vivier de stockage et le modèle, deux seaux et une petite épuisette ont été utilisés.

Manipulations

Les manipulations liées aux expériences sont reprises ci-dessous de façon chronologique.

1. Les pentes longitudinale et transversale souhaitées sont introduites à la rampe. Pour ce faire, il fallait empiler un ou plusieurs bacs et/ou le(s) coucher sur son/leurs bord(s) long(s) ou large(s) afin d'atteindre la pente souhaitée.
2. Le matériel de la rampe est vérifié (substrat de fond, pompe, arrivée d'eau).
3. La caméra est mise en place, sécurisée dans son boîtier et allumée. Elle est ensuite orientée vers la rampe en s'assurant qu'elle soit bien fixée pour éviter qu'elle se déplace pendant l'expérience.
4. La pompe est mise en route afin d'amener l'eau contenue dans le bac aval vers l'amont de la rampe. La température de l'eau est ensuite mesurée.
5. A l'aide d'une épuisette, un lot de cinq anguilles est retiré de façon arbitraire du vivier stockage où les anguilles séjournent. Ce lot est ensuite introduit dans un seau préalablement rempli d'eau pour les transporter vers le modèle réduit.
6. L'enregistrement de la caméra est enclenché.
7. Le lot de cinq anguilles est introduit dans le bassin aval du modèle réduit et un minuteur de 25 minutes est lancé en raison de la durée limitée d'enregistrement permise (30 [min]). La date et l'heure de début de l'expérience sont notées et la condition d'essai est testée.
8. Après 25 minutes, l'enregistrement est coupé et est immédiatement relancé pour une durée de 15 minutes cette fois-ci.

9. Lorsque les 40 minutes d'expérience sont achevées, les cinq anguilles sont récupérées et introduites dans un seau préalablement rempli. Ce seau est mis de côté pour séparer les anguilles testées des autres. L'heure de fin de l'expérience est notée.
10. Pour passer à la condition d'essai suivante, il faut repartir du point 1 à la différence que les anguilles placées dans le seau sont réintroduites dans le vivier de stockage entre les points 5 et 6. C'est-à-dire au moment où un nouveau lot de cinq anguilles a été retiré du vivier de stockage.

Durée des expériences

22 expériences (sans compter les essais préliminaires) ont été lancées entre le 28 avril 2020 et le 5 mai 2020. Le Tableau [6.6] reprend l'ensemble des dates et des heures de début et fin de chaque expérience.

Index	Date	Heure de début	Heure de fin	Conditions d'essais (pentes)		T°
				Longitudinale	Transversale	
1	28-04-20	13h14	13h54	$\alpha = 8.5^\circ$	$\beta = 5^\circ$	19.7°
2	30-04-20	10h51	11h31	$\alpha = 26.6^\circ$	$\beta = 0^\circ$	19.6°
3	30-04-20	11h48	12h28	$\alpha = 26.6^\circ$	$\beta = 5^\circ$	20.3°
4	02-05-20	18h52	19h33	$\alpha = 26.6^\circ$	$\beta = 10^\circ$	19.9°
5	01-05-20	10h50	11h30	$\alpha = 36.9^\circ$	$\beta = 0^\circ$	19.9°
6	01-05-20	11h57	12h37	$\alpha = 36.9^\circ$	$\beta = 0^\circ$	20.2°
7	01-05-20	15h33	16h13	$\alpha = 31.0^\circ$	$\beta = 0^\circ$	19.8°
8	01-05-20	16h45	17h25	$\alpha = 31.0^\circ$	$\beta = 0^\circ$	20.3°
9	02-05-20	13h36	14h16	$\alpha = 26.6^\circ$	$\beta = 0^\circ$	18.8°
10	02-05-20	14h46	15h28	$\alpha = 26.6^\circ$	$\beta = 5^\circ$	19.6°
11	02-05-20	15h48	16h29	$\alpha = 26.6^\circ$	$\beta = 10^\circ$	20.5°
12	03-05-20	09h24	10h06	$\alpha = 16.7^\circ$	$\beta = 0^\circ$	19.1°
13	03-05-20	10h16	10h57	$\alpha = 16.7^\circ$	$\beta = 0^\circ$	19.6°
14	03-05-20	11h18	11h58	$\alpha = 16.7^\circ$	$\beta = 5^\circ$	20.8°
15	03-05-20	15h31	16h11	$\alpha = 16.7^\circ$	$\beta = 5^\circ$	19.6°
16	04-05-20	09h25	10h07	$\alpha = 16.7^\circ$	$\beta = 10^\circ$	17.5°
17	04-05-20	11h13	11h53	$\alpha = 16.7^\circ$	$\beta = 10^\circ$	18.5°
18	04-05-20	12h21	13h01	$\alpha = 8.5^\circ$	$\beta = 0^\circ$	18.4°
19	04-05-20	13h10	13h50	$\alpha = 8.5^\circ$	$\beta = 0^\circ$	19.3°
20	04-05-20	16h23	17h03	$\alpha = 8.5^\circ$	$\beta = 5^\circ$	19.0°
21	04-05-20	17h14	17h58	$\alpha = 8.5^\circ$	$\beta = 10^\circ$	19.9°
22	05-05-20	17h01	17h41	$\alpha = 8.5^\circ$	$\beta = 10^\circ$	18.0°

TABLE 6.6 – Dates et heures de début et de fin des expériences effectuées sur la rampe spécifique à anguille.

Les expériences prenaient place à différents moments de la journée. Comme évoqué ci-dessus, la pièce dans laquelle se déroulaient les expériences était munie d'une fenêtre. La luminosité de la pièce suivait donc l'éclairement extérieur qui dépendait de l'heure et de la météo. Afin que la pièce soit éclairée uniquement par le soleil, la lampe de la pièce était éteinte.

Analyse des résultats

Afin d'évaluer les tentatives de remontées et les remontées en elles-mêmes, il a fallu récupérer l'enregistrement de chaque expérience et le transférer sur un PC afin d'analyser convenablement les images. Puisque la caméra ne pouvait pas filmer plus de 30 minutes, chaque expérience était composée de 3 vidéos sous format MP4. Pour les traiter, le logiciel VLC a été utilisé. Les vidéos étaient analysées une par une visuellement en noir et blanc de façon à mieux distinguer les anguilles.

La difficulté majeure de traiter visuellement des images réside dans le risque plus élevé d'erreurs. Tout d'abord, il n'est pas toujours aisé de distinguer les anguilles car lorsqu'elles sont encore petites, leur coloration est proche du gris clair ce qui est aussi la couleur de l'auge. De plus, lorsque la cellophane a été mise en place pour éviter que les anguilles ne quittent l'auge, il était moins évident de distinguer ce qui se passait sous celle-ci. La cellophane induisait aussi des reflets à la caméra qui pouvait parfois prêter à confusion. Malgré cela, il suffisait de repasser la vidéo lorsqu'il y avait un doute et dans tous les cas, il a été possible d'identifier les anguilles.

Une dernière difficulté est liée aux effets de turbulence de l'écoulement d'eau. A certains endroits comme à l'intersection entre deux tapis de picots, de légers ressauts hydrauliques se formaient. Ceux-ci pouvaient laisser croire qu'une anguille était en train de remonter. Il fallait donc d'abord identifier toutes ces zones pouvant prêter à confusion avant que les anguilles ne commencent à monter.

6.2.3 Protocole d'essais propre à l'adaptation du modèle de la passe à bassins de Rivière aux anguilles

Cette section vise à mettre en évidence le travail initialement entrepris avec les anguilles avant la pandémie de Covid-19.

L'objectif principal de ces essais visait à chercher un moyen pour adapter une passe à bassins à échancrures verticales à un moins bon nageur comme l'anguille. Ces expériences auraient dû se dérouler dans le modèle réduit de la passe à poissons présente dans le hall d'essais de Châtelet. Pour préparer les expériences visant à étudier cette problématique, des essais préliminaires ont été réalisés. Sur base des premières observations, des modifications du modèle réduit ont été entreprises et plusieurs protocoles d'essais ont été proposés.

Essais préliminaires

Début février, des démarches ont été entreprises pour se procurer 20 anguillettes entre 1 et 5 [g] afin de lancer une série de tests préliminaires dans le modèle réduit de Châtelet. L'objectif était d'observer leur comportement dans la passe et d'identifier les zones à risque où les anguillettes pourraient éventuellement s'échapper. En effet, les anguilles se *faufilent* partout. Une petite ouverture ou encore une surface rugueuse peuvent servir d'échappatoire à cette espèce. La méthode suivie a été d'introduire des anguillettes à l'amont, à l'aval et dans les différents bassins de la passe. Les observations ont mis en évidence les points suivants :

- Tous les **orifices qui n'étaient pas bouchés étaient utilisés par les anguillettes** pour s'échapper de la zone de contrôle du modèle (Figure [6.14]).



FIGURE 6.14 – Anguille (entourée en rouge) coincée dans une bordure du modèle réduit de Châtelet.

Que cela soit la moustiquaire empêchant le passage des individus dans le bac amont, la moustiquaire servant à laisser s'échapper l'eau du bac aval, les orifices dans le canal d'emprunt ou encore les plaques installées dans le bac aval, tous ont montré des faiblesses. En effet, les anguilles cherchaient des cachettes ombrées pour éviter d'être exposées à la lumière. Ce souci a mis en évidence le fait que le modèle était trop éclairé pour ce type de poisson. Il a donc été décidé de n'allumer que le spot n°1 (Figure [5.19]). Ce dernier a été orienté vers l'extérieur pour se réfléchir sur la bâche et couvert de façon à diminuer l'intensité lumineuse. Ainsi, seule la zone aval était éclairée tandis que la zone amont était plus sombre. Cette modification a été engagée dans l'optique de diminuer le stress du poisson et d'inciter les anguilles à remonter la passe puisqu'il s'agit d'une espèce crépusculaire.

- Les anguillettes ont montré des **difficultés à remonter** la passe. En effet, lorsqu'elles étaient introduites dans un bassin, elles se retrouvaient rapidement expédiées vers l'aval. Le bassin le plus à l'aval du canal d'emprunt était bloqué d'une moustiquaire (en rouge sur la Figure [6.18]). Après quelques secondes, les individus qui y avaient été introduits se retrouvaient plaqués contre la moustiquaire.

Ces premiers essais ont donc mis en évidence des faiblesses dans la passe à poissons (Figure [6.15]) et des modifications ont été entreprises. Celles-ci sont décrites au point suivant.

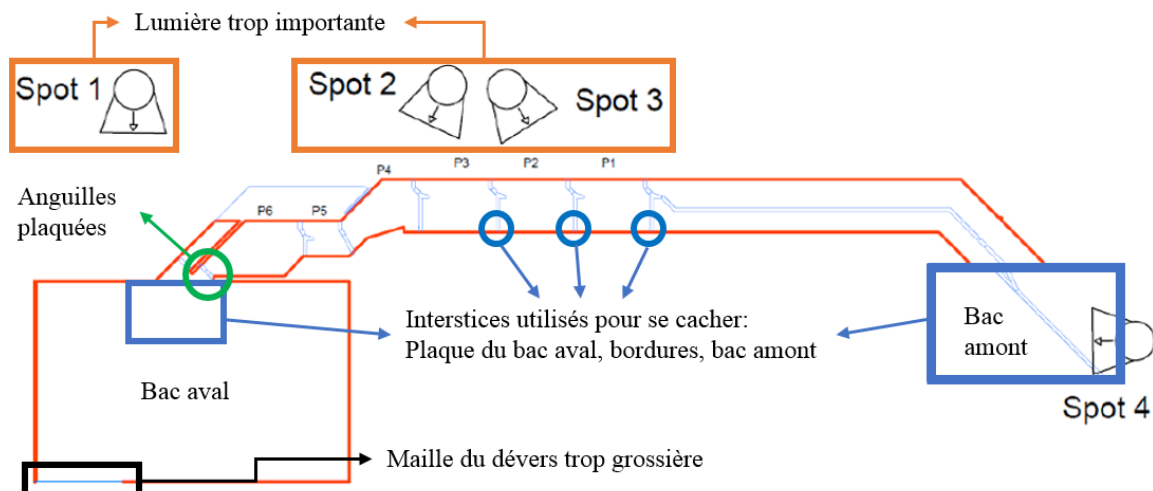


FIGURE 6.15 – Schéma des faiblesses observées pour l'accueil d'anguilles.

Modifications du modèle réduit

Il a été décidé de ne pas donner la possibilité aux anguilles de passer dans le bac amont durant les expériences. Celui-ci présentait trop d'endroits où les individus pourraient s'échapper et ne jamais être retrouvés. Il n'était pas envisageable de tous les colmater.

L'étude de l'attractivité de la passe a aussi été écartée. Les essais préliminaires ont montré que les anguillettes présentes dans le bac aval préféraient demeurer dans le fond à chercher des cachettes ou des zones d'ombre plutôt que de tenter d'entrer dans la passe. L'accès au bac aval a donc été bloqué via une moustiquaire placée sur l'échancrure la plus à l'aval du canal d'emprunt (en rouge sur la Figure [6.18]).

Les essais ont aussi mis en évidence le fait que la gamme de poids choisie pour les expériences n'était pas adéquate aux conditions de la passe. Il a donc fallu se décider à utiliser des anguilles de taille supérieure - quitte à légèrement sortir du cadre des facteurs d'échelle à respecter - afin de lancer les expériences et d'obtenir des résultats.

Après avoir modifié la passe, nous avons pu étudier le comportement de 250 anguilles de 7 [g] en moyenne. Puisque ces anguilles étaient de plus grande taille, de nouveaux essais préliminaires ont été réalisés en introduisant 20 anguilles dans les différents bassins. Les observations ont cette fois mis en évidence les points suivants :

- Les **modifications de la passe se sont avérées efficaces** puisqu'aucune anguille n'a réussi à s'échapper de la zone de contrôle.
- Les anguilles ont montré des **difficultés à remonter** la passe. En effet, deux lots de 10 anguilles ont été introduits dans le bassin le plus à l'aval du canal d'emprunt (Figure [6.18]) pour y évaluer leur comportement. Pour éviter qu'elles ne dévalent, une moustiquaire a été placée sur l'échancrure aval du bassin (en rouge sur la Figure [6.18]). Les anguilles ont tout de même essayé de remonter la passe (Figure [6.16-a]). Toutefois, dès qu'elles s'engagent face à l'échancrure, elles se font propulser de l'autre côté du bassin par le courant (Figure [6.16-b]). Après une dizaine de secondes, la majorité du lot se retrouve plaquée contre la moustiquaire à cause de la vitesse trop importante de l'eau (Figure [6.16-c]).



FIGURE 6.16 – Clichés des observations constatées lors des seconds tests préliminaires sur les anguilles. (a) anguille tentant de franchir l'échancrure (b) anguille expulsée par le courant (c) anguilles plaquées à l'aval.

Suite à ces constatations, il a été décidé de rajouter des cachettes temporaires formées de demi-tubes de PVC (Figure [6.17]). Celles-ci devaient être utilisées par les anguilles pour se stabiliser et ensuite être retirées. Malheureusement, le scénario est le même :

elles se font plaquer contre la moustiquaire. De plus, certaines anguilles préféraient rester à l'abri sous ces cachettes, ce qui n'était pas le but recherché. Cette idée a donc été écartée.

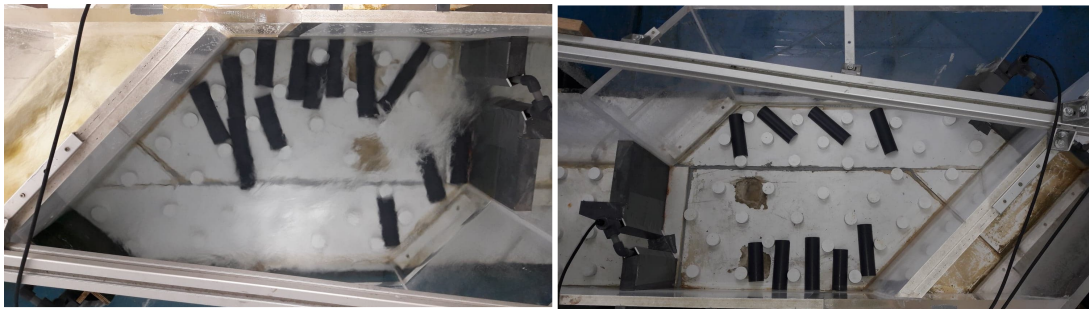


FIGURE 6.17 – Photos de cachettes pour anguilles en demi-tubes de PVC.

- Nous avons remarqué que **les anguilles utilisent le substrat de fond** pour se déplacer. Cependant, l'espacement entre les plots est trop grand comparé à la taille des anguilles. Elles n'arrivent donc pas à *serpenter* efficacement entre ceux-ci.
- Des **anguilles ont aussi été introduites directement dans le canal amont** où la luminosité est très faible grâce à la nouvelle installation des lumières présentée précédemment. Cela devait permettre d'évaluer si elles allaient redescendre avec le courant. Ces anguilles sont restées à l'amont et cherchaient à remonter plutôt qu'à descendre. Puisque l'accès au bac amont a été bloqué (en rouge sur la Figure [6.18]), elles préféraient rester statiques dans le fond du canal. Il a donc été conclu que la nouvelle installation lumineuse encourage les anguilles à remonter vers les zones plus ombragées du modèle.

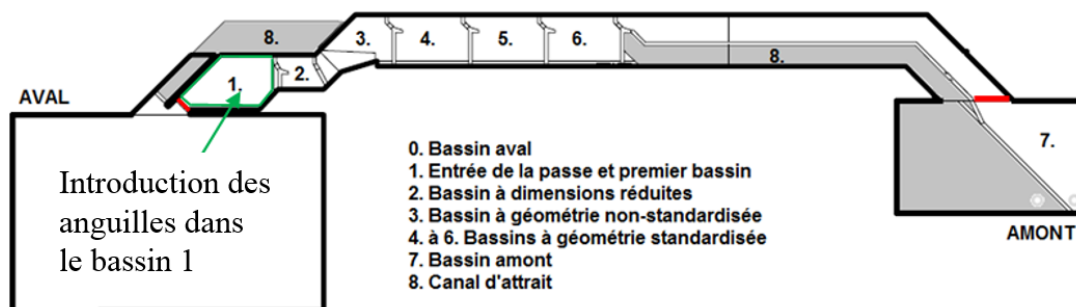


FIGURE 6.18 – Schéma du modèle réduit de la passe à poissons de Rivière.

Initialement il avait été prévu de réaliser des expériences de 48h mais les essais préliminaires ont montré que ce n'était pas envisageable car le taux de mortalité deviendrait trop important. Puisque l'accès au bac aval serait bloqué par une moustiquaire, toutes les anguilles s'y retrouveraient plaquées et seraient peut-être mortes.

Plusieurs idées ont donc été mises en avant suite à ces essais préliminaires afin de résoudre le plus gros problème rencontré : le fait que les vitesses d'eau soient trop importantes pour que les anguilles puissent remonter la passe. Celles-ci sont listées et décrites ci-dessous :

- **Installer des rampes au droit des échancrures** pour faciliter le passage au niveau des seuils (Figure [6.19]). Ces rampes se verraient recouvertes d'un substrat qui soit *freinerait* l'eau (Exemple : substrat d'herbe synthétique rugueuse (Figure [4.12-b])), soit permettrait aux anguilles de pouvoir s'appuyer dessus afin de franchir le palier (Exemple : substrat rugueux de type picots (Figure [4.12-a])). Cependant, cette solution n'est pas la plus efficace dans la mesure où les passes actuelles ne sont pas équipées de rampes et construire ce type d'infrastructures sur site peut rapidement devenir long et compliqué. De plus, il ne faudrait pas que cela vienne gêner les autres espèces qui utilisent les passes à bassins.

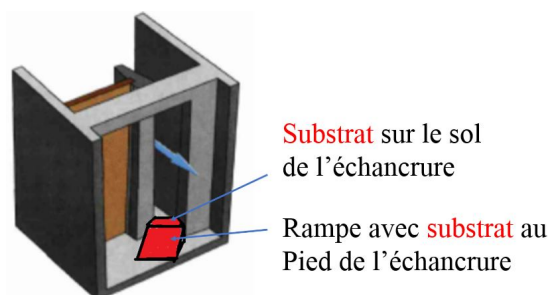


FIGURE 6.19 – Schéma d'une rampe en pied d'échancrure du modèle réduit de Châtelet.

- **Doubler la densité des plots** pour que les anguilles puissent les utiliser comme appui afin de *serpenter* entre ceux-ci (Figure [6.20]).

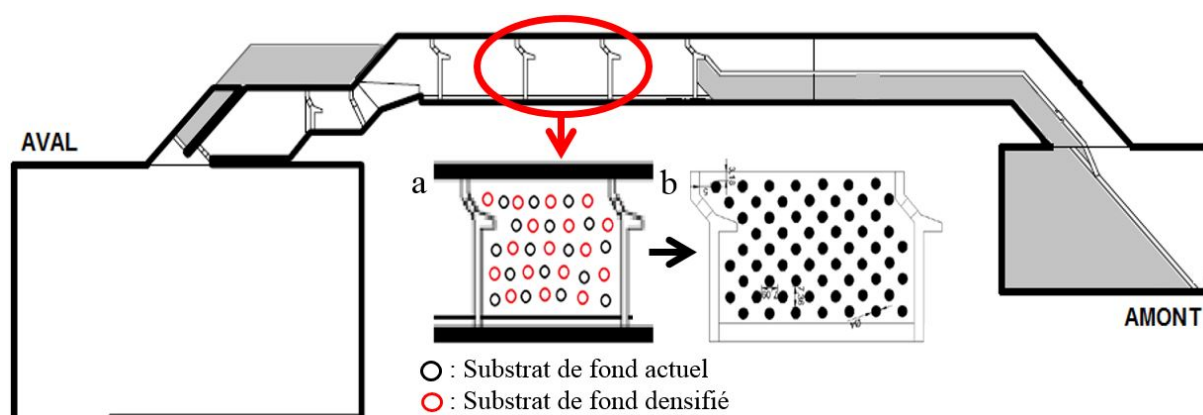


FIGURE 6.20 – (a) Schéma de la modification des plots dans le fond du modèle réduit de Châtelet. (b) Dimensions et placement des plots dans le fond du modèle réduit de Châtelet.

- **Placer des substrats de type picot** à l'intérieur des échancrures. Une taille de 25 [mm] semble être la plus à même de convenir à ce type d'essais. En effet, il faut qu'il y ait suffisamment de place pour que les anguilles puissent se faufiler entre les brins. Cette solution est plus crédible car elle est plus facile à mettre en place sur le terrain. Les propriétés de ce tapis sont reprises dans la Figure [6.21].
- **Placer un substrat de type brosse** au niveau des joints. Cela permettrait aux anguilles de se reposer entre chaque essai de franchissement. Cela favoriserait également la possibilité de repos des anguilles dans les zones dites de recirculation.



Nombre de picots au m^2	2200
Longueur d'un tapis	1.0 [m]
Largeur d'un tapis	50 [cm]
Épaisseur de la semelle	8 [mm]
Poids d'un tapis	6.3 [kg]
Hauteur d'un picot	2.5 [cm]
Diamètre à la base d'un picot	6 [mm]
Espacements horizontaux picots	2.4 [cm]
Espacements diagonaux picots	1.3 [mm]

FIGURE 6.21 – Dimensions d'un tapis picot 25 mm pour rampe à anguilles (Pauty, nd).

Modifications de la passe

Suite aux essais préliminaires, des faiblesses quant à l'accueil des anguilles ont été observées (Figure [6.15]). Pour des raisons déjà évoquées précédemment, des modifications ont été entreprises sur le modèle réduit pour mener les expériences dans les meilleures conditions possibles (Figure [6.23]). Les changements opérés sont les suivants :

- L'échancrure donnant accès au bac aval ainsi que l'ouverture donnant accès au bac amont ont été bloquées à l'aide d'une moustiquaire (en rouge sur la Figure [6.18]).
- Le spot n°1 a été couvert et tourné de 180° (Figure [5.19]).
- Le substrat de fond a été recollé aux endroits où il manquait un plot selon la Figure [6.20].
- Des réglettes en plexiglass ont été collées le long des parois du canal amont et du bac aval afin d'éviter que les anguilles ne puissent les remonter pour s'échapper (Figure [6.22]).

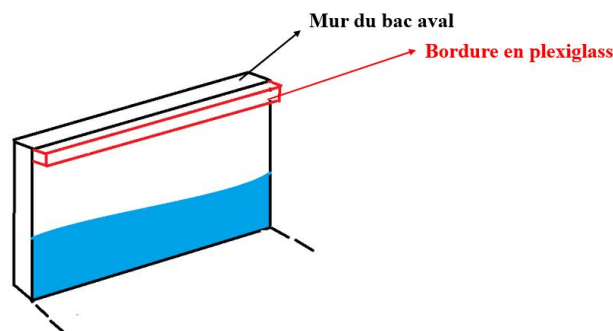


FIGURE 6.22 – Schéma de l'installation d'une équerre de plexiglass dans le bac aval du modèle réduit de Châtelet.

- Tous les orifices qui permettent de quitter la zone de contrôle ont été rebouchés à l'aide de silicone transparent.
- Le dispositif anti-retour utilisé pour les tacons a été retiré car les anguilles se cachaient en dessous.
- Les plaques blanches présentes dans le bac aval ont été enlevées car les anguilles se cachaient en dessous.
- Les trous de la moustiquaire du dévers d'évacuation du bac aval ont été colmatés avec du duct tape.

- Les antennes ont été recouvertes de duct tape car les anguilles arrivaient à passer derrière celles-ci. Pour ce faire, il a fallu préalablement nettoyer l'échancrure à l'acétone.

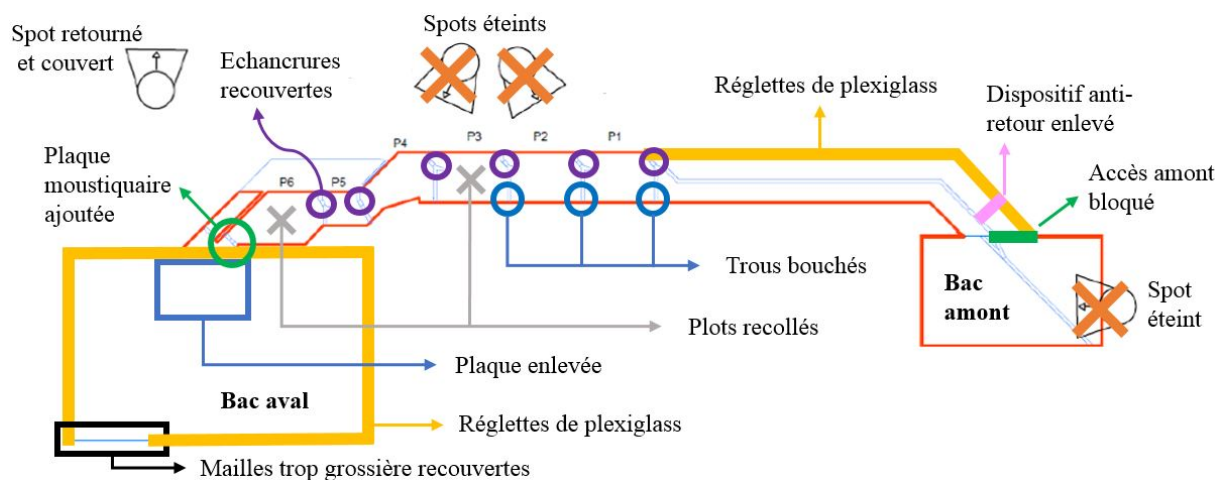


FIGURE 6.23 – Schéma des modifications réalisées sur le modèle réduit de Châtelet pour l'accueil d'anguilles.

Protocole expérimental prévu

Cette rubrique va présenter le dernier protocole expérimental en date, prévu pour travailler sur la problématique de l'étude de la franchissabilité des anguilles dans une passe à poissons à échancrures verticales adaptée. Ce protocole avait été approuvé par l'équipe encadrant nos recherches, il peut dès lors être réutilisé comme base de travail pour étudier la problématique citée plus haut.

Nombre de lots :

Les 250 anguilles PIT-taguées seront séparées en 4 lots de la façon suivante :

- 180 anguilles divisées en trois lots égaux servant aux expériences.
- 1 lot de 70 anguilles de réserve en cas de mortalité lors des expérimentations.

Conditions d'essais :

Pour étudier la franchissabilité, les anguilles seront directement introduites dans le bassin 1 et l'accès au bac aval leur sera bloqué (Figure [6.18]). De plus, la densité du substrat de fond sera augmentée. Dans sa configuration actuelle, le substrat composé de plots est trop peu dense pour que les anguilles puissent l'utiliser de façon efficace (Figure [6.20]).

En outre, la vitesse de l'eau à la sortie des échancrures est trop élevée pour que les anguilles puissent les traverser. En effet, dès qu'elles s'engagent face à celles-ci, elles se font expulser dans la colonne d'eau. Dans cette optique, des rampes vont être installées devant les échancrures avec une pente de 15° (Figure [6.19]). Elles seront munies d'un substrat tout comme les seuils des échancrures. L'angle de 15° a été choisi selon les résultats obtenus par Legault (1992) (Tableau [6.7]). Deux substrats de rampe vont donc être testés selon les recommandations de Monsieur Alain Gillet (2020) :

- Le tapis picot 25 [mm] dont les caractéristiques sont reprises à la Figure [6.21].
- Un substrat de type *brosse de rue* 10 [mm] (Figure [4.12-b]) en suivant les résultats obtenus par Legault (1992) (Tableau [6.7]). Cependant, les résultats repris dans ce dernier correspondent à une longueur moyenne d'anguille de 223 [mm] ; or le lot mis à notre disposition pour les expériences possédait une longueur moyenne de 166 [mm]. En opérant par proportions, l'espacement préconisé entre brins de 14 [mm] peut être diminué à 10 [mm].

Espacement	Pentes des rampes		
	15°	30°	45°
21 [mm]	7.6 %	35.5 %	52 %
14 [mm]	61 %	52.3 %	38.4 %
7 [mm]	31.4 %	12.2 %	9.6 %
Total	100 %	100 %	100 %

TABLE 6.7 – Pourcentage de petites anguilles (longueur moyenne 223 [mm]) utilisant des rampes avec différents substrats de type brosse à 3 pentes différentes (Solomon and Beach, 2004).

Trois conditions d'essais seront testées :

1. Seule la densité des plots dans le fond de la passe est augmentée.
2. La densité des plots dans le fond de la passe est augmentée et le substrat de type *brosse de rue* 10 [mm] est ajouté sur la rampe et dans l'échancrure.
3. La densité des plots dans le fond de la passe est augmentée et le substrat de type *tapis picot* 25 [mm] est ajouté sur la rampe et dans l'échancrure.
4. Témoin négatif : On retire la rampe et les plots servant de substrat de fond. Il faudrait peut-être trouver un autre témoin négatif car dans cette configuration, il y a un risque élevé de retrouver toutes les anguilles plaquées contre la moustiquaire.

Photopériode :

Au moment des expériences, la photopériode réelle était de 15h de jour et de 9h de nuit (Figure [6.24]). L'éclairage des expériences se serait donc aligné sur ce schéma. Cela signifie que le système LOGO! (voir section [5.2.2]) allumera les lampes à 6h et les éteindra à 21h, ce qui correspond à la réalité de la saison. De plus, les modifications liées à l'éclairage présenté précédemment sont conservées pour toute la durée des expériences.

Date	Soleil			
	Lever	Coucher	Culmination	Durée du jour
Ven., 1 mai	6:15	21:04	13:39	14:48:59
Sam., 2 mai	6:13	21:05	13:39	14:52:22
Dim., 3 mai	6:11	21:07	13:39	14:55:44
Lun., 4 mai	6:09	21:08	13:39	14:59:04
Mar., 5 mai	6:08	21:10	13:39	15:02:22

FIGURE 6.24 – Tableau de la photopériode de la période du 1 mai 2020 au 5 mai 2020.

Temps consacré aux expériences :

Le temps consacré par condition d'essai a été fixé à 48 heures sauf pour le témoin négatif où la durée de l'essai reste à déterminer. De manière générale, il faudrait revoir à la baisse le temps consacré pour chaque expérience et favoriser préférentiellement des duplicatas. Chaque condition serait testée 3 fois (Figure [6.25]).

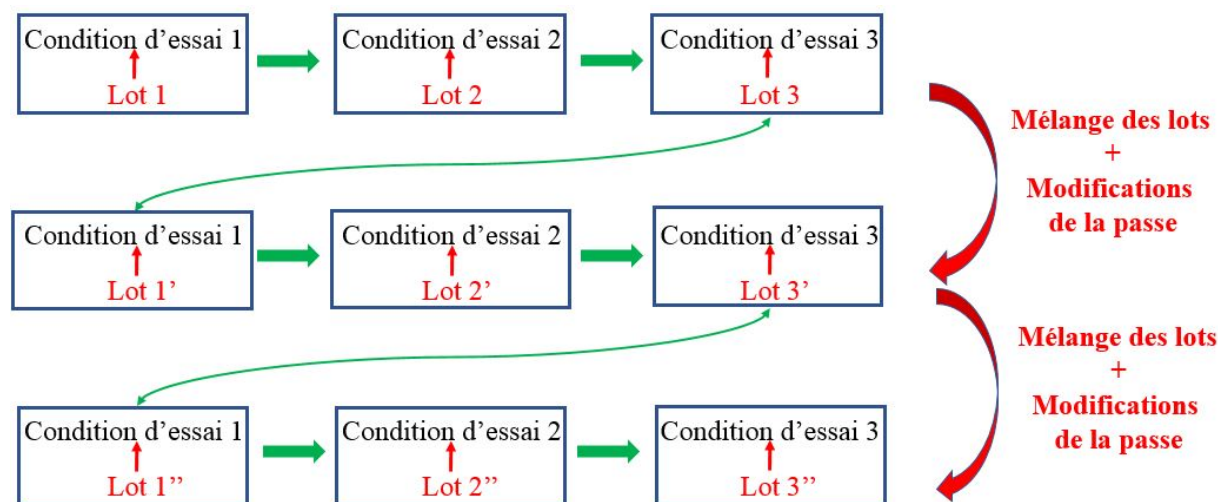


FIGURE 6.25 – Synthèse visuelle du déroulement des expériences menées sur la franchissabilité des anguilles.

6.3 Limitations expérimentales

Lorsqu'un travail vise à illustrer un concept, une tendance ou l'influence d'un paramètre de manière expérimentale, il sera toujours confronté aux limites dressées par le modèle lui-même. En effet, par définition, l'étude expérimentale se caractérise par des choix posés et des hypothèses qui tentent de retranscrire la réalité de la manière la plus fidèle possible. Néanmoins, un modèle restera toujours une représentation simplifiée de la réalité avec ses limitations. Au cours de l'analyse des deux problématiques visées, des résultats ont été obtenus mais ils devront donc être nuancés sur base de leurs limites expérimentales.

6.3.1 Modèle réduit de la passe de Rivière

Environnement du laboratoire

Le modèle réduit de la passe à poissons de Rivière a été construit au Laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie. Les conditions du hall d'essais *André Sterling*, où est entreposé le modèle de la passe à bassins, sont bien différentes de l'environnement réel dans lequel les poissons sont amenés à vivre. Les paramètres du biotope extérieur (eau, air, faune, flore, etc.) sont en pratique impossible à reconstituer dans un laboratoire d'essais. De plus, il n'est par exemple pas possible d'éclairer la passe de manière naturelle ni de simuler l'existence d'un écosystème autour du modèle dans lequel seraient notamment compris des proies et des prédateurs. Ces limitations sont évidentes et difficiles à quantifier quant au comportement des poissons.

Toutefois, son influence sur les tests menés reste limitée et ne portera pas atteinte aux objectifs poursuivis.

Respect des lois d'échelle

Le modèle a été reproduit à l'échelle 1 : 5 pour des raisons évidentes de dimensions. En effet, il n'était pas possible de construire la passe à taille réelle pour différentes raisons. D'une part, cela nécessite un espace considérable qui pourrait être utilisé à d'autres fins. En effet, le hall d'essais de Châtelet partage son espace entre différents modèles qui traitent chacun d'une amélioration ou d'une modification d'un ouvrage du réseau hydraulique wallon. D'autre part, utiliser un modèle réduit permet de limiter ses coûts de construction et d'exploitation.

Afin de respecter les lois de la physique, les principes de similitudes doivent être pris en considération afin de reproduire l'écoulement de la passe de manière correcte. Il est en pratique tout à fait envisageable d'adapter les paramètres dimensionnels du modèle (longueur, largeur, hauteur, profondeur) ainsi que les éléments caractéristiques d'un écoulement à surface libre (débit, hauteur d'eau, vitesse) à une échelle 1 : 5.

En revanche, lorsque du matériel vivant est placé dans un modèle réduit, il est difficile de déterminer la taille des poissons qui devront y être introduits. En effet, un être vivant ne peut pas être réduit simplement à un seul paramètre physique caractéristique qui serait sa taille. Le métabolisme d'un poisson dépend d'un certain nombre de variables sur lesquelles les lois physiques n'ont pas de prise : capacité musculaire, vitesse de nage, croissance, état de santé, etc. Afin d'utiliser des poissons dont les capacités de nage sont les plus proches possibles d'un individu dont la taille serait réduite à un cinquième, des choix ont été posés. Ainsi, il a été décidé de prendre des individus dont la taille correspondait à un facteur proche de 1 : 5 car il a été montré dans d'autres travaux que cela semblait convenir aux essais. Nous avons également étudié l'influence d'un facteur de taille proportionnel à des lois empiriques de vitesse de nage. La gamme de taille à utiliser reste fort proche d'un facteur 1 : 5 (voir section [4.2.3]). L'exactitude du rapport de taille à utiliser doit se situer entre ces deux approches mais il est impossible à l'heure actuelle de quantifier cela précisément.

Imperfections du modèle réduit

Malgré tous les efforts consentis à respecter l'exactitude de la passe de Rivière, certains détails diffèrent entre la réalité et le modèle réduit. C'est le cas notamment d'une marche de fond qui se prolonge entre les bassins P1 et P3 (voir le trait en noir sur la Figure [4.16]). Cette dernière modifie légèrement le fond de la passe au niveau d'une des deux parois. Cependant, ce détail ne modifie pas significativement l'écoulement. La possibilité de création de turbulence à cet endroit est donc négligeable.

Par ailleurs, le bassin P5 (Figure [4.16]) est plus court que dans la réalité. En raison du fait que ce bassin soit déjà celui qui possède la taille la plus faible, un risque d'écoulement turbulent est possible à ce niveau. Ce phénomène est d'ailleurs amplifié par le fait que le seuil S5 de ce même bassin soit supérieur aux autres seuils (12 [cm] contre 2 [cm] pour les autres). Cette profondeur supplémentaire a été utilisée comme zone de repos pour

les tacons testés lors des essais préliminaires alors qu'il n'a pas lieu d'être sur le modèle réel.

En outre, comme le modèle réduit est limité dans l'espace, des bacs amont et aval sont utilisés comme représentation simplifiée de la largeur de la Meuse. Le fait que ces dimensions ne soient pas à l'échelle ne perturbe en aucun cas la possibilité de franchissement par les individus. En revanche, cela peut jouer sur deux autres points. Premièrement, le taux d'attractivité de la passe sur une période donnée ne peut pas être considéré comme un pourcentage représentatif exact. En effet, il est plus facile de trouver l'entrée d'une passe si le périmètre de recherche est réduit. Deuxièmement, le bassin amont marque la fin du modèle tandis que cela n'est pas le cas à Rivière puisque la Meuse continue son cours au-delà de l'ouvrage de franchissement. Cela peut perturber les poissons du modèle qui une fois remontés pourraient normalement continuer leur trajet. Le comportement des poissons qui dévalent la passe a été empêché au maximum avec le dispositif anti-retour (présenté à la Figure [6.4]) mais ce comportement ne peut être annulé totalement.

Enfin, le modèle commence à dater puisque les premiers tests ont été effectués en 2013. Cela signifie que les premiers soucis liés à la vétusté du modèle commencent à se faire ressentir. C'est le cas par exemple des quelques fuites qui proviennent de l'usure des joints ou d'une partie du modèle en bois qui commence à bailler à cause de l'humidité. Néanmoins, ces défauts causés par l'âge sont plus anecdotiques que dérangeants. Les pertes d'eau constatées ne font pas varier les conditions physiques de l'écoulement.

Matériel vivant

A l'inauguration du modèle réduit, celui-ci avait été prévu pour étudier l'écoulement dans la passe de façon numérique. Aucun matériel vivant n'était a priori destiné à étreindre le modèle de la passe à poissons de Rivière. En effet, le hall de Châtelet ne dispose pas des mêmes conditions de captivité qu'une pisciculture. Toutefois, le défi a été relevé d'étudier le comportement d'espèces piscicoles dans un laboratoire d'essais tout en sachant les difficultés que des limites expérimentales pouvaient engendrer.

Tout d'abord, les poissons qui empruntent un dispositif de franchissement dans la réalité le font de manière volontaire. Dans le cas des expériences menées, certains poissons ont été forcés de s'acclimater d'un endroit à l'autre au cours des tests. Ceci était inévitable puisque le but de l'étude est d'analyser le comportement de poissons lorsqu'ils remontent une passe à bassins. Le transport fréquent que subissent les poissons entre le modèle et les bacs de stockage provoque du stress, même en prenant toutes les précautions nécessaires. L'effet de ce stress sur le comportement ou les capacités physiques de nage est difficile à jauger. Ce facteur devra donc retenir l'attention lorsqu'il s'agira de discuter des résultats obtenus.

D'autre part, le fait d'utiliser des saumons juvéniles afin de respecter les lois de similitudes semble évident. Cependant, il s'avère que la migration de cette espèce vers l'amont des rivières soit motivée par son désir de reproduction. En effet, comme expliqué en détail à la section [3.4.1], le saumon atlantique adulte remonte les cours d'eau afin d'aller y frayer. Ce comportement n'est pas visible chez le tacon utilisé dans les essais puisqu'il n'a pas encore atteint sa maturité sexuelle. De plus, certains tacons ont réussi à smoltifier au cours des essais. Ce stade biologique se caractérise par une volonté de dévaler les rivières afin de rejoindre la mer. Observer des remontées de la part de ces individus est donc

à l'encontre de leur cycle biologique. Ces paramètres seront à prendre en compte dans l'analyse des résultats.

Finalement, le fait de ne pas nourrir les poissons est une décision qui peut également influencer leur comportement et par conséquent les résultats expérimentaux. Dans les rivières, les jeunes saumons s'alimentent en vers et en larves qui sont inexistantes à Châtelet. Il a été montré que les poissons sont des espèces capables de ralentir leur métabolisme et de puiser dans leurs réserves afin de subvenir à une absence prolongée de nourriture. Le fait de ne pas nourrir les individus ne pose pas de risque de mortalité sur le mois de captivité. En revanche, le poisson sera obligé de consommer ses réserves afin d'effectuer des efforts intenses comme celui de gravir un ouvrage de franchissement. Sur le long terme, cela peut jouer sur la volonté des spécimens à s'aventurer dans la passe et certains pourraient préférer économiser leurs forces.

Matériel inerte

Lors d'essais expérimentaux, le matériel utilisé constitue également une barrière sur la reproduction fidèle d'un environnement à échelle réduite. Les propriétés physiques et la composition chimique de l'eau du laboratoire ont constitué la principale limite expérimentale. D'abord, la température de l'eau circulant en continu n'a pas pu être contrôlée. Comme les poissons sont poïkilothermes, il existe une température idéale pour laquelle leurs performances de nage seront optimisées. Malheureusement, il n'est pas possible d'influencer ce paramètre. De plus, la composition chimique et biologique de l'eau joue sur la santé des poissons. L'eau du modèle est stockée dans une cuve en béton et circule dans d'autres modèles du laboratoire qui n'accueillent pas de matériel vivant. Il n'est donc pas impossible que des produits chimiques provenant, par exemple, de matériaux de fixation comme le silicone se retrouvent dans l'eau. Le risque de contamination reste cependant très faible et les derniers tests réalisés sur la qualité de l'eau ont montré des résultats tout à fait acceptables afin d'héberger temporairement des êtres vivants.

D'autres limitations provenant du matériel utilisé concernent notamment le matériel RFID d'acquisition des données. Comme expliqué à la section [6.2.1], le calibrage des antennes est un souci majeur. Un compromis doit être trouvé dans la sensibilité afin de capter tous les poissons, quitte à les détecter à plusieurs reprises au même instant. L'analyse des résultats dépend ainsi d'une certaine interprétation personnelle. Néanmoins, ce matériel reste relativement fiable et des erreurs d'interférences avec d'autres appareils du laboratoire n'ont pas été déplorées.

6.3.2 Modèle simplifié d'une rampe à anguilles

Le modèle simplifié de rampe a été construit de manière rudimentaire en raison des conditions imposées par la situation sanitaire provoquée par la pandémie de Covid-19. Tout a été mis en œuvre pour arriver à développer des résultats convaincants et exploitables. Ceci a été possible même si certains paramètres ont empêché de développer le raisonnement jusqu'à son terme.

Limitations physiques

Une première limitation a été le fait que certaines pentes longitudinales et transversales n'étaient pas atteignables avec le matériel mis à disposition :

- Pour une pente longitudinale de plus de 36.9° ($= 75\%$), il n'est plus possible de créer un bassin dans lequel les anguilles peuvent rester avant de se lancer dans la rampe. En effet, la grille servant à laisser l'eau se déverser dans le bac aval et empêchant les anguilles de quitter la rampe est colmatée avec du duct tape pour augmenter ou diminuer la taille du bassin aval. Au-delà d'une certaine pente, il n'est plus possible de créer de bassin car l'eau déverse tout simplement au-dessus de la grille colmatée. De plus, pour des pentes longitudinales de plus de 26.6° ($= 50\%$), la taille du bassin aval est trop faible. Il n'est donc pas envisageable d'ajouter une pente transversale car il n'y aurait tout simplement plus de bassin d'accueil.
- Pour une pente transversale supérieure à 10° ($= 17.6\%$), l'eau déverserait par les côtés latéraux de l'auge. Les anguilles peuvent donc s'en échapper sans aucun souci. Une idée a été d'installer de la cellophane au-dessus du bassin aval mais avec une pente transversale supérieure à 10° elles s'échapperaient malgré tout. Toutefois, même pour des combinaisons du type $\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 10^\circ$, les anguilles arrivent déjà, de temps à autre, à s'échapper bien qu'il y ait de la cellophane et que l'eau ne déverse pas par les côtés latéraux de l'auge.

Matériel vidéo

La caméra utilisée pour filmer les anguilles est limitée à un temps maximal d'enregistrement continu de 30 minutes. Ceci est une règle imposée par le fabricant afin de limiter la taxation à l'importation des appareils photos. En effet, l'Union Européenne considère qu'un appareil peut être considéré comme une caméra vidéo au-delà de ce temps d'enregistrement ([Kaplan, 2017](#)). La note 2016/C 214/09 de la nomenclature combinée de l'Union européenne décrit la problématique.

La parade utilisée pour contrer ce problème a été de couper l'enregistrement après 25 minutes de vidéo et de le relancer immédiatement après. Ceci permettait de filmer un essai sur 40 minutes au total. Pour ce faire, il fallait s'assurer que la caméra n'avait aucun autre fichier en mémoire au début de l'expérience et que la capture de la bande sonore était coupée afin d'éviter d'augmenter le volume du fichier.

Un second problème lié à la capture vidéo est la taille des fichiers obtenus. Une expérience de 40 minutes correspond à 8.3 Go en moyenne. Multiplié par 11 expériences et sommé aux essais préliminaires, le volume de l'ensemble devient conséquent. Dans les conditions vécues au moment des expériences, ce détail n'était pas négligeable.

Les problématiques liées à la caméra auraient pu être évitées s'il avait été possible d'installer le système RFID présent à Châtelet dans l'auge. Cependant, démonter, déplacer et remonter tout ce matériel aurait été fastidieux et difficile à organiser. De plus, il est difficilement imaginable de l'installer dans le modèle de la rampe à anguilles en raison de ses petites dimensions.

Chapitre 7

Etude de l’Ombrage

7.1 Résultats

Ce chapitre cherche à mettre en lumière l’influence d’un dispositif d’ombrage sur le comportement de montaison des poissons dans le cadre de leur migration. En effet, bon nombre de poissons évitent de remonter les ouvrages de franchissement pendant la période de jour notamment par crainte de la prédation ailée à ce moment de la journée. Etudier l’éventuelle amélioration du passage de poissons en journée est donc l’objectif poursuivi dans cette étude. Le matériel vivant choisi pour effectuer les tests est le saumon atlantique puisque la capacité de remontée sans encombre de cette espèce dans une passe à bassins a été montrée lors de travaux précédents.

Dans un premier temps, nous fournirons les résultats chiffrés des différents essais opérés. Ils distingueront deux variables : l’attractivité et la franchissabilité. Ces variables seront définies avant d’être analysées. Dans un deuxième temps, des commentaires viendront compléter les tendances statistiques dégagées pour les deux paramètres précités.

Afin d’étendre le nombre de résultats obtenus, chaque jeu de données sera rassemblé par condition d’essais. Ainsi, les trois répliques effectués pour chacun des trois dispositifs d’ombrage (brut, opacifié, ombragé) ne formeront plus que trois expériences. Les résultats seront cumulés afin de maximiser la possibilité de dégager des tendances. Ceux-ci seront adaptés de façon à pouvoir comparer les expériences entre elles, c’est-à-dire étalonnés sur la même taille d’échantillon pour chaque condition d’essai.

Les analyses se concentreront principalement sur un nombre de mouvements détectés, synonyme d’activité des poissons. Les chiffres donnés par individu seront traités lorsqu’ils présenteront un intérêt. Afin de ne pas biaiser les résultats, il a fallu solutionner les détections parasites causées par la sensibilité des antennes RFID. Pour cette raison, le fichier reprenant toutes les détections a été traité de façon à éliminer les doublons, c’est-à-dire les passages captés deux ou plusieurs fois au même moment.

7.1.1 Attractivité

Définition

L’attractivité d’une passe à poissons est un concept qui permet d’illustrer le bon dimensionnement du canal d’attrait. En effet, le débit circulant dans une passe à bassins

est très faible en comparaison avec le débit s'écoulant dans la rivière. Afin d'inciter le poisson à s'engager dans la passe, un deuxième canal de débit supérieur est utilisé : le canal d'attrait. Ce dernier permet au poisson d'être attiré par la passe, ce qui est indispensable au bon fonctionnement d'un ouvrage de franchissement (voir section [4.1.1]).

D'un point de vue mathématique, l'attractivité d'une passe à poissons peut être exprimée comme le rapport entre le nombre de poissons qui s'engagent dans la passe et le nombre de poissons total présent à l'aval de la passe. Le taux d'attractivité est donc exprimé ainsi :

$$\text{Taux d'attractivité [\%]} = \frac{\# \text{ poissons engagés dans la passe}}{\# \text{ poissons total à l'aval}} \quad (7.1)$$

La maquette de la passe de Rivière est un modèle réduit, ce qui signifie que les bassins amont et aval sont des représentations de portions de la rivière. En réalité, le poisson aura le libre choix de demeurer à l'amont ou à l'aval tandis qu'ici son périmètre est délimité.

Il reste à définir de façon claire ce que représentent les nombres de poissons de la définition de l'attractivité [équ. 7.1] dans le cadre des expérimentations. Le nombre de poissons total à l'aval est le nombre de poissons introduits dans le bassin aval dont les dimensions sont approximativement de 2.3 x 3.6 [m]. Ce nombre sera de 50 ou 40 individus suivant les essais.

Le nombre de poissons engagés dans la passe est défini comme le nombre de poissons captés au seuil S6 dont la position est rappelée à la Figure [4.16]. L'antenne du système RFID associée à ce seuil est numérotée 32. La raison de choisir ce seuil S6 et pas le seuil S7 qui marque pourtant le début de la passe se justifie par la sensibilité des antennes. En effet, lorsqu'un poisson s'approche d'une antenne, il n'est pas possible de certifier que ce dernier a traversé complètement l'échancrure ou s'il a simplement été capté devant celle-ci. Le calibrage des antennes est défini de telle manière qu'un individu se présentant devant le seuil sera comptabilisé dans les données recueillies de façon identique à un poisson qui franchit complètement l'antenne. Ceci impacte donc également le chiffrage du taux d'attractivité de la passe.

Résultats par individu

Sur les 9 essais réalisés, il a fallu éliminer les résultats obtenus aux tests 2 et 9 (dans l'ordre chronologique des expériences) afin de ne pas biaiser les résultats. En effet, lors du test 2 avec le dispositif opacifié, un obstacle est venu bloquer l'accès de la passe au niveau du seuil S6. Un morceau de duct tape s'est décollé et a obstrué partiellement l'échancrure. En l'absence de système vidéo, il est impossible de dire si ce paramètre a influencé la remontée des individus. Nous avons décidé de ne pas prendre ce test en considération. A propos du test 9, un autre problème est survenu, ce qui a rendu la lecture des résultats difficile. Des fusibles des boîtiers ont grillé, ce qui s'est traduit par un recensement partiel des résultats dans le fichier de données. Ici aussi nous avons décidé de ne pas considérer les résultats de ce test.

En supprimant les expériences 2 et 9, le nombre d'expériences n'est pas identique par configuration étudiée. Les données de trois expériences de 48h sont disponibles pour le dispositif brut tandis que seulement deux expériences sont utilisables pour les dispositifs

opacifié et ombragé. Afin de pouvoir mettre les trois cas de figure en parallèle, les chiffres obtenus pour le cas brut seront multipliés par un coefficient multiplicateur de 2/3. Ceci revient à comparer les trois types d'expérience sur la même base de deux tests de 48h chacun.

Cette analyse s'intéresse à l'attractivité de chaque poisson indépendamment de la période du jour. Les résultats obtenus ne permettent pas de différencier l'influence de chaque dispositif mais bien de donner une première tendance de l'attractivité de la passe par individu. Comme expliqué plus haut, les résultats d'attractivité sont définis pour un individu capté au seuil S6 permettant d'affirmer avec certitude que le poisson s'est engagé dans la passe. Une comparaison est faite avec le taux d'attractivité obtenu sur le seuil S7 pris comme référence. La Figure [7.1] illustre cela graphiquement.

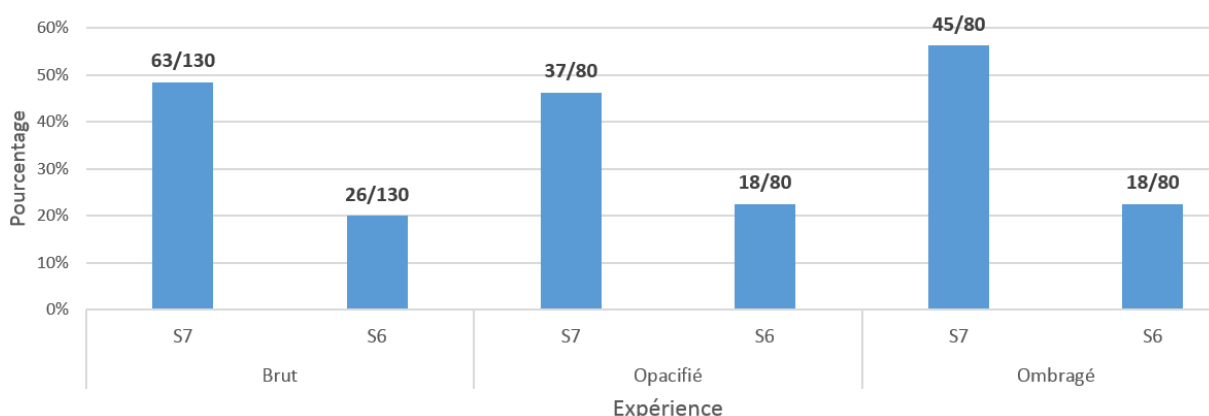


FIGURE 7.1 – Taux d'attractivité par individu en fonction du dispositif étudié.

Parallèlement au taux d'attractivité obtenu juste avant, il est possible d'illustrer le fait que les individus peuvent également être attirés par le canal d'attrait. Un contraste entre les individus attirés par la passe elle-même et ce canal est illustré à la Figure [7.2]. A nouveau les résultats mettent en avant des premières tendances. Ils ne garantissent pas le franchissement de l'échancrure mais bien le fait que le poisson ait été détecté aux abords de l'entrée de la passe ou du canal d'attrait. Les résultats chiffrés sont présentés au Tableau [7.1] et sont recensés sur deux cycles complets soit une période de 48h.

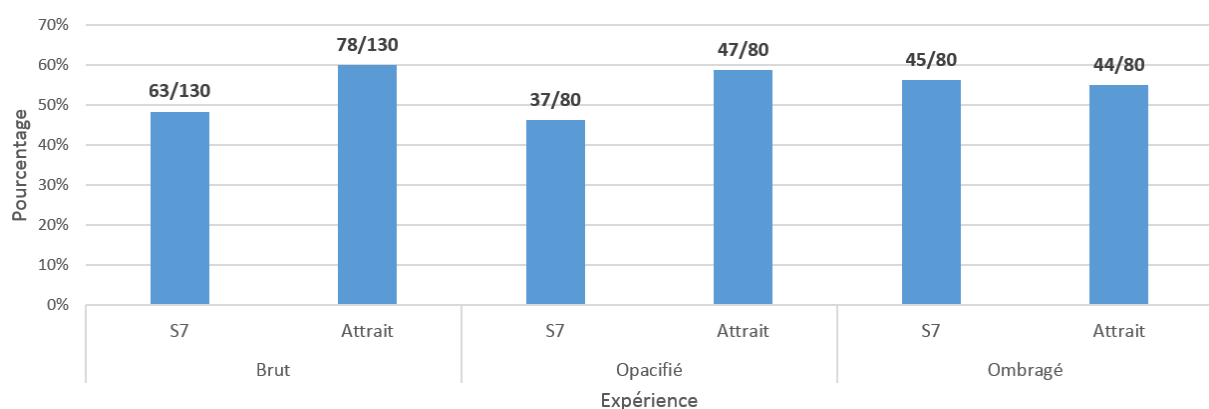


FIGURE 7.2 – Comparatif du taux d'attractivité entre la passe à bassins et le canal d'attrait.

Dispositif brut			Dispositif opacifié			Dispositif ombragé		
S6	S7	Attrait	S6	S7	Attrait	S6	S7	Attrait
26/130	63/130	78/130	18/80	37/80	47/80	18/80	45/80	44/80
20%	48%	60%	23%	46%	59%	23%	56%	55%

TABLE 7.1 – Résultats chiffrés du taux d’attractivité obtenu par individu.

Influence de l’ombrage

Afin d’observer une influence de l’ombrage, il est nécessaire d’étudier les mouvements opérés durant la période de jour, voire les périodes de transition entre jour et nuit. En effet, l’impact de l’opacité des parois ou du recouvrement de la passe par un dispositif d’ombrage doit être pris en compte exclusivement pendant les périodes d’éclairement puisque ceux-ci n’ont pas d’effet durant la nuit. Les conditions d’essais ne se modifient en effet pas, selon que la passe soit recouverte ou non pendant une période obscure. Le nombre de passages au seuil S6 est comptabilisé indépendamment pour chaque dispositif. Un graphique distinguant les passages sous chaque condition d’essai est représenté à la Figure [7.3].

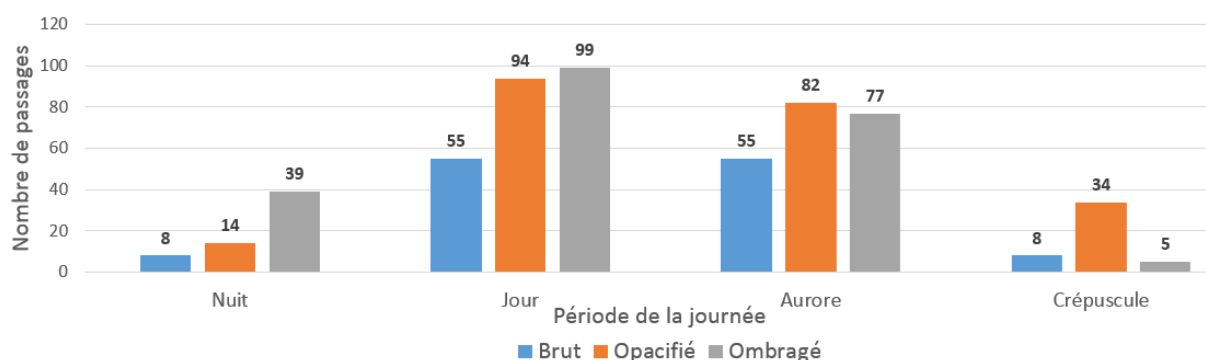


FIGURE 7.3 – Graphique de l’influence du dispositif d’ombrage sur le nombre total de passages captés au seuil S6.

	Dispositif Brut	Dispositif Opacifié		Dispositif Ombragé	
	Passages	Passages	Gain	Passages	Gain
Nuit	8	14	+175%	39	+488%
Jour	55	94	+171%	99	+180%
Aurore	55	83	+149%	77	+140%
Crépuscule	8	34	+425%	5	-37.5%

TABLE 7.2 – Comparaison de l’augmentation d’attractivité en fonction du dispositif vierge pris comme référence.

Le nombre de passages en journée est plus important dans les cas des dispositifs opacifié et ombragé, sans indiquer de différence nette entre les deux conditions. Le Tableau [7.2] reprend de manière chiffrée l’augmentation du nombre de passages constatés en prenant comme référence le dispositif brut sans aucune modification. Les chiffres sont donnés en fonction de quatre périodes distinctes (le jour, la nuit, l’aurore et le crépuscule) définies à

la sous-section suivante traitant de l'influence de la période du jour.

Enfin, il est également concevable d'analyser l'influence du dispositif d'ombrage par individu. En d'autres termes, il est possible de se concentrer uniquement sur les mouvements effectués en journée non plus en nombre de passages mais en nombre d'individus différents captés. La mise en graphique du nombre d'individus différents attirés par la passe est montrée à la Figure [7.4].

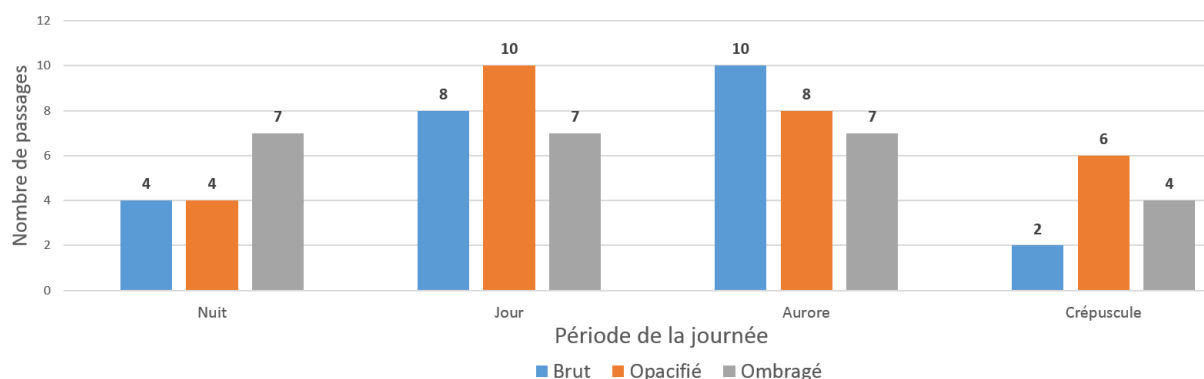


FIGURE 7.4 – Graphique de l'influence du dispositif d'ombrage sur le nombre d'individus différents captés au seuil S6.

En nombre d'individus différents captés, les résultats ne permettent pas d'observer de réelle différence entre les conditions d'essais. Aucune tendance franche ne peut être dégagée pour le comportement individuel comme renseigné par le nombre d'individus différents attirés lors de l'ensemble des expériences au Tableau [7.3]. Une proportion de la période du jour privilégiée est calculée par condition d'essais.

	Dispositif Brut		Dispositif Opacifié		Dispositif Ombragé	
	Nombre	%tage	Nombre	%tage	Nombre	%tage
Nuit	4	16.7%	4	14.3%	7	28.0%
Jour	8	33.3%	10	35.7%	7	28.0%
Aurore	10	41.7%	8	28.6%	7	28.0%
Crépuscule	2	8.3%	6	21.4%	4	16.0%
Total	24	100%	28	100%	25	100%

TABLE 7.3 – Nombre d'individus différents captés au seuil S6 en fonction de la période du jour.

Influence de la période du jour

Pour classer une journée de 24h en différentes périodes, des choix ont été opérés. La période de **jour** en condition d'éclairage est définie entre **8h et 18h**. La période de **nuît**, qui se déroule lorsqu'aucun éclairage n'est présent, se passe de **20h à 6h**. Entre les conditions de jour et les conditions de nuit, des périodes de transition s'opèrent. Elles sont plus longues que la période d'allumage et d'extinction de 30 minutes chacune afin de tenir

compte de l'horloge interne des individus. L'**aurore** s'opère entre **6h et 8h** tandis que le **crépuscule** s'étend de **18h à 20h**. L'ensemble de ces quatre périodes forme un cycle circadien.

Les passages réalisés ont été classés par heure afin d'observer le comportement général des tacons. La Figure [7.5] reprend le nombre de passages horaire pour chaque condition d'essai. Ce graphe montre qu'un certain nombre de poissons privilégie les moments de la journée qui font la transition entre le jour et la nuit. Un certain pic de passages est observé à l'aurore qui précède la période de jour. Cette constatation est identique pour les trois conditions d'essais dans des proportions différentes. Une distinction graphique individuelle des trois conditions d'essais est reprise à l'Annexe [D.1].

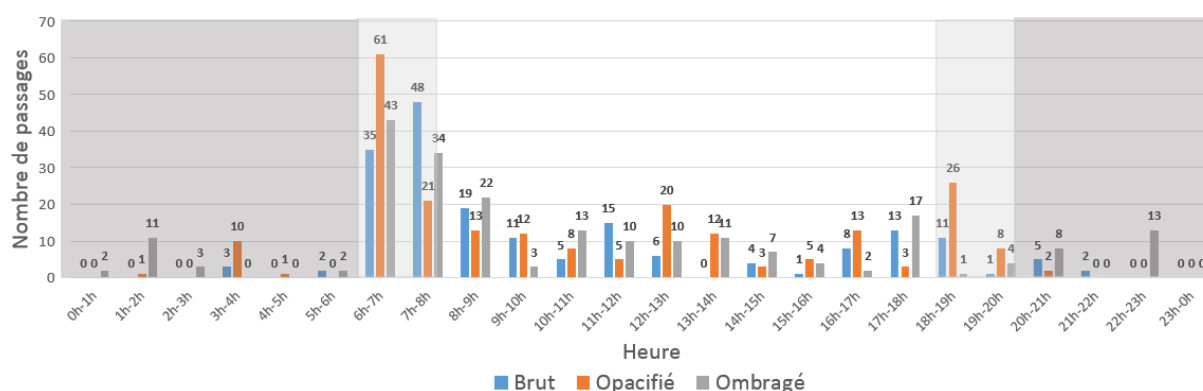


FIGURE 7.5 – Graphique du nombre de passages captés au seuil S6 en fonction de l'heure de la journée.

Afin de comparer la proportion de passages effectués pendant le jour, la nuit, l'aurore et le crépuscule, il a été jugé utile de ramener le nombre de passages par heure. Ainsi, la Figure [7.6] illustre de manière graphique le nombre de fois qu'un individu est capté au seuil S6 par heure en fonction de la période de la journée. Une nette tendance se dégage de ce graphique. Le saumon juvénile est plus attiré par la passe durant l'aurore, c'est-à-dire entre la transition nuit-jour. Une observation du même ordre ne se vérifie pas pour la période du crépuscule.

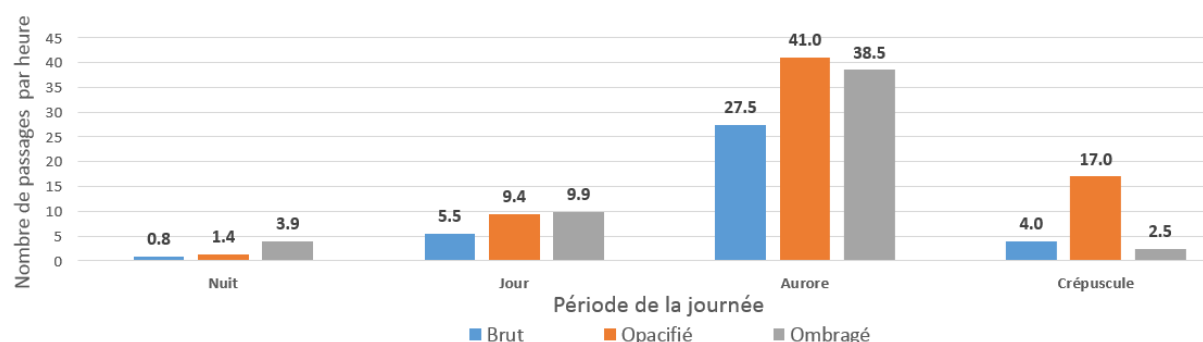


FIGURE 7.6 – Graphique du nombre de passages captés par heure au seuil S6 en fonction de la période de la journée.

Distribution

Sur base des données collectées, il est possible de mettre en évidence les distributions de taille et de poids des individus attirés par la passe. Ces distributions sont comparées aux distributions de l'échantillon total. Afin de les tracer, il est d'abord utile de calculer les variables de l'échantillon de poissons attirés. Ces valeurs sont données au Tableau [7.4] et ne font pas la distinction entre les différents dispositifs d'ombrage.

Taille [mm]				Poids [g]			
Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
124.7	10.6	105	157	21.8	5.6	13.6	42.7

TABLE 7.4 – Valeurs caractéristiques de l'échantillon des tacons attirés par la passe.

La comparaison de ces distributions avec celles de l'échantillon total (Figure [7.7]) montre qu'il n'existe pas de grande différence entre celles-ci. La taille moyenne des individus attirés est équivalente au lot total. Ce n'est pas étonnant puisque les travaux menés précédemment sur les saumons juvéniles ont montré que la gamme de taille utilisée (entre 10 et 15 [cm]) est celle qui répond le mieux aux dimensions actuelles du modèle réduit. Cela signifie que l'échantillon étudié possède des caractéristiques comportementales relativement similaires d'un individu à l'autre. En ce qui concerne l'étendue des poids, la moyenne est légèrement inférieure à celle de l'échantillon total. Ceci se traduit par le léger décalage des distributions statistiques. L'échantillon des poissons attirés par la passe est donc représentatif de l'échantillon total des tacons.

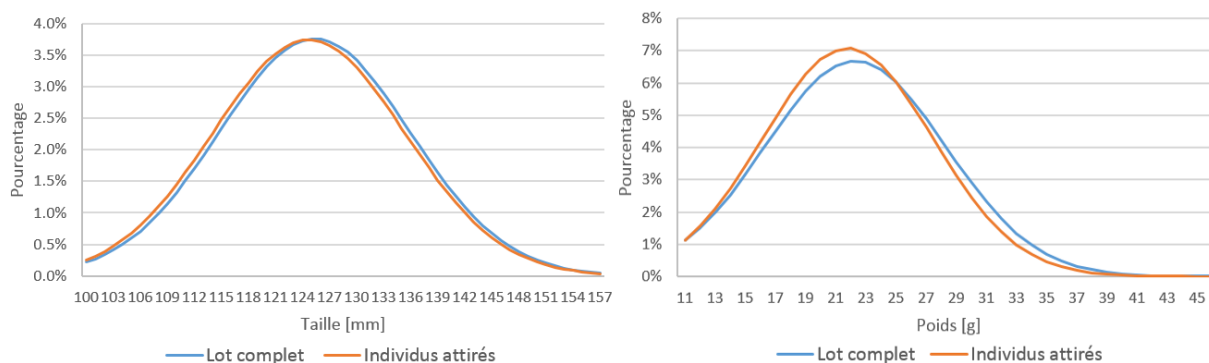


FIGURE 7.7 – Distributions statistiques de la taille et du poids des individus attirés par la passe à bassins.

7.1.2 Franchissabilité

Définitions

Outre l'attractivité, la franchissabilité est également une variable essentielle pour le dimensionnement d'une passe à poissons. Les deux concepts doivent être étudiés en parallèle afin de rendre compte de l'efficacité ou non d'un ouvrage de franchissement.

Pour chiffrer la franchissabilité, il est utile de la définir d'un point de vue mathématique. Le taux de franchissabilité d'une passe à poissons peut se caractériser comme le rapport

existant entre le nombre de poissons qui arrivent à remonter complètement la passe et le nombre total de poissons qui s'est engagé dans la passe. Cette proportion peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\text{Taux de franchissabilité } [\%] = \frac{\# \text{ poissons ayant traversé la passe}}{\# \text{ poissons engagés dans la passe}} \quad (7.2)$$

Afin de transposer cette définition [éq. 7.2] au cas du modèle réduit, il faut délimiter les deux facteurs qui la composent. Le nombre de poissons qui s'est engagé dans la passe sera égal au nombre de poissons détectés au seuil S6. La raison de ce choix est identique à celle avancée pour la définition de l'attractivité et provient de la sensibilité prédéfinie des antennes RFID. Le deuxième terme qui englobe les poissons ayant traversé la passe peut se traduire comme le nombre de poissons captés au dernier seuil du dernier bassin, le seuil S1 (Figure [4.16]). Dans la pratique, cette condition ne suffit pas puisqu'il faut que le poisson traverse la dernière portion de la passe afin d'atteindre l'amont de la rivière. Sur le modèle réduit, l'amont de la rivière est symbolisé par un bassin amont rectangulaire de dimensions 1.3 [m] x 2.15 [m].

Partant des définitions de l'attractivité [éq. 7.1] et de la franchissabilité [éq. 7.2], il est possible de définir un taux d'efficacité général de la passe à poissons. Celui-ci représente le rapport entre le nombre de poissons ayant réussi à remonter la passe et le nombre de poissons total présent à l'aval. Mathématiquement, cela revient à multiplier les taux de franchissabilité et d'attractivité :

$$\begin{aligned} \text{Taux d'efficacité } [\%] &= \text{Taux d'attractivité} \cdot \text{Taux de franchissabilité} \\ &= \frac{\# \text{ poissons engagés dans la passe}}{\# \text{ poissons total à l'aval}} \cdot \frac{\# \text{ poissons ayant traversé la passe}}{\# \text{ poissons engagés dans la passe}} \\ &= \frac{\# \text{ poissons ayant traversé la passe}}{\# \text{ poissons total à l'aval}} \end{aligned}$$

Ce taux d'efficacité symbolise le nombre de poissons qui sera en mesure de passer au-delà d'un obstacle à l'aide d'un ouvrage de franchissement. Il permet d'englober à la fois les concepts d'attractivité et de franchissabilité qui définissent le bon dimensionnement ou non d'une passe à poissons.

A nouveau, comme ce fut le cas pour l'étude de l'attractivité, le franchissement de la passe sera évalué en se basant sur deux critères. Le taux de franchissement sera calculé à la fois sur base de l'activité des poissons et de leur comportement individuel. Cela signifie que les résultats se pencheront dans un premier temps sur le nombre de mouvements captés aux antennes RFID et ensuite sur la remontée propre à chaque spécimen.

Résultats par individu

Comme pour l'analyse de l'attractivité de la passe, une étude générale va être effectuée pour l'ensemble des individus sur la totalité de l'expérience. Nous nous pencherons sur l'influence de l'ombrage et de la période du jour privilégiée pour le franchissement. Afin de donner un aperçu du nombre de poissons capables de franchir la passe, un recensement du seuil le plus éloigné atteint pour chaque individu a été effectué. Ce résultat est visible au graphique de la Figure [7.8].

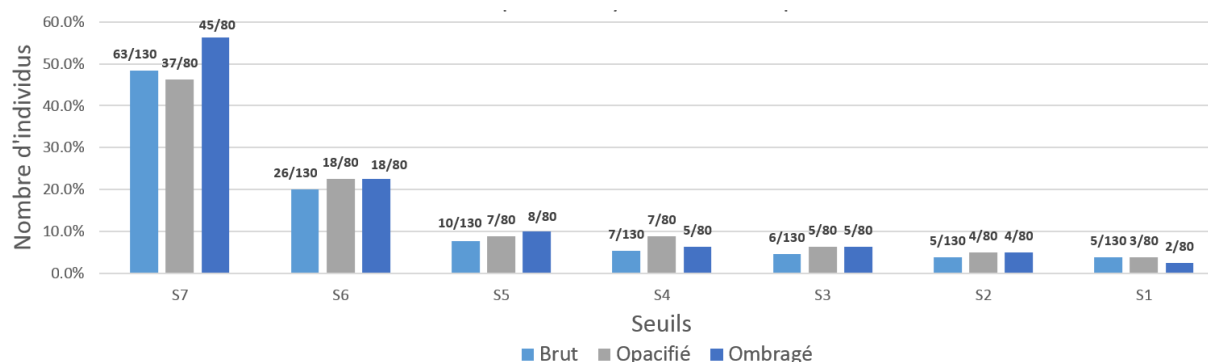


FIGURE 7.8 – Nombre de tacons captés à chaque seuil de la passe en fonction du dispositif d’ombrage.

Ce graphique montre une certaine décroissance de type exponentielle du passage de seuil à seuil mais n’indique pas de différence marquée entre le pourcentage d’individus captés à chaque seuil selon le type de configuration analysée. Les résultats chiffrés de cette constatation sont rassemblés au Tableau [7.5]. Ils confirment que la proportion de poissons capables de franchir chaque seuil est équivalent d’un dispositif à l’autre. Les moments de la journée empruntés pourraient différer. Ils feront l’objet des graphiques suivants.

Seuil	Attrait	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1
Dispositif Brut	78/130	63/130	26/130	10/130	7/130	6/130	5/130	5/130
	60.0%	48.5%	20.0%	7.7%	5.4%	4.6%	3.8%	3.8%
Dispositif Opacifié	47/80	37/80	18/80	7/80	7/80	5/80	4/80	3/80
	58.8%	46.3%	22.5%	8.8%	8.8%	6.3%	5.0%	3.8%
Dispositif Ombragé	44/80	45/80	18/80	8/80	5/80	5/80	4/80	2/80
	55.0%	56.3%	22.5%	10.0%	6.3%	6.3%	5.0%	2.5%

TABLE 7.5 – Pourcentage du nombre de poissons ayant atteint chaque seuil selon chaque configuration étudiée.

Notons également que les taux d’efficacité de la passe, notés en gras pour chaque cas de figure, sont inférieurs à 5%, ce qui est relativement très peu élevé. Ils représentent le nombre de poissons introduits à l’aval ayant franchi la totalité de la passe sur une durée de 48h, soit deux cycles circadiens.

Influence de l’ombrage

Afin de mettre en avant une éventuelle influence du dispositif d’ombrage sur le nombre de remontées, les mouvements détectés au niveau des différents seuils ont été comptés. Cette façon de procéder a permis d’exploiter le fichier de données collectées. Les mouvements opérés au sein de la passe permettent de voir si l’activité des individus augmente lorsqu’un dispositif d’ombrage est placé. Au vu des résultats rassemblés (Figure [7.9]), il semble que les dispositifs d’ombrage augmentent l’activité des individus au niveau des premiers seuils.

Cette tendance n'est pas vérifiable pour les derniers seuils en raison du peu d'individus différents captés plus haut dans le modèle. Les résultats des trois autres périodes de la journée (nuit, aurore et crépuscule) sont présentés à l'Annexe [D.2].

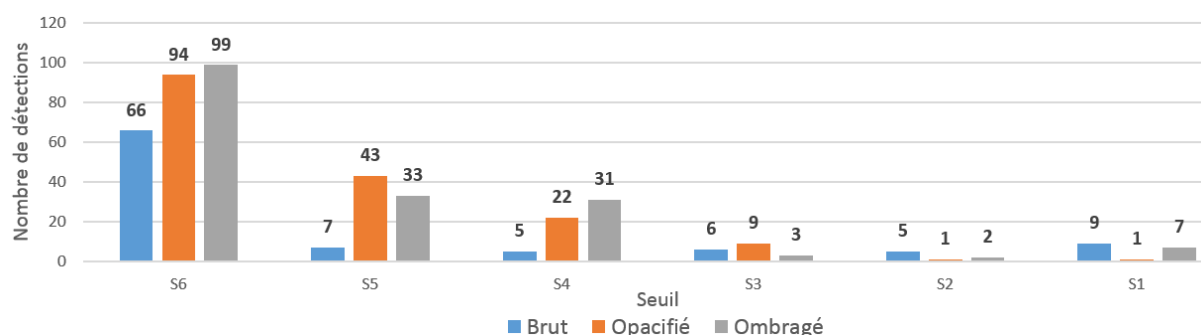


FIGURE 7.9 – Nombre de détections obtenues par seuil durant la période de jour en fonction du dispositif d'ombrage.

Une comparaison est faite entre la proportion de détections faites en journée et le nombre total de détections sur la totalité d'un cycle circadien. L'évolution de ces pourcentages est illustré au Tableau [7.6]. Plus de passages sont constatés pour les trois premiers seuils pour les dispositifs opacifié et ombragé. Il n'est cependant pas possible de dégager une tendance claire.

	Seuil S6			Seuil S5			Seuil S4		
Cas	Brut	Opaque	Ombré	Brut	Opaque	Ombré	Brut	Opaque	Ombré
Jour	66	94	99	7	43	33	5	22	31
Total	159	224	220	40	137	99	25	86	73
%tage	42%	42%	45%	18%	31%	33%	20%	26%	42%

	Seuil S3			Seuil S2			Seuil S1		
Cas	Brut	Opaque	Ombré	Brut	Opaque	Ombré	Brut	Opaque	Ombré
Jour	6	9	3	5	1	2	9	1	7
Total	23	29	16	19	10	12	31	16	13
%tage	26%	31%	19%	26%	10%	17%	29%	6%	54%

TABLE 7.6 – Proportion du nombre de détections recensées en journée pour les trois dispositifs étudiés.

Influence de la période du jour

Une analyse de la période privilégiée d'activité au niveau des différents seuils a été établie. Les Figures [7.10], [7.11] et [7.12] illustrent cela respectivement pour les cas brut, opacifié et ombragé. Une légère tendance peut être dégagée de ces graphiques. Il semble que pour le cas brut, l'activité en journée est inférieure à l'activité à l'aurore. Ce phénomène s'inverse globalement pour les cas opacifié et ombragé. En effet, le nombre de détections recensées en journée est inférieur au nombre de détections constatées à l'aurore pour le cas brut. Les bâtonnets orange dépassent les bâtonnets gris pour les deux autres types de configuration, du moins pour les seuils auxquels plus de passages sont captés par

les antennes. Néanmoins, la différence n'est pas significative et ne permet donc pas de généraliser cette observation.

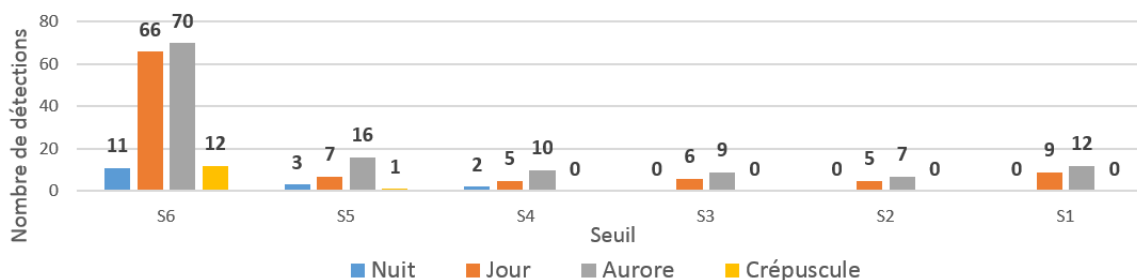


FIGURE 7.10 – Nombre de détections recensées par période de la journée pour le dispositif brut.

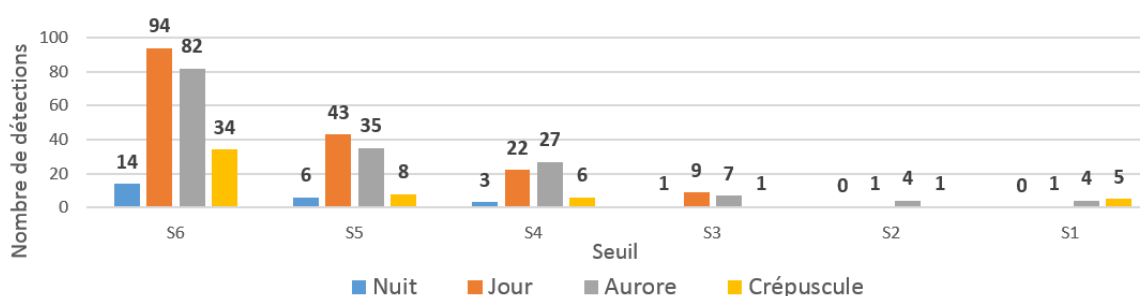


FIGURE 7.11 – Nombre de détections recensées par période de la journée pour le dispositif opacifié.

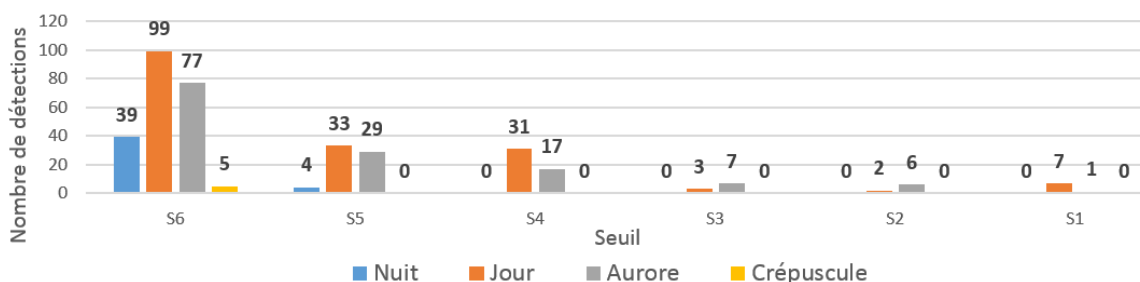


FIGURE 7.12 – Nombre de détections recensées par période de la journée pour le dispositif ombragé.

Franchissements partiels

Sur l'ensemble des essais, peu de franchissements complets ont été constatés. Dès lors, nous avons estimé utile de compter le nombre de franchissements partiels effectués par les saumons. Ceux-ci ont été comptabilisé pour deux cas de figure : le franchissement d'au moins deux ou d'au moins trois échancrures successives. Ceci correspond donc à une traversée respective de trois ou quatre bassins. Le nombre de tentatives de remontées est représenté à la Figure [7.13].

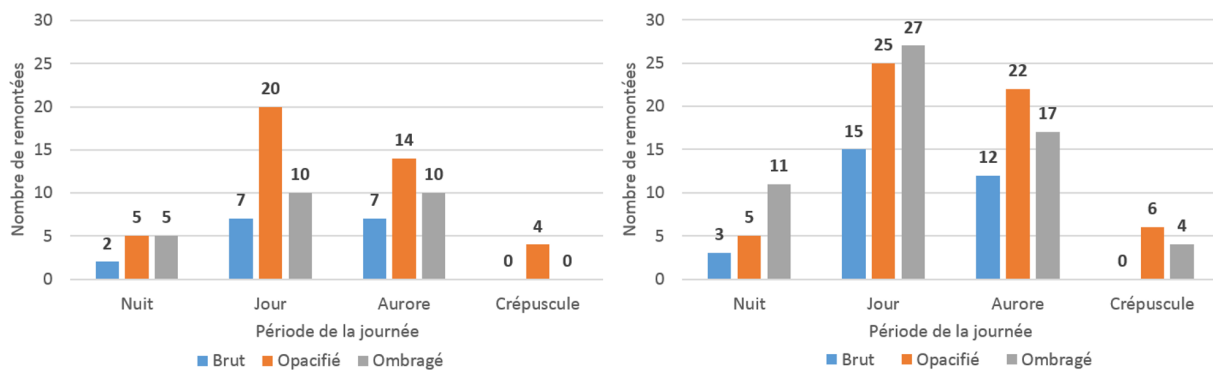


FIGURE 7.13 – Nombre d’amorces de franchissements partiels en fonction de la période du jour pour chaque dispositif.

Pour ces deux graphiques, une augmentation du nombre de tentatives de franchissement est constatée pendant la période de jour pour les dispositifs dotés d’un système d’ombrage. Afin de chiffrer cette augmentation, une comparaison est établie au Tableau [7.7]. Ce dernier reprend également le nombre de franchissements partiels repris par heure. La période de l’aurore reste privilégiée par les jeunes saumons en termes de détection horaire. Le pourcentage de passages en journée ne semble pas considérablement varier d’un dispositif à l’autre.

Franchissements de 4 bassins		Nuit	Jour	Aurore	Crépuscule
Cas Brut	Passages :	2/16	7/16	7/16	0/16
	Passages horaires :	0.2/h	0.7/h	3.5/h	0.0/h
	Pourcentage :	12.5%	43.8%	43.8%	0.0%
Cas Opacifié	Passages :	5/43	20/43	14/43	4/43
	Passages horaires :	0.5/h	2.0/h	7.0/h	2.0/h
	Pourcentage :	11.6%	46.5%	32.6%	9.3%
Cas Ombragé	Passages :	5/25	10/25	10/25	0/25
	Passages horaires :	0.5/h	1.0/h	5.0/h	0.0/h
	Pourcentage :	20.0%	40.0%	40.0%	0.0%

Franchissements de 3 bassins		Nuit	Jour	Aurore	Crépuscule
Cas Brut	Passages :	3/30	15/30	12/30	0/30
	Passages horaires :	0.3/h	1.5/h	6.0/h	0.0/h
	Pourcentage :	10.0%	50.0%	40.0%	0.0%
Cas Opacifié	Passages :	5/58	25/58	22/58	6/58
	Passages horaires :	0.5/h	2.5/h	11.0/h	3.0/h
	Pourcentage :	8.6%	43.1%	37.9%	10.3%
Cas Ombragé	Passages :	11/59	27/59	17/59	4/59
	Passages horaires :	1.1/h	2.7/h	8.5/h	2.0/h
	Pourcentage :	18.6%	45.8%	28.8%	6.8%

TABLE 7.7 – Comparaison du nombre de franchissements partiels amorcés en fonction du dispositif d’ombrage et de la période du jour.

Durée de remontée

Le peu de franchissements complets constaté ne permet pas d'établir une tendance franche sur le temps de remontée des individus. Pour l'ensemble des expériences, 14 tacons sont parvenus à atteindre l'amont du modèle réduit. Le nombre cumulé de montaisons recensées est de 19. La proportion du nombre de remontées chiffrée par individu est indiquée à la Figure [7.14].

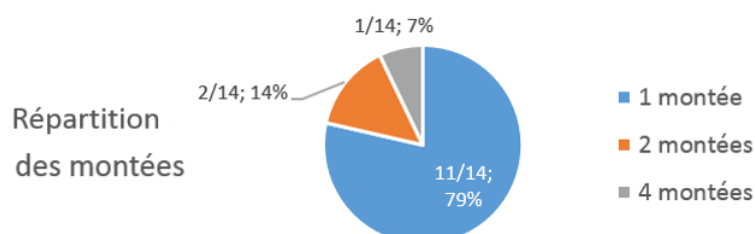


FIGURE 7.14 – Proportion du nombre de montées effectuées par individu toutes dispositions confondues.

Des outils statistiques ont permis de constituer des box-plots reprenant le temps moyen de remontée par condition d'essai (Figure [7.15]). Cependant, le peu de résultats à disposition n'a pas permis de dégager une tendance affirmée. Les valeurs chiffrées ayant permis d'établir ces box-plots sont reprises au Tableau [7.8]. Elles ont été déterminées de façon automatique au moyen du logiciel Excel et permettent de mettre en évidence l'étendue relativement élevée qui existe au sein des temps de remontée.

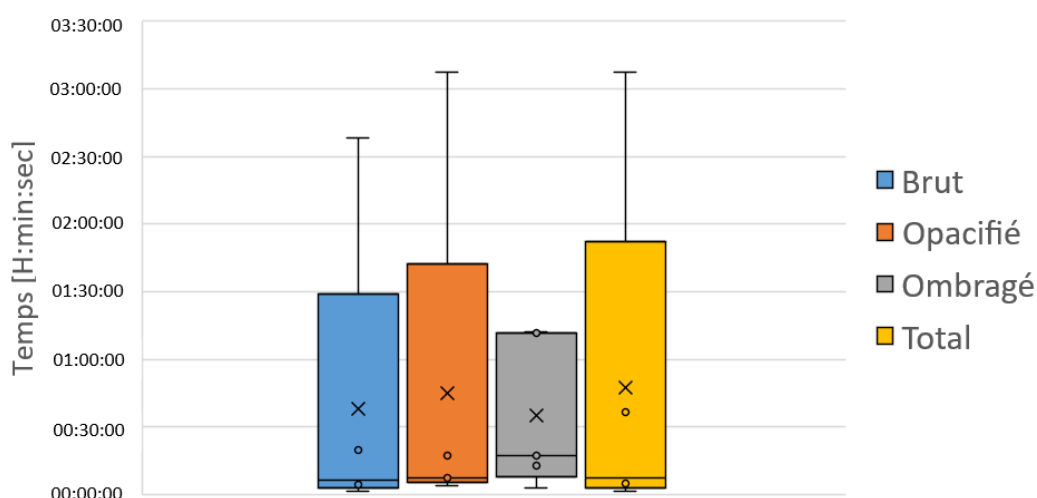


FIGURE 7.15 – Représentation graphique du temps moyen de remontée en fonction du dispositif d'ombrage.

Il a été décidé d'utiliser des box-plots pour représenter graphiquement les temps moyens de remontée en raison de leur large étendue autour de leur moyenne. En effet, puisque la plage de temps de remontée est assez importante, il n'est pas pertinent de les caractériser par une seule valeur. Pour la suite de ce chapitre, la justification de l'utilisation des box-plots pour représenter graphiquement des résultats sera identique à celle énoncée ci-dessus. Pour l'ensemble des box-plots utilisés dans ce mémoire, le cercle inférieur représente le quartile 25 % (Q1 dans le Tableau [7.8]), la ligne avec un cercle représente la médiane (quartile 50 % ou Q2) et le cercle supérieur représente le quartile 75 % (Q3 dans le Tableau

[7.8]). Les traits inférieur et supérieur représentent respectivement les valeurs minimale et maximale du jeu de données. La croix représente la moyenne.

	Min.	Q 1	Médiane	Q 3	Max.	Moy.	Etendue
Brut	00:01:33	00:04:23	00:06:10	00:18:53	02:31:50	00:27:50	02:30:17
Opacifié	00:03:55	00:07:07	00:07:15	00:16:55	02:59:54	00:43:01	02:55:59
Ombragé	00:03:09	00:12:12	00:16:33	01:08:38	01:09:14	00:33:57	01:06:05
Total	00:01:33	00:04:43	00:07:15	00:35:10	02:59:54	00:33:26	02:58:21

TABLE 7.8 – Valeurs caractéristiques permettant d’élaborer des box-plots des temps de remontée.

Le laps de temps nécessaire au franchissement complet de l’ouvrage varie assez fortement d’un individu à l’autre. Une distinction a donc été faite de manière arbitraire sur base des résultats obtenus par [Pyper \(2015\)](#). Les remontées qui ne semblaient pas être entrecoupées de période de repos ont été compilées par expérience et mises en graphe (Figure [7.16]).

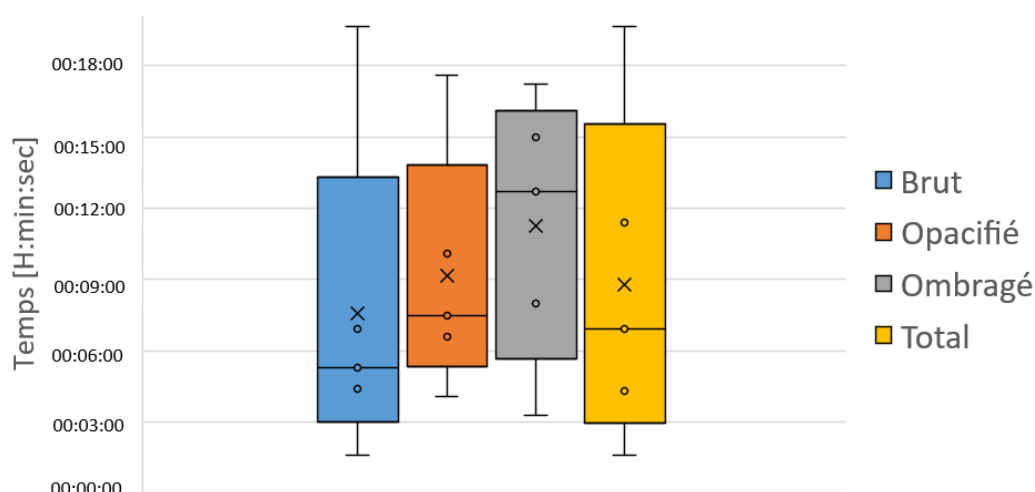


FIGURE 7.16 – Représentation graphique du temps moyen de remontée sans période de repos en fonction du dispositif d’ombrage.

Les valeurs chiffrées permettant d’obtenir ce graphique sont indiquées au Tableau [7.9]. Le temps de remontée moyen augmente légèrement lorsque la passe est plus ombragée. En raison du faible nombre de données obtenues, rien ne pourra être conclu sur base de ces résultats. Le nombre de données à disposition pour les remontées alternées par des moments de repos ne sont pas assez nombreuses pour être exploitées.

	Min.	Q 1	Médiane	Q 3	Max.	Moy.	Etendue
Brut	00:01:33	00:04:13	00:05:03	00:06:38	00:18:53	00:06:45	00:17:20
Opacifié	00:03:55	00:06:19	00:07:11	00:09:40	00:16:55	00:08:48	00:13:00
Ombragé	00:03:09	00:07:40	00:12:12	00:14:22	00:16:33	00:10:38	00:13:24
Total	00:01:33	00:04:07	00:06:38	00:10:57	00:18:53	00:08:10	00:17:20

TABLE 7.9 – Synthèse des temps de remontée moyens sans longue période de repos.

Compétition entre individus

Un dernier paramètre qui n'a pas encore été exploré porte sur le temps que passent certains individus dans chaque bassin. Afin de mettre en lumière ce phénomène, la question d'une éventuelle compétition entre individus a été avancée. Cette sous-section reprendra donc des graphiques illustrant le trajet complet de certains individus dans la passe lorsqu'ils s'y rencontrent. Des diagrammes dits en *chemins de fer* ont été utilisés afin de suivre le parcours simultané de plusieurs individus. L'itinéraire est basé sur les détections captées à chaque seuil. Par souci de facilité, le seuil de l'entrée du canal d'attrait est noté S8. L'analyse des diagrammes illustre le phénomène de compétition qui peut exister entre individus.

Les Figures [7.17], [7.18], [7.19] et [7.20] reprennent de manière non exhaustive certains comportements recensés. Chaque graphique provient d'une expérience différente et les mêmes observations sont constatées pour chaque type de dispositif d'ombrage (brut, opacifié, ombragé).

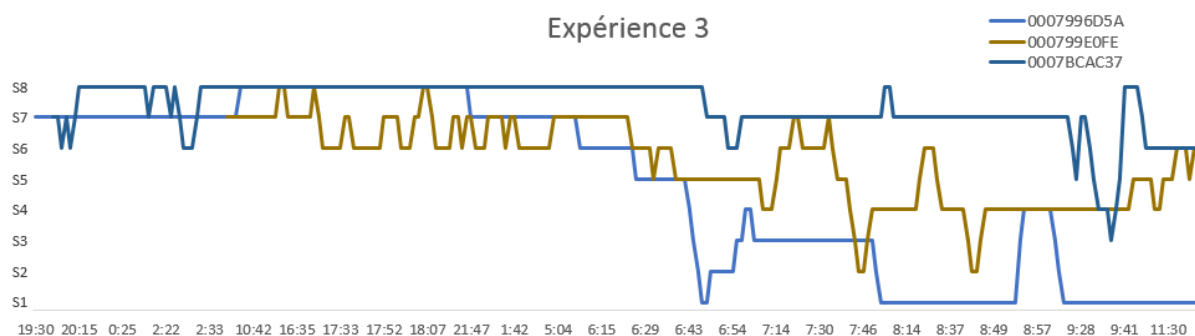


FIGURE 7.17 – Evolution du parcours de trois individus lors de l'expérience 3 avec dispositif ombragé.

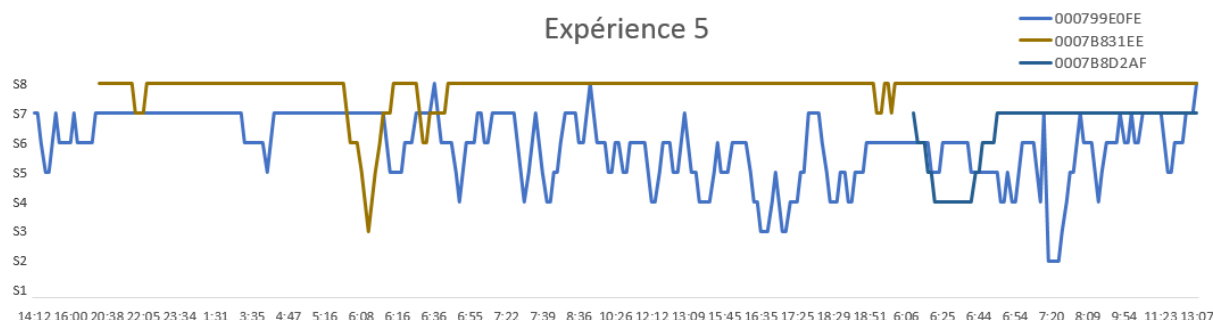


FIGURE 7.18 – Evolution du parcours de deux individus lors de l'expérience 5 avec dispositif opacifié.

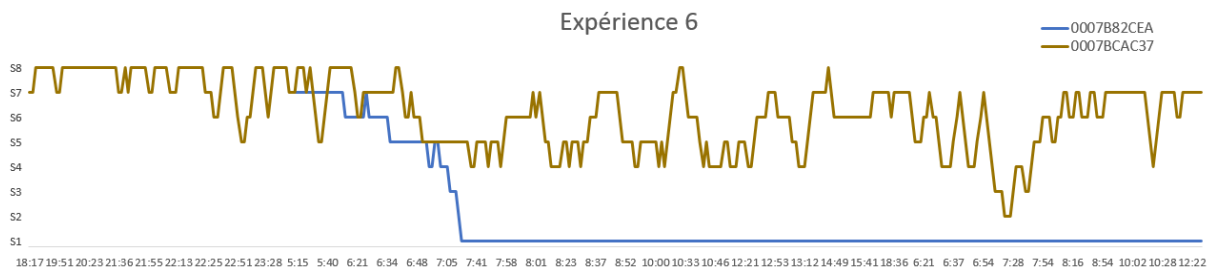


FIGURE 7.19 – Evolution du parcours de deux individus lors de l'expérience 6 avec dispositif ombragé.

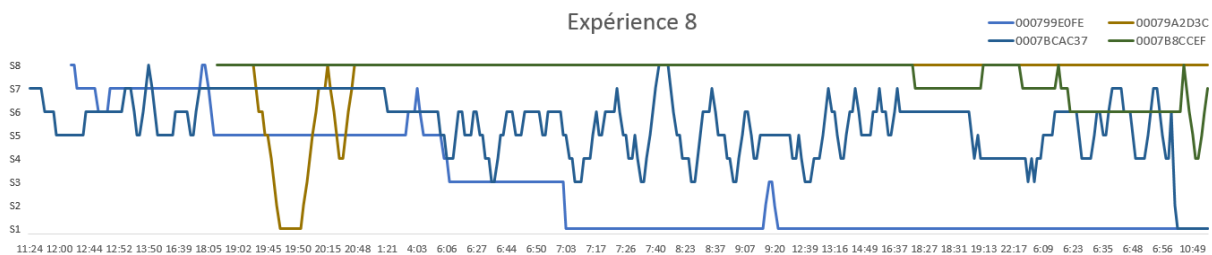


FIGURE 7.20 – Evolution du parcours de quatre individus lors de l'expérience 8 avec dispositif opacifié.

Pour l'ensemble des 4 expériences présentées ci-dessus, une tendance nette s'observe concernant le nombre d'individus présents simultanément par bassin. Il semble que les individus ne souhaitent pas rester dans le même bassin au même moment. Cela se traduit graphiquement par le fait que les périodes durant lesquelles les tracés colorés se superposent sont minimales (Figure [7.18] et [7.19]). Chaque palier correspond à une période durant laquelle le poisson demeure dans le même bassin. Ces paliers ont tendance à ne pas se superposer, ce qui indique que les individus ont la volonté d'occuper chaque bassin seul.

Une indication supplémentaire peut être faite sur ce concept de palier et de temps passé dans un bassin. Les paliers du seuil S8 correspondent à une période passée dans le bac aval. Celui-ci n'ayant pas les mêmes dimensions qu'un bassin, il ne peut être pris en compte dans cette optique de compétition entre individus. C'est par exemple le cas pour les tracés vert et or de la Figure [7.20]. Ces derniers restent superposés un long moment au niveau du seuil S8 qui symbolise le bac aval.

Ce phénomène de compétition fait donc référence au désir des individus d'occuper un certain espace territorial. Cela se manifeste par des individus qui stoppent leur remontée en attendant que l'individu situé en amont ait lui-même progressé dans un bassin supérieur. Cette observation est visible sur les graphiques précédents, notamment aux Figures [7.17] et [7.19]. Les mouvements saccadés d'allers-retours entre bassins peuvent également être associés à ce concept de compétition.

Ces images montrent aussi le fait que bon nombre d'individus sont d'abord attirés par le canal d'attrait avant de s'engager finalement dans la passe en franchissant le premier seuil S7. C'est notamment le cas du tracé or de la Figure [7.18] et du tracé bleu clair de la Figure [7.20].

Canal d'attrait

Une dernière constatation a pu être observée à l’aide du dispositif de détection placé à l’entrée du canal d’attrait. Il semblerait que certains individus soient capables de remonter non pas par la passe à bassins mais bien par le canal d’attrait. Sur les quinze individus retrouvés dans le bac amont, quatre n’ont été captés à aucune antenne de la passe alors qu’ils ont été détectés à l’entrée du canal d’attrait. Ce chiffre est proportionnellement significatif et doit être pris en compte. Une synthèse de ces observations est mentionnée au Tableau [7.10].

Passe à bassins			Canal d'attrait		
Brut	Opacifié	Ombragé	Brut	Opacifié	Ombragé
3	4	4	2	0	2
Total : 11/15 ≈ 73%			Total : 4/15 ≈ 27%		

TABLE 7.10 – Proportion du nombre d’individus ayant franchi la passe via le canal d’attrait.

Une illustration graphique de ce phénomène est montrée à la Figure [7.21] qui représente l’évolution du trajet de deux individus. Le comportement compétitif entre individus est observable et ces derniers sont directement captés du canal d’attrait au dernier seuil de la passe. La seule possibilité est d’avoir emprunté le canal d’attrait.

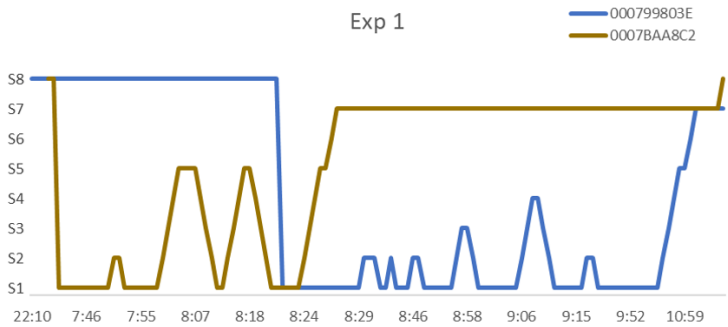


FIGURE 7.21 – Evolution du parcours de deux individus ayant remonté la passe par le canal d’attrait.

Comportement exploratoire

Au cours de l’ensemble des tests effectués, certains individus ont montré un comportement plus exploratoire que d’autres. Afin de pouvoir chiffrer ce paramètre, un graphique a été établi (Figure [7.22]). Celui-ci reprend l’ensemble des individus qui ont été attirés au moins une fois jusqu’au seuil S6 ainsi que les individus ayant franchi complètement la passe au moins une fois. Le pourcentage de spécimens attirés ou ayant franchi la passe plus d’une fois a ensuite été calculé. Les chiffres illustrent une certaine proportion d’individus répétant le même comportement exploratoire d’une expérience à l’autre. En d’autres termes, l’attractivité et la franchissabilité observées proviennent d’individus qui sont parfois les mêmes d’une expérience à l’autre.

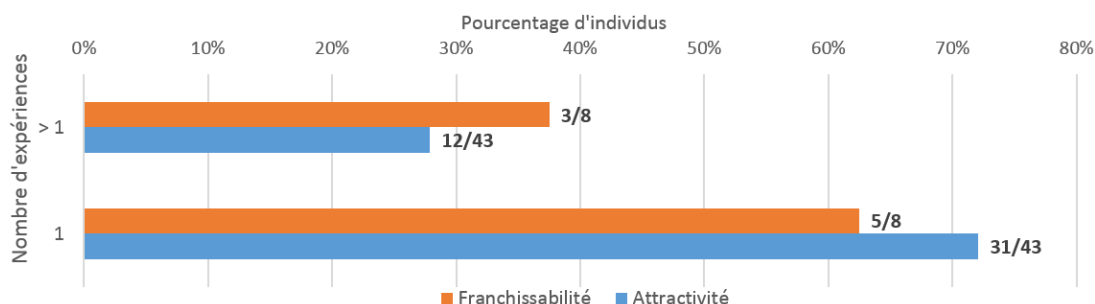


FIGURE 7.22 – Représentation graphique du comportement exploratoire des individus.

Distribution

Tout comme cela a été réalisé pour l'étude de l'attractivité, une distribution statistique de la taille et du poids des individus franchisseurs a été calculée. Afin d'étendre le nombre de données, les poissons ayant franchi partiellement la passe ont également été comptabilisés. Un franchissement partiel est considéré lorsqu'un individu a été détecté au seuil S4 et qu'il a donc au minimum atteint le bassin P3 situé à mi-distance de la passe (Figure [4.16]). Les distributions obtenues sont comparées à celles de l'échantillon global d'individus afin de voir quelle tranche de celui-ci est plus susceptible de franchir l'ouvrage. Les statistiques caractéristiques de l'échantillon sont regroupées au Tableau [7.11] et ne font pas la distinction entre les différents dispositifs d'ombrage.

Taille [mm]				Poids [g]			
Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
122.9	11.0	105	157	20.5	5.8	13.6	40.7

TABLE 7.11 – Valeurs caractéristiques de l'échantillon des tacons ayant franchi partiellement ou complètement la passe.

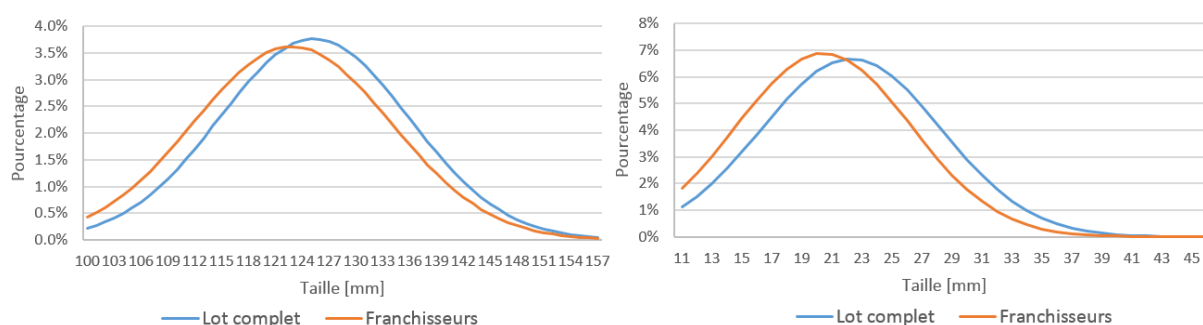


FIGURE 7.23 – Distributions statistiques de la taille et du poids des individus ayant franchi complètement ou partiellement la passe à bassins.

La comparaison de ces distributions avec celles de l'échantillon total est illustrée à la Figure [7.23]. Les courbes montrent que les individus ayant tenté une remontée sont légèrement plus petits et plus légers. Cela s'explique puisque les deux facteurs sont directement proportionnels entre eux. Toutefois, la différence n'est pas significative et prouve donc que la gamme de taille choisie est judicieuse. Les remarques concernant

l'étendue de l'échantillon sont identiques à celles faites sur les tailles des individus attirés à la sous-section précédente.

7.1.3 Mortalité

Au cours des expériences menées dans le hall d'essais, de nombreux poissons sont morts, notamment un certain nombre de juvéniles ayant réussi à s'échapper des bacs de stockage. Cependant, même si ces poissons sont retirés du bilan des morts, la mortalité reste élevée. Le nombre de saumons morts recensés au cours des expériences est rappelé au Tableau [5.6].

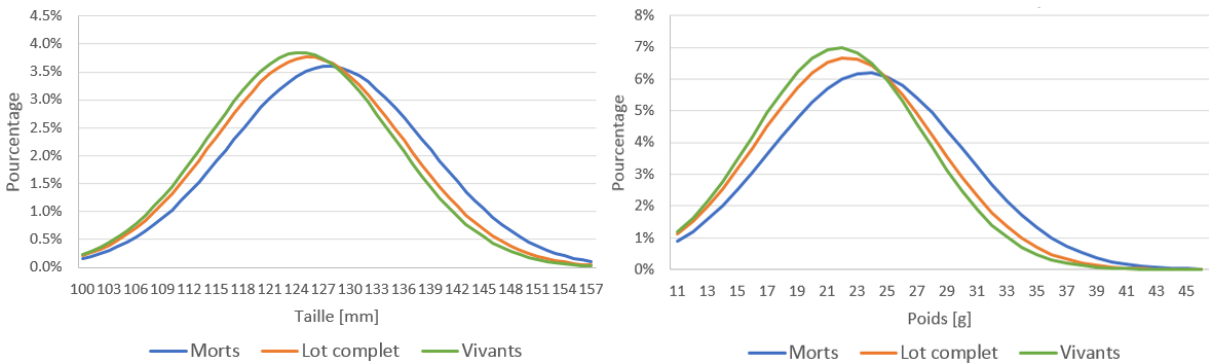


FIGURE 7.24 – Distributions statistiques de la taille et du poids des individus morts au cours des expériences.

Une distribution statistique de la taille et du poids des individus morts et vivants à l'issue des tests a été faite (Figure [7.24]). Les valeurs caractéristiques de ces distributions sont indiquées au Tableau [7.12]. Nous observons principalement que les individus morts sont statistiquement plus grands et plus lourds que la moyenne de l'échantillon. En termes de proportions, 33.1% des individus ayant participé à au moins une expérience sont morts, 9.3% n'ont pas été retrouvés et 57.6% ont survécu.

Taille des morts [mm]				Poids des morts [g]			
Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
127.5	11.1	107	157	23.7	6.4	13.8	40.7

Taille des vivants [mm]				Poids des vivants [g]			
Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
124.4	10.4	104	157	21.8	5.7	11.3	46.3

TABLE 7.12 – Valeurs caractéristiques des individus morts et vivants à l'issue des expériences.

Plusieurs éléments peuvent expliquer ce taux élevé de mortalité et ils seront traités à la sous-section [7.2.3]. Avant cela, il est possible de montrer que les individus ont perdu une grande partie de leur biomasse au cours du mois d'expériences réalisées. Les individus vivants ont été ramenés à la pisciculture d'Erezée et pesés. Ils ne présentaient aucun signe clinique. La totalité du lot pesé était de 1160 [g]. Celui-ci comprenait également les individus utilisés pour les essais préliminaires. Ceux-ci n'ayant pas été préalablement pesés,

leur poids a été posé comme égal à la moyenne du lot. Il s'agissait de quatre individus. En analysant le poids de départ des espèces ayant survécu, il est possible de dresser le bilan de la perte de biomasse (Tableau [7.13]).

Avant les tests			Après les tests		
Individus	Biomasse	Moyenne	Individus	Biomasse	Moyenne
95	2047 [g]	21.8 [g]	99	1160 [g]	11.7 [g]
Perte de masse : 46.2%			Masse résiduelle : 53.8%		

TABLE 7.13 – Analyse de la perte de biomasse au cours des expériences.

7.2 Discussion

Nous allons à présent analyser et expliquer les résultats exposés à la section précédente. Afin de faciliter la lecture, les paramètres étudiés seront repris dans l'ordre chronologique. Tout d'abord, les observations constatées sur l'attractivité seront commentées. Ensuite, les différents graphiques de la franchissabilité seront interprétés. Enfin, une analyse du taux élevé de mortalité recensée sera faite et accompagnée de pistes d'explications.

7.2.1 Attractivité

Tendance générale

Avant d'analyser l'influence du dispositif d'ombrage sur les remontées diurnes ainsi que de dégager les périodes de remontée préférentielles, nous évoquerons quelques observations globales afin de quantifier le taux d'attractivité général de la passe à poissons de Rivière. En effet, l'objectif de franchissabilité va de pair avec l'attractivité puisqu'il n'est pas possible pour un poisson de franchir la passe sans l'avoir trouvée ! Les travaux précédents se sont principalement focalisés sur la remontée des poissons et ont permis d'améliorer le franchissement des espèces benthiques à l'aide d'un substrat de fond. Cependant, malgré tous les efforts consentis à vouloir améliorer le franchissement, ceux-ci n'auront en pratique que peu d'utilité si le poisson ne peut pas trouver le premier seuil de l'ouvrage.

D'abord, penchons-nous sur le taux d'attractivité global de la passe qui ne tient pas véritablement compte du dispositif étudié. En effet, l'influence d'un dispositif d'ombrage ne peut être avérée que lors d'une période d'éclairement, c'est-à-dire en pleine journée. Le taux d'attractivité établi sur deux cycles complets de 24h est globalement similaire d'une configuration d'ombrage à l'autre. Cela signifie que d'une manière générale, le même nombre d'individus sera attiré par la passe sur un cycle circadien entier. Néanmoins, les périodes de la journée seront probablement différentes ainsi que nous le verrons lors de l'analyse des détections horaires.

Le taux d'attractivité avoisine les 20% (Tableau [7.1]) en se référant à l'approche sélectionnée qui stipule que le poisson est attiré à partir du moment où il est repéré au seuil S6. Ce chiffre a été obtenu sur une période de 48h. Dans un cas idéal, le taux d'attractivité devrait à terme atteindre un chiffre proche de 100%. La période pour atteindre

ce chiffre peut faire l'objet de discussions. Il dépendra de la tolérance permise sur le retard qu'engendre un ouvrage de franchissement sur la migration d'un poisson.

Par ailleurs, le taux d'attractivité calculé en définissant le seuil S7 comme référence fait grimper le taux d'attractivité proche de 50%. Cependant, ce chiffre est peu fiable pour deux raisons. La première est qu'il ne permet pas d'affirmer avec certitude que le poisson est entré dans la passe puisque l'antenne RFID est calibrée de façon à capter la puce lorsqu'elle est située à proximité d'elle. La seconde raison est que la portion de rivière aval définie par le modèle réduit est limitée par l'espace du hall d'essais. Le bac aval de dimensions définies n'est pas à l'échelle de la largeur de la Meuse aux abords de la ville de Rivière. La superficie étant réduite et délimitée dans l'espace, le poisson aura plus de facilité à trouver l'entrée de façon erratique que dans le cas réel.

En revanche, le débit d'attrait semble être calibré de façon adéquate puisqu'il attire plus de la moitié des poissons sur un cycle de 48h (Tableau [7.1]). Les taux d'attractivité entre le canal d'attrait et l'entrée de la passe sont proches. Cela montre qu'un poisson attiré par le débit d'attrait aura tendance à trouver l'entrée de l'ouvrage de franchissement. Ce calibrage est prometteur et prouve son efficacité puisque celui-ci est dimensionné dans ce but précis. Il reste à comparer son efficacité en présence d'un débit s'apparentant à celui de la Meuse.

Influence du dispositif d'ombrage

L'influence du dispositif d'ombrage sur l'attractivité des individus ne peut être perçue que pendant la période où son effet est perceptible, c'est-à-dire pendant la journée. Le nombre de tests opérés ne permet pas de donner des garanties et des généralités sur l'efficacité ou non d'un certain dispositif. Pour ce faire, il faudrait multiplier les répliques d'expériences. Néanmoins, une tendance peut être dégagée si l'on s'attarde sur le nombre de mouvements recensés au niveau de l'antenne placée au seuil S6.

Le nombre de passages à proximité du seuil S6 est plus grand dans le cas d'un dispositif non vierge. Ceci est confirmé par l'allure du graphique de la Figure [7.3] et chiffré par le Tableau [7.2]. L'augmentation de l'attractivité de la passe qui se traduit par une activité accrue des poissons au droit du seuil S6 est donc constatée dans le cas où un dispositif d'ombrage est placé. Cependant, il n'est pas possible d'affirmer que la moustiquaire simulant un ombrage venu du haut améliore considérablement ce taux d'attractivité. En effet, les résultats obtenus sont proches entre le cas opacifié et le cas ombragé. Ceci tend donc à indiquer que l'opacification des parois a un effet plus grand que celui du recouvrement de la passe par un ombrage supérieur. Il n'est toutefois pas possible de distinguer une différence majeure entre ces deux cas de figure. Affirmer qu'un dispositif d'ombrage, modélisé dans le cadre de ces expériences par une toile moustiquaire, permette d'améliorer l'attractivité d'une passe à poissons n'est pas correct vu les résultats obtenus. En revanche, la transparence des parois dans un modèle réduit tend à fausser quelque peu le taux d'activité des poissons.

Cependant, si l'influence du dispositif d'ombrage est observée par individu et non plus par activité, les chiffres obtenus donnent une autre perspective. Le nombre d'individus différents attirés par la passe en période de jour n'est pas relativement différent d'un dispositif à l'autre (Figure [7.4]). Du moins, il n'est pas possible de dégager une véritable

tendance entre les différentes configurations compte tenu du nombre peu élevé d'individus recensés au seuil S6. De surcroît, il est possible de constater qu'aucun type de dispositif ne se démarque d'un autre pour chaque période de la journée. Une augmentation est visible pour la période crépusculaire de transition jour-nuit mais il est impossible d'affirmer que cette observation constitue une tendance.

Enfin, le rapport indiquant si une période de la journée est privilégiée (Tableau [7.3]) ne permet pas non plus de dégager une préférence d'un dispositif par rapport à un autre. La proportion d'individus attirés pendant la journée reste équivalente et proche des 30% pour chaque type d'expérience. Une différence constatée par dispositif entre le pourcentage d'individus détectés de nuit alors que l'effet d'ombrage n'a pas lieu d'être est une indication du manque de données utiles à l'élaboration d'une tendance.

Au terme de l'analyse de l'influence du dispositif d'ombrage sur l'attractivité, il est possible de remarquer une augmentation de l'activité des poissons au sein de la passe à poissons. Cela signifie que le nombre de fois que le poisson est attiré augmente par individu, comme si une forme d'apprentissage se mettait en place. Néanmoins, le nombre de poissons différents capables de s'engager dans la passe n'est pas augmenté lors de l'ajout d'un dispositif d'ombrage. De plus, il semble que l'opacité des parois joue un rôle plus important qu'un système d'ombrage supérieur recouvrant la passe.

Influence de la période du jour

Outre les résultats mettant en avant la possibilité d'amélioration de l'attractivité à l'aide d'un dispositif d'ombrage, nous pouvons également mettre en évidence des résultats concernant l'heure à laquelle sont attirés les poissons. La première tendance dégagée montre que les poissons privilégient l'aurore pour s'aventurer au sein de la passe à poissons. Le nombre de détections au seuil S6 en fonction de l'heure de la journée est éclairante sur ce point (Figure [7.5]). Ceci avait déjà été constaté par [Pyper \(2015\)](#) lors de son travail sur le franchissement du saumon atlantique. Cette tendance à se mouvoir préférentiellement lors du lever du jour s'explique par le comportement crépusculaire de l'espèce ([Fraser and Metcalfe, 1997](#)).

L'augmentation considérable de l'activité du saumon atlantique lors de l'aurore est visible de manière flagrante lorsque le nombre de détections est ramené à un taux horaire [7.6]). En effet, ce nombre est quatre à cinq fois plus élevé, peu importe le type de dispositif considéré. La baisse de son activité constatée durant la nuit indique bien que le saumon est une espèce crépusculaire et non nocturne.

La volonté des saumons à privilégier la période de transition nuit-jour montre que le rythme interne de l'espèce prédomine l'éventuelle amélioration fournie par un ombrage. L'horloge interne du poisson est donc un facteur qui prévaut sur l'aide apportée à sa remontée en journée. Etudier l'effet d'ombrage sur une espèce diurne (comme le gardon ([Fournier et al., 2015](#))) ou une autre espèce crépusculaire (comme le chabot ([Fournier et al., 2015](#))) permettrait de vérifier ce point.

7.2.2 Franchissabilité

Résultats individuels

Lorsque la totalité de la durée de l'expérience est analysée, c'est-à-dire deux cycles circadiens, les résultats de franchissabilité sont analogues. En effet, le taux de franchissabilité oscille aux environs de 20% pour chaque configuration d'ombrage testée. Il s'obtient en divisant le nombre de poissons retrouvés à l'amont par le nombre de poissons capté au seuil S6. Pour les dispositifs brut, opacifié et ombragé, les taux de franchissement sont respectivement de 19.2% (5/26), 22.2% (4/18) et 27.7% (5/18). Le Tableau [7.5] ne permet pas d'obtenir ces chiffres car il ne prend pas les individus passés par le canal d'attrait en considération. En effet, le nombre de franchiseurs total, toutes expériences confondues, est bien de 14 individus comme indiqué à la Figure [7.14]. Ceci montre d'un point de vue global que, même si des périodes différentes de la journée sont privilégiées selon les dispositifs, le nombre de poissons capables de franchir l'entièreté de la passe est identique sur le long terme.

La Figure [7.8] illustre également la similarité qui existe entre les expériences sur un cycle complet. Le nombre de poissons ayant atteint chaque seuil est proche d'un dispositif à l'autre. De surcroît, plus le seuil est proche de l'amont, moins de poissons sont capables d'atteindre celui-ci. Remarquons toutefois que la diminution d'individus capables d'accéder au seuil est moindre pour les bassins proches de l'amont. En effet, la diminution d'individus captés entre le seuil S7 et le seuil S6 est plus grande que celle entre le seuil S6 et le seuil S5. Cette constatation est valable pour les seuils suivants également et signifie donc que la décroissance est de type exponentielle. Cela montre qu'une fois engagé pleinement dans le modèle, un bon nombre de poissons est capable d'atteindre le sommet. La difficulté d'un tel ouvrage est donc de trouver son seuil d'entrée et de pouvoir y pénétrer.

Taux d'efficacité

Lorsque les taux d'attractivité et de franchissabilité ont été évalués, il est possible de les multiplier afin d'évaluer le taux d'efficacité. A nouveau ces taux d'efficacité ne montrent pas de réelle différence d'un type de conditions d'essai à l'autre pour une période prolongée. Les taux d'attractivité et les taux de franchissabilité observés sont de l'ordre de 20%. Une fois multipliés entre eux, ils donnent un taux d'efficacité proche de 4% comme renseigné dans le Tableau [7.5]. Ce taux est relativement faible. Plus de remontées avaient été constatées dans le mémoire de [Pyne \(2015\)](#) mais la durée des tests était de 9 jours et les tacons étaient introduits directement dans le bassin P6. Il est envisageable que les poissons introduits dans le premier bassin aient une envie accrue de tenter une remontée puisqu'ils sont confinés dans un espace plus restreint.

Pour d'éventuels tests futurs, il serait intéressant de prolonger la durée de chaque expérience afin de voir si un nombre plus important de poissons est capable de franchir la passe. En effet, les taux avancés dans ce travail sont des taux évalués sur une période limitée dans le temps. Si la durée de l'expérience avait été rallongée au-delà de 48h, plus de franchissements auraient probablement été recensés. Il reste donc à définir la période optimale d'expérience et à fixer le temps d'expérience nécessaire pour atteindre un certain taux d'attractivité et/ou de franchissabilité.

Influence de l'ombrage

Au vu des mouvements dénombrés au niveau de chaque seuil de la passe, il est difficile d'affirmer avec conviction qu'un dispositif d'ombrage favorise le franchissement du modèle en journée. En effet, pour les premiers seuils situés plus à l'aval, l'activité est favorisée lorsqu'un dispositif d'ombrage entre en vigueur (Figure [7.12]). Cette tendance n'est cependant pas visible pour les seuils situés plus à l'amont. Il faut toutefois prendre en compte le fait que moins de poissons atteignent ces seuils et que la tendance statistique est donc moins fiable. Sur base de ces résultats, il semble que les dispositifs d'ombrage favorisent l'activité des saumons en journée même si des tests supplémentaires devraient être effectués pour confirmer ces observations. L'opacité des parois semble prévaloir sur un recouvrement supérieur puisque la différence entre les deux dispositifs n'est pas flagrante.

D'autre part, la proportion de mouvements opérés en journée augmente avec le dispositif d'ombrage (Tableau [7.6]). Ceci est plus évident pour les seuils S5 et S4 mais impossible à dire pour les seuils suivants tant les chiffres varient d'un dispositif à l'autre. Pour le seuil S6, la proportion semble rester stable. Cela provient du fait que le modèle est conçu pour que les parois du bassin P6 à proximité du seuil S6 soient naturellement opaques. Contrairement aux bassins suivants dont les parois sont construites avec du plexiglass transparent, celui-ci est délimité par des plaques en bois opaques. L'effet d'ombrage a donc peu d'influence au niveau de ce seuil.

Enfin, l'activité accrue constatée pour le dispositif vierge (ou brut) au niveau des trois seuils situés plus en amont provient principalement des individus ayant franchi la passe par le canal d'attrait. Ce dernier étant placé sous la passe elle-même, il est naturellement moins éclairé puisque le revêtement du modèle est opaque. Après avoir franchi la passe, les détections horaires montrent que ces spécimens sont restés en amont un certain temps au niveau des bassins supérieurs avant de finalement dévaler la passe et de rester dans le bac aval. Ces chiffres viennent donc contrebalancer la tendance précédente qui semblait privilégier une activité en journée favorisée dans le cas d'un dispositif d'ombrage. Aucune affirmation ou tendance ne peut être dressée à la lecture des résultats obtenus. D'autres tests, éventuellement réalisés sur une période plus étendue, permettraient de confirmer si un dispositif d'ombrage peut favoriser la remontée des individus en journée.

Influence de la période du jour

L'activité du poisson est influencée par son rythme de vie. Tout comme cela a été observé pour l'étude de l'attractivité et dans d'autres études parallèles, le saumon atlantique privilégie des mouvements aux périodes de jour et surtout lors des transitions jour-nuit (Richardson and McCleave, 1974). Les graphes des Figures [7.10], [7.11] et [7.12] présentent tous une majorité de mouvements constatés pendant le jour ou pendant l'aurore. Si le nombre de passages à proximité de chaque antenne est ramené à son taux horaire, l'aurore est favorisée et ce pour chaque type de dispositif étudié. D'une manière générale, l'activité augmente globalement pour les deux dispositifs dotés d'un système d'ombrage sans véritable différence entre l'un et l'autre. Cependant, en l'absence de contraste manifeste entre les configurations, il n'est pas possible de généraliser ces concepts. Le rythme circadien et le cycle biologique du poisson semblent donc prévaloir à nouveau sur son comportement.

Durée de remontée

Pour l'ensemble des remontées ayant pu être chronométrées, une nette tendance s'est dessinée vers la période de l'aurore. 14 des 19 remontées ont débuté peu avant ou pendant l'allumage progressifs de l'éclairage. Cette constatation est la même pour chaque dispositif d'expérience. Elle illustre à nouveau le fait que le saumon atlantique est une espèce crépusculaire qui profite de la transition entre la nuit et le jour pour opérer ses mouvements.

L'étendue des valeurs est très importante en raison du penchant qu'ont certains individus à se reposer entre le passage d'un ou plusieurs bassins alors que d'autres sont au contraire tout à fait capables de franchir le dispositif sans s'arrêter. Pour la partie des individus qui franchissent la passe sans se reposer longuement entre chaque bassin, le temps de remontée moyen est inférieur à 10 minutes (Tableau [7.9]). Tous les individus mettent moins de 20 minutes à franchir l'obstacle, ce qui correspond aux valeurs obtenues lors des travaux précédents. Une légère augmentation du temps est observée lorsque l'ombrage est augmenté. Une augmentation du temps de remontée pourrait indiquer qu'un poisson soit moins stressé grâce à la protection qu'engendre l'ombrage et qu'il ne ressente donc pas le besoin de remonter l'ouvrage rapidement. En raison de la faible quantité de résultats, rien n'est conclu à ce sujet.

Compétition entre individus

Il semble qu'un comportement de compétition s'installe entre individus lors du franchissement de la passe. Les graphes en *chemins de fer* qui retracent le trajet emprunté par chaque individu ont montré qu'il existe une certaine forme de dominance entre individus. Dans une grande partie des cas, lorsque les saumons tentent de franchir la passe, ils évitent d'occuper le même bassin de façon simultanée. Cela crée une forme d'espace territorial dont chacun des individus aurait besoin. Ce comportement limite les remontées dénombrées car il bloque certains poissons dans leur progression. Ce phénomène avait déjà été constaté dans des travaux antérieurs (Pype, 2015).

Canal d'attrait

Au cours de ce travail, nous avons constaté un comportement qui n'avait pas été étudié précédemment. En effet, certains tacons ont emprunté le canal d'attrait afin de franchir la passe à poissons. Leur nombre est assez significatif puisqu'il équivaut à plus d'un spécimen sur quatre (Tableau [7.10]). La vitesse de l'écoulement au sein de ce canal peut atteindre approximativement $2.5 [m/s]$ et aucune zone de recirculation n'y est présente. La capacité de nage des poissons ayant réussi à gravir le canal d'attrait est très élevée. Ces derniers se classent parmi les meilleurs nageurs connus dont fait partie le saumon atlantique.

Sur base de ces observations, il serait intéressant de savoir si un tel comportement est envisageable dans la réalité puisque le canal d'attrait n'est a priori pas destiné à la remontée des poissons. Son rôle est d'attirer le poisson en créant un débit suffisamment grand pour que celui-ci soit ressenti dans une rivière au débit nettement plus conséquent. Dans le cadre de ce travail, cette observation restera anecdotique puisque dans la réalité ce comportement n'est en principe pas observé. En effet, gravir le canal d'attrait est nettement plus éprouvant que d'emprunter le trajet *classique* de la passe prévu à cet effet.

Comportement exploratoire

Afin d'éviter que les spécimens étudiés ne développent une forme d'apprentissage de montaison, les lots avaient été mélangés et redistribués (voir section [6.2.1]). Malgré ces précautions, il semble que certains individus soient tout de même plus enclins à explorer et répéter les remontées (Figure [7.22]). Ce comportement illustre le fait que d'un individu à l'autre ou d'un échantillon à l'autre les résultats pourront différer compte tenu du caractère curieux ou non du lot. Il est difficile de juger si le fait qu'un tacon soit attiré à plusieurs reprises lors d'expériences différentes soit considéré comme de l'apprentissage. La même constatation peut être tirée sur les franchissements.

7.2.3 Mortalité

Au terme des essais, il a été remarqué qu'un grand nombre de saumons juvéniles n'avait pas survécu. Au début de leur captivité, certains poissons ont réussi à s'échapper des bacs de stockage. Ils ont probablement utilisé les bulleurs destinés à maintenir un taux d'oxygène suffisant comme rampe de lancement. En effet, les saumons ont des capacités de saut relativement développées (Larinier et al., 1994; Lucas and Baras, 2001; Baudouin et al., 2014). Des dispositions ont été prises par la suite afin d'éviter cela et aucun tacon n'est plus parvenu à sauter hors des bacs. Malgré ces pertes, la mortalité des individus au cours de leur détention s'est révélée relativement élevée avec près d'un spécimen sur trois retrouvé mort à l'issue des tests.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées même si la métamorphose d'un grand nombre de tacons en smolts reste la cause la plus envisageable. En effet, cette raison avait déjà été avancée par Pype (2015) lors de son travail mené sur les jeunes saumons. Il avait noté que beaucoup de saumons étaient morts des suites de leur smoltification. Ce phénomène se déroule au cours des mois de mars-avril lorsque le saumon s'apprête à dévaler la rivière pour pouvoir rejoindre la mer. Ainsi, il se prépare à un milieu salin qui n'est pas celui du modèle réduit.

Au cours de ce travail, les manipulations des tacons se sont succédées plus tôt dans l'année académique, de la mi-novembre à la fin décembre. Ceci avait pour but d'éviter la saison de smoltification des saumons et donc d'éviter une mortalité conséquente. Cependant, de nombreux individus retrouvés morts semblaient pourtant avoir smoltifié malgré les mesures prises. La coloration argentée de certains tacons qui vivent habituellement vers des teintes brunes en était la preuve (Figure [7.25]). Des pistes d'explication vont être émises dans la suite de cette section afin de découvrir ce qui pouvait avoir causé la mort des juvéniles.



FIGURE 7.25 – Cliché d'un tacon ayant smoltifié durant les expériences.

Alimentation

Sur la totalité de la durée de captivité, les poissons n'ont pas été nourris. En effet, en l'absence de nourriture, le saumon est tout à fait capable de réguler son activité et de pratiquer le jeûne sur une longue période. Des études ont d'ailleurs montré que de jeunes saumons sont tout à fait en mesure de survivre plusieurs mois en conditions de famine (Navarro and Gutiérrez, 1995) et de récupérer ce manque d'énergie par la suite. En revanche, la privation de nourriture peut provoquer une augmentation de la consommation d'oxygène (Cook et al., 2000). Avec un apport constant en oxygène dans l'eau à l'aide d'une pompe à air, cet accroissement ne pose pas de réel problème. L'hypothèse du manque de nourriture peut donc être écartée.

Néanmoins, la perte de poids constatée n'est pas négligeable et atteint pratiquement la moitié du poids total de départ (Tableau [7.13]). Cet amaigrissement a pu provoquer une baisse de l'activité et de l'énergie des saumons pour les expériences. Le peu de remontées observées est causé pour une partie de l'échantillon par cette perte de poids. Il est également possible que ceux-ci aient régulé leur activité de façon à pouvoir s'adapter à ce jeûne forcé. Afin de s'économiser et de ne pas atteindre un état de fatigue extrême, certains individus ont pu freiner leur rythme et décidé de ne pas s'aventurer dans la passe pour conserver leurs forces.

Température

La température de l'eau de conditionnement des poissons était identique à l'eau du modèle réduit. Elle était située sur la totalité des expériences aux alentours de 15 – 16 [°C]. La température de la cuve de Châtelet s'était réchauffée durant l'été et s'est refroidie par la suite mais pas assez pour atteindre des valeurs de 10 – 11 [°C] idéales pour les saumons. Ce paramètre est à prendre en compte car il influe sur le métabolisme du poisson. Il ne peut toutefois pas être considéré comme un facteur de mortalité à cette valeur-là puisque la température létale d'un tacon se situe bien au-delà de 25 [°C] (Gueguen and Prouzet, 1994).

Cependant, la température est un facteur qui peut indirectement mener à une augmentation de la mortalité. En effet, la température accélère la croissance des individus (Boeuf and Le Bail, 1999). Chez le saumon, la première phase de croissance le transforme de tacon en smolt. Certaines études ont montré qu'une hausse de température stimulait la smoltification des salmonidés comme la truite (Morro et al., 2019). Cela se traduit aussi bien par une élévation de la taille que du poids de l'individu. Comme les tacons étaient stockés à l'origine à une température avoisinant les 4 [°C] à la pisciculture d'Erezée, ce changement de température a pu accélérer la smoltification de certains individus.

En outre, des études ont montré que la capacité de nage des jeunes saumons était affectée par la température de l'eau. La température optimale est de 10.5 [°C] pour un jeune smolt (Martin et al., 2012). Au-delà de 17 [°C], certains individus peuvent perdre jusqu'à 80% de leur vitesse. Comme la température du hall au moment des essais était plus proche de cette valeur, le faible taux de remontée des individus peut y trouver une explication. Une température trop élevée de l'eau lors des expériences a diminué les capacités natatoires de certains poissons. Cela s'est traduit par une activité moindre comparée aux travaux réalisés auparavant sur le modèle réduit de Châtelet.

Photopériode

Nombreux sont les documents de la littérature qui traitent de l'influence de la photopériode sur la croissance des poissons. La photopériode gouverne de manière significative la smoltification des jeunes saumons (Hoar, 1988; Hansen et al., 1992; Saunders et al., 1994; Solbakken et al., 1994; Sigholt et al., 1998; Taranger et al., 1999). De manière générale, le développement du tacon en jeune smolt est accéléré avec une exposition à la lumière plus conséquente (Berg et al., 1992). Conjointement à la température, la lumière est le deuxième paramètre qui agit de manière significative sur la smoltification (Fjellidal et al., 2011). Un éclaircissement prolongé trop intense peut stresser le poisson et le conduire à la mort dans des cas extrêmes (Boeuf and Le Bail, 1999). De plus, des changements prolongés de photopériodes peuvent mener à une réduction de la défense immunitaire de certains poissons (Leonardi and Klempau, 2003).

Lors des différents essais, l'intensité lumineuse des différents spots a été mesurée et contrôlée de façon à ne pas gêner les saumons. Elle ne peut donc pas être considérée comme une source de stress capable de causer des mortalités. La photopériode qui a été utilisée au cours des expérimentations était de 12h de jour pour 12h de nuit. Elle visait à maximiser la période du jour afin de maximiser les plages horaires durant lesquelles l'ombrage de la passe pouvait avoir un impact sur le comportement des poissons. Le rythme circadien imposé, qui équilibre les périodes du jour et de la nuit, peut s'associer à l'équinoxe de printemps. Ce cycle est donc calqué sur le rythme circadien des mois de mars et d'avril, période durant laquelle les tacons commencent à smoltifier.

Si l'analyse de la photopériode est prise en considération, il est indéniable que celle-ci a influencé la métamorphose d'un certain nombre d'individus. Le rythme circadien assigné a incontestablement provoqué la transformation des tacons en smolts. Ce phénomène a mené à une mortalité plus élevée que prévue par les anciens mémoires. Ce paramètre peut donc expliquer en partie la raison du nombre de morts comptabilisés.

Manipulations

En dépit de toutes les précautions qui ont été entreprises lors de la manipulation des individus, il était impossible de ne pas provoquer une certaine forme de peur ou de stress chez ceux-ci. Aucune blessure ou mortalité n'a été constatée lors des manipulations directes. En revanche, il est impossible d'affirmer que certains poissons n'aient pas contracté de stress intense lorsqu'ils étaient manipulés et transportés à l'aide d'épuisettes. De plus, la vidange partielle des bacs de stockage était faite à intervalles réguliers afin de les réapprovisionner avec de l'eau propre. Cette opération peut également être à l'origine de stress chez les poissons. Le stress peut mener à un état d'immunodépression chez les poissons (Elenkov and Chrousos, 2006). Lorsqu'ils sont immunodéprimés, leur système immunitaire s'affaiblit et ils sont plus susceptibles de contracter des infections ou des maladies.

7.2.4 Pistes d'amélioration

Au terme de l'analyse des taux d'attractivité et de franchissement des saumons au moyen de trois dispositifs d'ombrage différents, les résultats présentés ne peuvent pas être généralisés avec certitude. Plusieurs raisons sont avancées et proviennent principalement

des limitations expérimentales : modèle réduit, matériel disponible, nombre et durée des essais, etc. C'est pourquoi une analyse critique des résultats obtenus va être présentée. Elle sera accompagnée de pistes d'amélioration qui pourraient être mises en œuvre afin d'affiner et de corriger les tests futurs.

D'abord tout travail expérimental est limité par le nombre d'individus qui participe aux expériences. Généraliser un concept sur un lot défini d'intervenants n'est pas chose aisée. Afin de pouvoir dégager des tendances sur base d'un nombre limité, la quantité de répliques et d'individus doit être augmentée au maximum. Dès lors, il sera toujours possible de multiplier la même expérience avec les mêmes conditions dans le but d'arriver à un concept généralisable à l'ensemble d'une population. Le souci sera de trouver un juste équilibre afin de ne pas prolonger les essais indéfiniment.

Dans le même ordre d'idée, la durée de l'expérience joue sur la quantité de résultats relevés. Le choix d'instaurer un cycle de 24h effectué deux fois a été posé. Le fait de travailler par cycle circadien devait permettre d'annuler toute perturbation liée à l'heure à laquelle était introduit chaque lot dans le modèle. Il est possible de discuter du nombre de cycles à effectuer voire d'accélérer les cycles afin d'obtenir plus de résultats. Néanmoins, ce type de fonctionnement s'éloigne de la réalité. Dans l'optique où le modèle réduit simplifie déjà la réalité, modifier ce paramètre n'a pas été décidé. En raison des échéances à respecter, il n'a pas été possible de déterminer l'influence du nombre de cycles pendant lesquels les poissons étaient laissés dans le modèle. Pour la même raison influençant le nombre de répétitions à effectuer, ce paramètre n'a pas pu être étudié pour des raisons évidentes de temps. Un compromis entre durée d'essais et résultats convaincants doit être trouvé lors de chaque travail expérimental.

Par ailleurs, le modèle réduit de la passe de Rivière est limité par ses dimensions. En effet, que ce soit pour le bac aval ou le bac amont, ceux-ci ne respectent pas l'échelle de la Meuse et influencent donc les résultats. Il serait par exemple intéressant de savoir si le même taux d'attractivité serait décelé pour les tacons dans l'optique où le bassin aval serait dimensionné à l'échelle. Il est effectivement plus facile de trouver l'entrée d'un ouvrage de façon erratique lorsque la zone possède une plus petite superficie. De plus, le fait que le bassin amont bloque le poisson dans son processus de remontée n'est pas un phénomène qui se présenterait en pratique. Malgré les efforts entrepris pour empêcher la dévalaison des poissons une fois qu'ils ont atteint le bac amont, certains individus ont réussi à effectuer des allers-retours.

En outre, le hall d'essais de Châtelet n'est a priori pas destiné à accueillir du matériel vivant. Ceci s'est démontré par le haut taux de mortalité constaté. Deux paramètres ont été avancés. Le premier concerne la température de l'eau sur lequel il n'y a aucune prise matérielle. Les mêmes tests effectués dans des conditions thermiques plus froides conviendraient mieux aux tacons. L'influence de cette température sur les résultats récoltés serait intéressante à étudier.

La mortalité élevée recensée provient également de la smoltification comme expliqué plus haut. Etudier les remontées d'un échantillon de tacons à température plus froide avec une autre photopériode permettrait de considérablement diminuer cette mortalité. Cependant, dans l'optique où le but est d'étudier l'influence d'un dispositif d'ombrage,

seuls les résultats récoltés en journée ont du sens. Calquer la photopériode sur un rythme automnal voire hivernal réduirait le temps pendant lequel des résultats pourraient être rapportés.

De plus, le comportement du saumon est crépusculaire. Il privilégiera donc les remontées qui font la transition entre le jour et la nuit. Ceci a été montré par un pic de détections à l'aurore. Etudier le comportement d'une espèce diurne avec le même dispositif expérimental permettrait de voir si le nombre de remontées constatées en journée est réellement supérieur en présence d'un dispositif d'ombrage. L'étude pourrait être effectuée avec une espèce nocturne mais un comportement analogue aux individus crépusculaires sera probablement constaté avec un grand nombre de remontées effectuées durant la nuit.

Enfin, les travaux précédents se sont penchés principalement sur la franchissabilité de la passe. Compte tenu du dispositif expérimental choisi, seuls les poissons attirés ont pu être traités dans l'analyse de la franchissabilité. Ce nombre de poissons est donc fortement réduit par rapport au nombre total de poissons introduits à chaque expérience. Une étude individuelle de la franchissabilité consistant à introduire directement un certain nombre de tacons dans le premier bassin aurait permis d'obtenir plus de résultats. Ce point d'attention devra être retenu pour d'autres études.

Chapitre 8

Etude d'une rampe à anguilles

8.1 Résultats

Comme les anguilles sont des espèces qui utilisent leurs capacités de reptation pour franchir une rampe, nous allons mettre en évidence l'influence des pentes longitudinale et transversale sur leur progression à l'aide d'un substrat de type picot.

Nous donnerons tout d'abord les résultats chiffrés des différentes conditions d'essais afin de mettre en évidence certaines tendances. Pour ce faire, nous distinguerons deux variables d'analyse : le nombre de tentatives de remontée et le nombre de franchissements. Nous commenterons aussi les tendances statistiques dégagées pour ces deux paramètres.

Ensuite, nous nous intéresserons au comportement des anguilles dans la rampe en privilégiant une analyse de la vitesse et des portions de la rampe empruntées. Pour ce faire, nous diviserons la rampe en différents couloirs caractérisés par des hauteurs d'eau différentes afin d'étudier le choix de l'utilisation de l'un ou l'autre couloir dans le parcours de remontée de l'anguille. Chaque condition d'essais possèdera ses propres couloirs et ceux-ci seront préalablement délimités avant d'observer le comportement des individus. Des commentaires viendront compléter les tendances observées.

8.1.1 Tentative de remontée

Définition

Une *tentative de remontée* correspond au moment où l'anguille quitte le bassin aval et passe au-delà du premier témoin de l'auge (Figure [6.10-a]). Nous avons décidé de ne pas parler d'attractivité en raison de la faible taille des lots (5 anguilles par condition d'essais) et de la configuration du dispositif d'essais. En effet, l'identification des individus entre eux n'était pas possible avec le matériel d'enregistrement vidéo disponible.

Résultats

Le nombre de tentatives de remontées pour chaque condition d'essais a été comptabilisé dans le Tableau [8.1]. Afin de dégager des tendances et de visualiser l'impact de la variation des pentes longitudinale et transversale sur les tentatives de remontées, nous présentons les résultats selon deux angles d'analyse. La premier avec une pente longitudinale (α) fixe (Figure [8.1-a]) et le second avec une pente transversale (β) fixe (Figure [8.1-b]). Par

souci de clarté, les résultats sont ramenés à un nombre de tentatives par individu sur une période d'une heure d'expérience. Pour ce faire, la somme des tentatives de remontées des tests 1 et 2 a été multipliée par le rapport de temps 1.5 (= 60 [min]/40 [min]) et divisée par le nombre total de 10 individus.

Condition d'essais	Test 1	Test 2	Total (Tests 1&2)	Total/individu/heure (Tests 1&2)
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	25	56	81	12.2
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	17	49	66	9.9
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	47	45	92	13.8
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	29	48	77	11.6
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	44	27	71	10.7
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	53	59	112	16.8
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	19	31	50	7.5
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	23	15	38	5.7
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	9	8	17	2.6
$\alpha = 31.0^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	5	19	24	3.6
$\alpha = 36.9^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	3	8	11	1.7

TABLE 8.1 – Nombre de tentatives de remontées par condition d'essais.

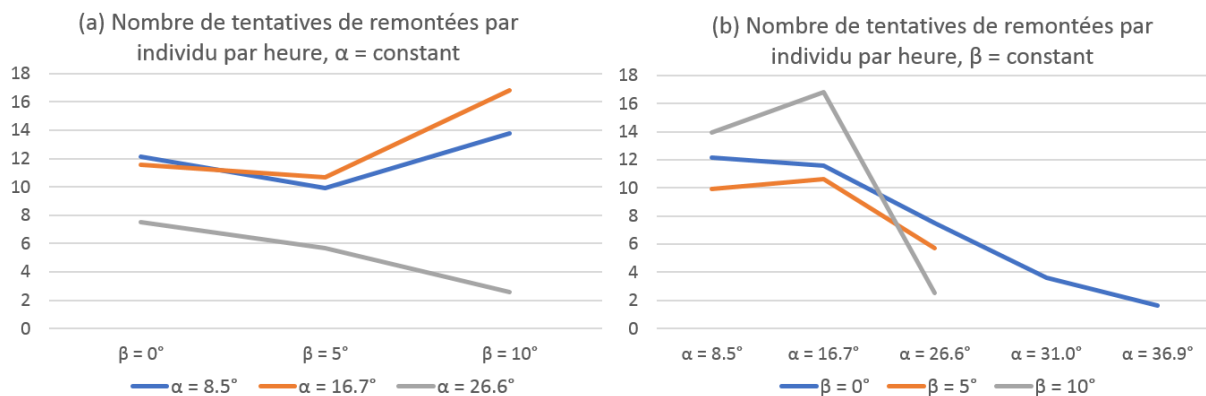


FIGURE 8.1 – Nombre de tentatives de remontées en fonction du dispositif étudié.

Nous constatons que le nombre de tentatives de remontées décroît lorsque la pente longitudinale augmente (Figure [8.1-b]) mais cette observation est moins marquée pour des pentes plus faibles. En effet, lorsque la pente transversale est maximale ($\beta = 10^\circ$) un pic de tentatives apparaît dans le cas d'une pente longitudinale intermédiaire ($\alpha = 16.7^\circ$) (Figure [8.1-b]).

Une tendance analogue est identifiable entre les cas des pentes longitudinales de $\alpha = 8.5^\circ$ et $\alpha = 16.7^\circ$ lorsque la pente transversale augmente (Figure [8.1-a]). Pour des pentes transversales inférieures de $\beta = 0^\circ$ et $\beta = 5^\circ$, le nombre de tentatives est relativement constant alors qu'il augmente significativement pour $\beta = 10^\circ$. Néanmoins, lorsque la pente longitudinale est maximale ($\alpha = 26.6^\circ$), nous observons une décroissance nette du nombre de remontées lorsque la pente transversale augmente (Figure [8.1-a]).

Distribution des temps des tentatives de remontées

Le temps zéro d'une expérimentation est fixé à l'instant où le lot de cinq anguilles est plongé dans le bassin aval. Dans la mesure où les anguilles pourraient nécessiter un moment d'adaptation avant d'opérer leurs premiers mouvements, nous analysons les instants des tentatives. Il est possible de rendre compte de ce paramètre en établissant une distribution des tentatives de remontées dans le temps. Pour ce faire, le nombre de tentatives est d'abord comptabilisé par intervalle de 5 minutes. Ensuite, celui-ci est divisé par le nombre total de tentatives sur l'ensemble de l'expérience afin d'établir un pourcentage. La Figure [8.2] illustre graphiquement l'ensemble de ces distributions pour une pente longitudinale constante. La Figure [8.3] dresse ces distributions pour une pente transversale constante. Afin d'obtenir la distribution d'une condition d'essais, les résultats des deux tests réalisés pour une même configuration sont combinés en un seul jeu de données. Les valeurs des différentes proportions sont indiquées au Tableau [8.2] pour chaque intervalle de temps de 5 [min].

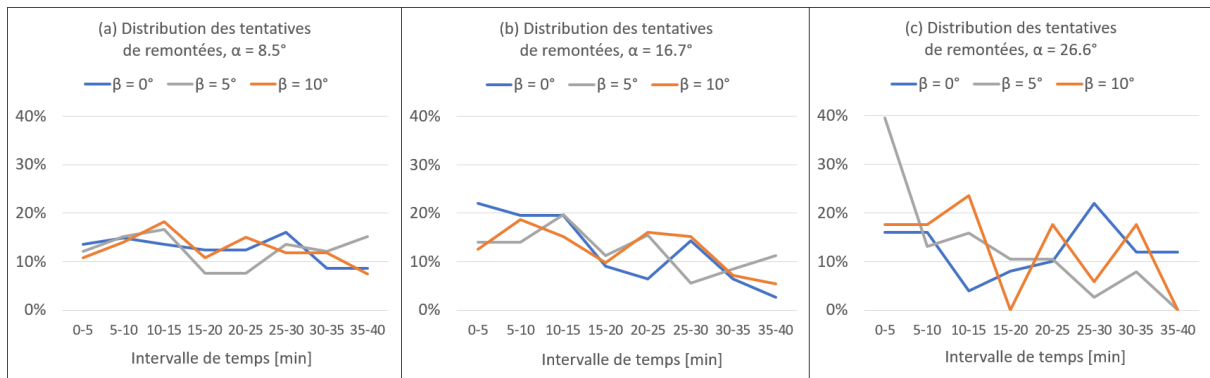


FIGURE 8.2 – Distribution des temps des tentatives de remontées en fonction de la pente transversale.

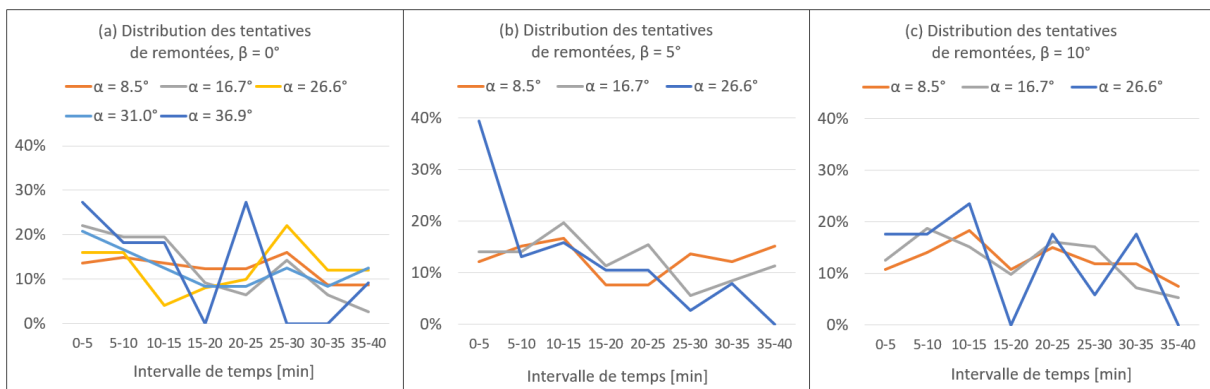


FIGURE 8.3 – Distribution des temps des tentatives de remontées en fonction de la pente longitudinale.

De manière générale, la distribution du nombre de tentatives sur l'ensemble de la durée de l'expérience décroît lentement et suit une tendance identique quel que soit le dispositif. Cette décroissance peut provenir d'une éventuelle fatigue des anguilles. Le cas d'essais avec une combinaison de pentes $\alpha = 26.6^\circ$ et $\beta = 5^\circ$ (Figures [8.2-c] et [8.3-b]) montre un pic de tentatives constaté sur l'intervalle de temps 0 – 5 [min]. Ceci peut être expliqué par

un éventuel stress causé lors de l'introduction des anguilles dans le modèle. Ce stress se serait traduit par une période de mouvements plus importants.

Condition d'essais	Intervalles de temps [min]							
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	14%	15%	14%	12%	12%	16%	9%	9%
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	12%	15%	17%	8%	8%	14%	12%	15%
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	11%	14%	18%	11%	15%	12%	12%	8%
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	22%	19%	19%	9%	6%	14%	6%	3%
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	14%	14%	20%	11%	15%	6%	8%	11%
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	13%	19%	15%	10%	16%	15%	7%	5%
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	16%	16%	4%	8%	10%	22%	12%	12%
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	39%	13%	16%	11%	11%	3%	8%	0%
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	18%	18%	24%	0%	18%	6%	18%	0%
$\alpha = 31.0^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	21%	17%	13%	8%	8%	13%	8%	13%
$\alpha = 36.9^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	27%	18%	18%	0%	27%	0%	0%	9%

TABLE 8.2 – Proportions de la distribution des tentatives de remontées par intervalle de 5 minutes.

8.1.2 Remontée

Définition

Une *remontée* correspond au moment où l'anguille franchit le témoin amont (Figure [6.10-b]). A nouveau, nous avons décidé de ne pas parler en terme de *taux de franchissabilité* en raison de la faible taille des lots (5 anguilles par condition d'essais), de l'impossibilité d'identifier les individus entre eux et de la dimension réduite du dispositif d'essais.

Résultats

Un mode opératoire identique a été suivi afin de chiffrer le nombre de remontées observées par individu par heure. Les graphiques [8.4-a] et [8.4-b] illustrent l'influence des pentes longitudinale (α) et transversale (β) sur les remontées constatées.

La Figure [8.4-a] met en évidence une relation plutôt constante du nombre de remontées par rapport à la pente transversale lorsque la pente longitudinale est supérieure à $\alpha = 8.5^\circ$. En revanche, pour la pente longitudinale la plus faible ($\alpha = 8.5^\circ$), le nombre de remontées augmente proportionnellement avec la pente transversale (Figure [8.4-a]). Un pic de remontées est observé dans le cas d'une pente longitudinale minimale ($\alpha = 8.5^\circ$) combinée à une pente transversale maximale ($\beta = 10^\circ$) (Figure [8.4-a]).

La Figure [8.4-b] témoigne d'une décroissance du nombre de remontées lorsque la pente longitudinale augmente. Le nombre de remontées pour $\beta = 5^\circ$ est assez stable en fonction de la pente longitudinale par comparaison avec les deux autres cas (Figure [8.4-b]). Un pic de remontées est constaté dans le cas d'une pente longitudinale minimale ($\alpha = 8.5^\circ$) combinée à une pente transversale maximale ($\beta = 10^\circ$) (Figure [8.4-b]).

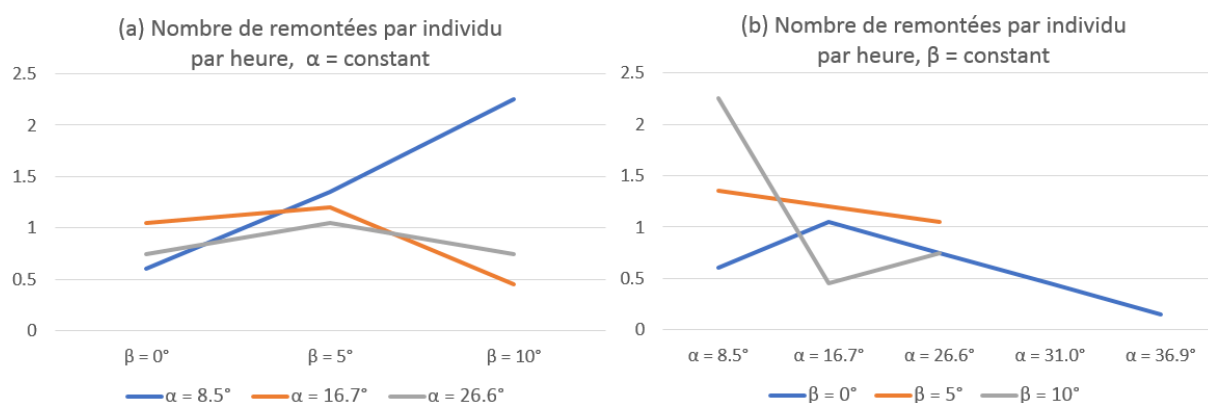


FIGURE 8.4 – Nombre de remontées en fonction du dispositif étudié.

Le nombre de remontées pour chaque condition d'essais est repris dans le Tableau [8.3].

Condition d'essais		Test 1	Test 2	Total (Tests 1&2)	Total/individu/heure (Tests 1&2)
$\alpha = 8.5^\circ$	$\& \beta = 0^\circ$	2	2	4	0.6
$\alpha = 8.5^\circ$	$\& \beta = 5^\circ$	3	6	9	1.4
$\alpha = 8.5^\circ$	$\& \beta = 10^\circ$	9	6	15	2.3
$\alpha = 16.7^\circ$	$\& \beta = 0^\circ$	4	3	7	1.1
$\alpha = 16.7^\circ$	$\& \beta = 5^\circ$	6	2	8	1.2
$\alpha = 16.7^\circ$	$\& \beta = 10^\circ$	2	1	3	0.5
$\alpha = 26.6^\circ$	$\& \beta = 0^\circ$	1	4	5	0.8
$\alpha = 26.6^\circ$	$\& \beta = 5^\circ$	4	3	7	1.1
$\alpha = 26.6^\circ$	$\& \beta = 10^\circ$	3	2	5	0.8
$\alpha = 31.0^\circ$	$\& \beta = 0^\circ$	1	2	3	0.5
$\alpha = 36.9^\circ$	$\& \beta = 0^\circ$	0	1	1	0.2

TABLE 8.3 – Nombre de remontées par condition d'essais.

Le nombre de remontées par tentatives de remontées sera traité ultérieurement à la section [8.1.3].

Temps de remontée

Les temps de remontée des différents individus ont été évalués sur base du time code des enregistrements vidéo. Sur l'ensemble des 22 expériences, 67 remontées ont été recensées. Des outils statistiques ont permis de constituer des box-plots qui reprennent l'étendue moyenne du temps nécessaire à la remontée par condition d'essais. Le graphique reprenant toutes les conditions est illustré à la Figure [8.5].

Il a été décidé d'utiliser des box-plots pour représenter graphiquement les temps moyens de remontée en raison de leur large étendue autour de leur moyenne. En effet, puisque la plage de temps de remontée est assez importante, il n'est pas pertinent de les caractériser par une seule valeur. Pour la suite de ce chapitre, la justification quant à l'utilisation des

box-plots pour représenter graphiquement des résultats sera la même que celle donnée ci-dessus. Pour l'ensemble des box-plots utilisés dans ce mémoire, le cercle inférieur représente le quartile 25 % (Q1 dans le Tableau [8.4]), la ligne avec un cercle représente la médiane (quartile 50 % ou Q2) et le cercle supérieur représente le quartile 75 % (Q3 dans le Tableau [8.4]). Les traits inférieur et supérieur représentent respectivement les valeurs minimale et maximale du jeu de données. La croix représente la moyenne.

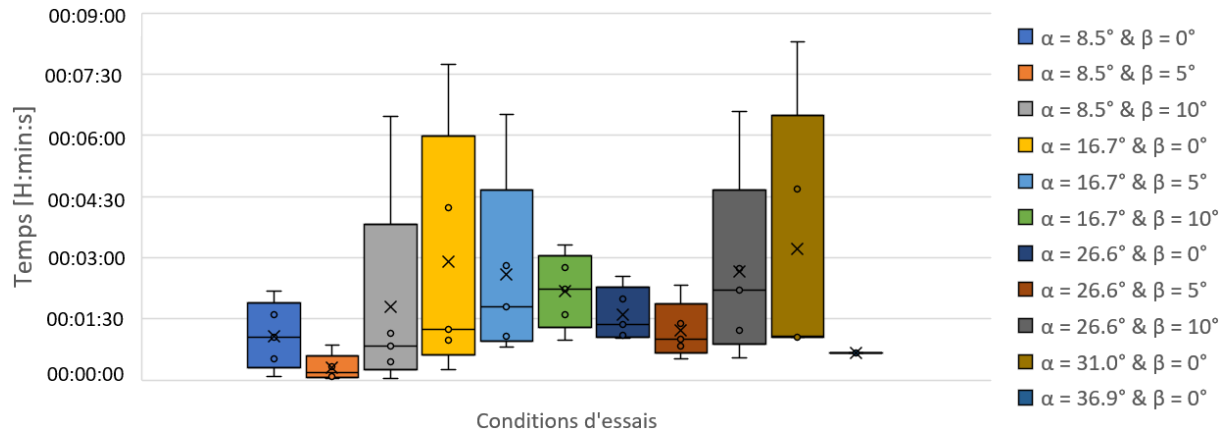


FIGURE 8.5 – Représentation graphique du temps moyen de remontée en fonction des différentes conditions d'essais.

Condition d'essai	Min.	Q 1	Médiane	Q 3	Max.	Moy.	Etendue
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	00:05	00:30	01:00	01:33	02:05	01:03	02:00
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	00:03	00:05	00:10	00:19	00:50	00:14	00:47
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	00:03	00:26	00:48	01:07	06:12	01:08	06:09
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	00:15	00:56	01:12	04:04	07:26	02:42	07:11
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	00:47	01:02	01:44	02:42	06:15	02:17	05:28
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	00:56	01:32	02:08	02:39	03:11	02:05	02:15
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	00:59	01:03	01:18	01:55	02:27	01:32	01:28
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	00:30	00:48	00:58	01:20	02:14	01:08	01:44
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	00:31	01:10	02:07	02:38	06:19	02:33	05:48
$\alpha = 31.0^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	01:00	01:01	01:02	04:30	07:57	03:20	06:57
$\alpha = 36.9^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	00:38	00:38	00:38	00:38	00:38	00:38	00:00

TABLE 8.4 – Valeurs caractéristiques permettant d'élaborer des box-plots des temps de remontée pour les expériences menées sur les anguilles (le temps est exprimé en minutes).

Les Figures [8.6] et [8.7] différencient l'influence des pentes longitudinale et transversale. Aucune tendance franche ne peut être dégagée concernant l'influence des pentes longitudinale et transversale sur les temps de remontée. Les valeurs chiffrées sous-jacentes aux box-plots sont reprises au Tableau [8.4]. Elles ont été déterminées de façon automatisée au moyen du logiciel Excel.

La Figure [8.6] montre qu'il est difficile d'identifier l'influence de la pente longitudinale sur les temps de remontée. Même si le temps moyen augmente avec la pente longitudinale pour une pente transversale de $\beta = 10^\circ$, cette tendance n'est pas observée pour les autres

pentess transversales. Les étendues des valeurs obtenues sont tantôt grandes tantôt faibles, ce qui ne permet pas de cibler un intervalle de temps précis. Cela peut s'expliquer par le fait que les anguilles n'empruntent pas le même trajet pour remonter la rampe. En effet, certaines d'entre elles utilisent le substrat et d'autres non. Cela joue fortement sur le temps de remontée comme nous le montrerons dans la suite de cette analyse lorsque nous distinguerons les couloirs empruntés.

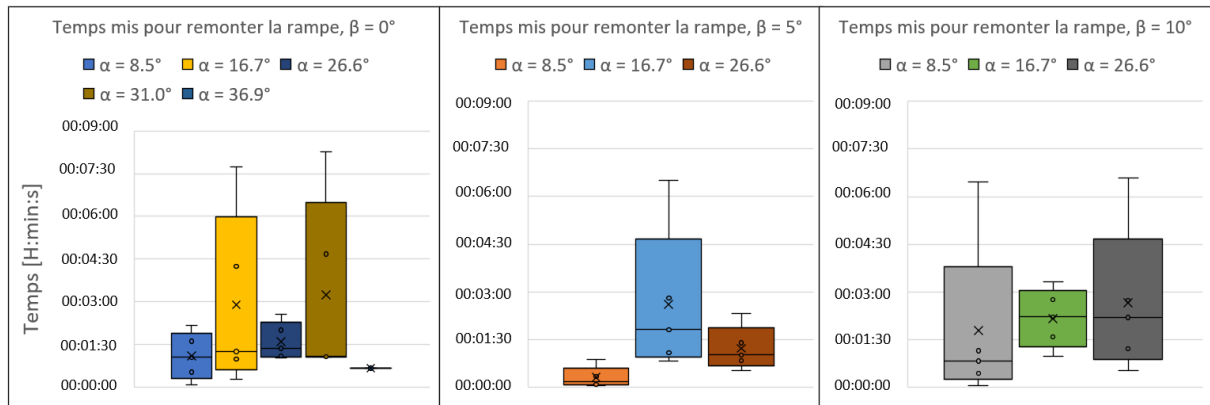


FIGURE 8.6 – Représentation graphique du temps moyen de remontée en fonction de la pente longitudinale.

La Figure [8.7] montre qu'il est aussi difficile d'identifier un comportement clair en fonction de la variation de la pente transversale. Néanmoins, pour une pente longitudinale de $\alpha = 16.7^\circ$, le temps moyen de remontée décroît avec l'augmentation de la pente transversale. Il s'agit toutefois d'une observation locale qui ne peut pas être considérée comme une véritable tendance.

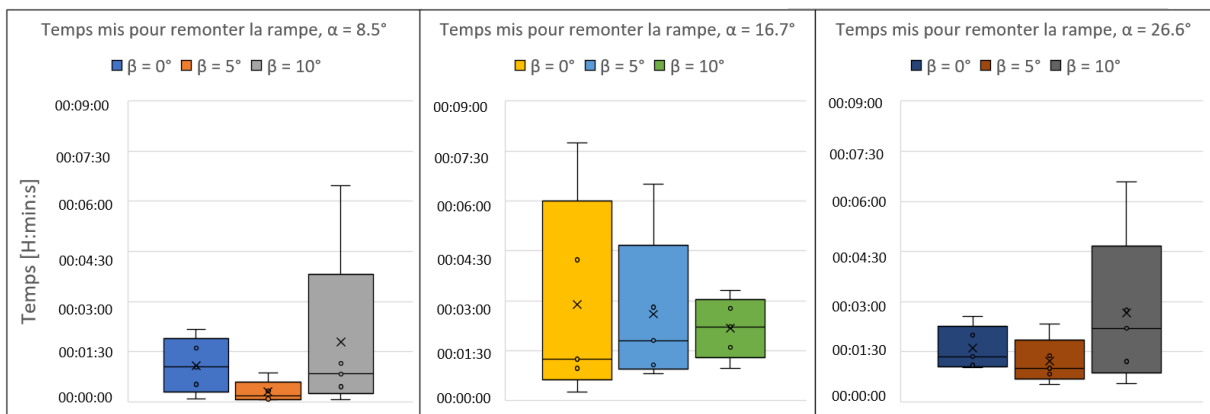


FIGURE 8.7 – Représentation graphique du temps moyen de remontée en fonction de la pente transversale.

Taux d'activité moyen

Le *taux d'activité* correspond au rapport entre le temps où l'anguille est en mouvement et le temps total de la remontée. Le temps où l'anguille est en mouvement est calculé via le time code de la vidéo. Il s'agit de la différence entre le temps total de la remontée et le temps total où l'anguille est à l'arrêt. Une anguille est considérée à l'arrêt dès qu'elle ne se

déplace plus, c'est-à-dire qu'elle reste immobile au moins une seconde.

Le *taux d'activité moyen* est quant à lui défini comme la moyenne des taux d'activité recueillis pour l'ensemble des anguilles. Les taux d'activité sont représentés pour chaque condition d'essais aux Figures [8.8-a] (influence de la pente longitudinale α) et [8.8-b] (influence de la pente transversale β).

De manière générale, ces deux graphiques montrent que les taux d'activité sont globalement élevés quelque soit le dispositif utilisé (entre 65.0 % et 94.1 %). Les anguilles ne prennent dès lors pas beaucoup de repos durant leurs remontées.

La Figure [8.8-a] montre qu'il n'est pas évident d'identifier une tendance générale entre les 3 pentes longitudinales. Cependant, une décroissance du taux d'activité se manifeste dans le cas d'une pente longitudinale maximale ($\alpha = 16.6^\circ$) tandis que dans le cas d'une pente transversale minimale ($\alpha = 8.5^\circ$) une tendance stable est identifiable.

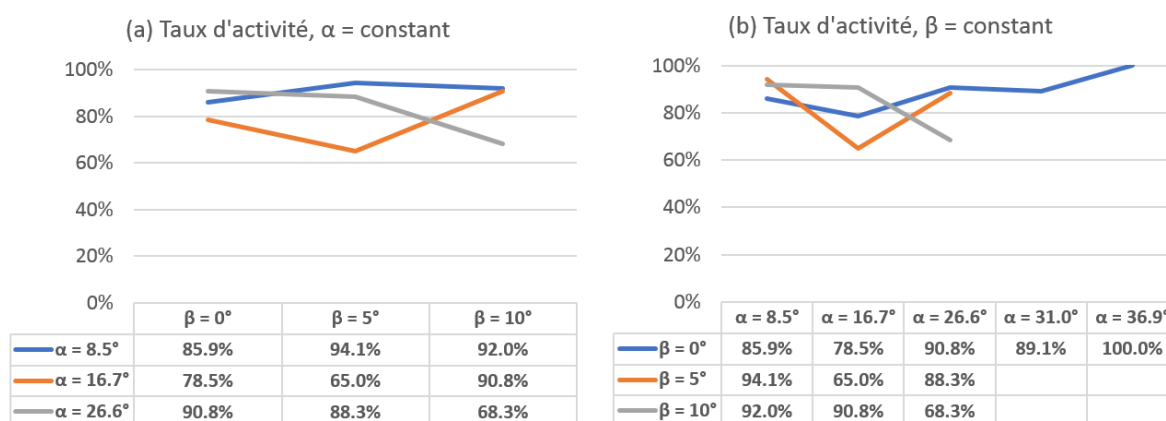


FIGURE 8.8 – Taux d'activité en fonction du dispositif étudié.

La Figure [8.8-b] montre qu'il n'est pas évident d'extraire une tendance générale entre les 3 pentes transversales. Nous identifions cependant une croissance du taux d'activité dans le cas d'une pente transversale nulle ($\beta = 0^\circ$) et une décroissance dans le cas d'une pente transversale maximale ($\beta = 10^\circ$). Dans le premier cas, les anguilles ont tendance à aller *droit au but* tandis que dans le second, elles prennent plus de temps dans leurs arrêts lorsque la pente longitudinale augmente.

Les arrêts des anguilles durant la remontée sont de deux types. Des arrêts courts (moins de 5 [s]) correspondent aux laps de temps durant lesquels les anguilles se décident à changer de direction. Durant ces courts instants, les anguilles évaluent différentes options avant de continuer à se déplacer. A la caméra, nous observons leurs têtes se déplacer dans plusieurs directions afin de décider quel chemin emprunter. Des arrêts plus longs (plus de 5 [s]) correspondent à des pauses plus ou moins longues (où les anguilles restent immobiles) suivies d'un changement de direction.

Distance parcourue pour la remontée

Grâce aux enregistrements vidéo, nous avons pu évaluer la distance moyenne parcourue par chaque anguille au cours de sa remontée en déterminant l'échelle à laquelle les

images étaient prises. Le coefficient d'échelle dépend bien entendu de la taille de la fenêtre informatique dans laquelle la vidéo est visualisée.

Nous avons également standardisé les résultats en fonction de la taille de chaque anguille et procédé à leur évaluation pour une longueur de rampe d'un mètre (entre le témoin aval et amont). La distance parcourue est donc simultanément divisée par la longueur réelle de l'auge de 1.17 [m] (qui représente également la plus courte distance pouvant être parcourue par une anguille pour remonter la rampe) et par la taille de l'anguille ([cm]). Mathématiquement, nous obtenons :

$$\text{Distance parcourue standardisée [-]} = \frac{1 \cdot \text{Distance parcourue}}{1.17 \cdot \text{Taille de l'anguille}} \left[\frac{[m] \cdot [m]}{[m] \cdot [m]} \right]$$

Nous avons une fois encore constitué des box-plots reprenant la distance moyenne de remontée par condition d'essais (Figure [8.9]). Nous avons ici aussi fait une distinction entre les influences des pentes longitudinale (Figure [8.10]) et transversale (Figure [8.11]). Les valeurs chiffrées à l'origine de ces box-plots sont reprises au Tableau [8.5].

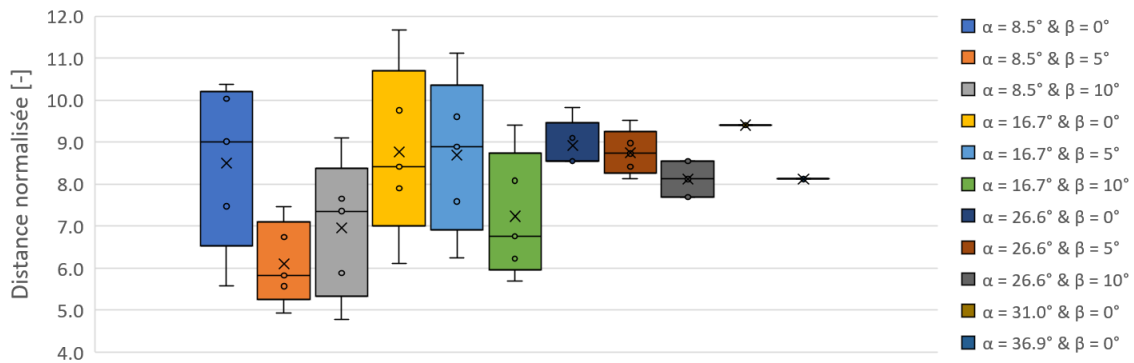


FIGURE 8.9 – Représentation graphique de la distance normalisée moyenne parcourue pour remonter la rampe en fonction des différentes conditions d'essais.

Conditions d'essais	Min.	Q 1	Médiane	Q 3	Max.	Moy.	Etendue
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	5.6	7.5	9.0	10.0	10.4	8.5	4.8
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	4.9	5.6	5.8	6.7	7.5	6.1	2.5
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	4.8	5.9	7.4	7.6	9.1	6.9	4.3
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	6.1	7.9	8.4	9.8	11.7	8.8	5.6
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	6.2	7.6	8.9	9.6	11.1	8.7	4.9
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	5.7	6.2	6.8	8.1	9.4	7.3	3.7
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	8.5	8.5	8.5	9.1	9.8	8.9	1.3
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	8.1	8.4	8.7	9.0	9.5	8.7	1.4
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	7.7	7.7	8.1	8.5	8.5	8.1	0.9
$\alpha = 31.0^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	0.0
$\alpha = 36.9^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	0.0

TABLE 8.5 – Valeurs caractéristiques permettant d'établir les box-plots des distances parcourues pour remonter la rampe pour les expériences menées sur les anguilles (les distances sont exprimées en centimètres).

De manière générale, la Figure [8.10] montre que la distance moyenne parcourue pour remonter la rampe augmente avec la pente longitudinale. Ainsi, plus la pente longitudinale augmente, plus les distances moyennes sont allongées. Seul le cas de la combinaison des pentes longitudinale $\alpha = 26.6^\circ$ et transversale $\beta = 0^\circ$ contredit cette tendance. Cependant, cet intervalle a été obtenu avec un seul individu. D'un point de vue statistique, le résultat de cet individu unique ne peut donc pas s'appliquer à l'ensemble du lot.

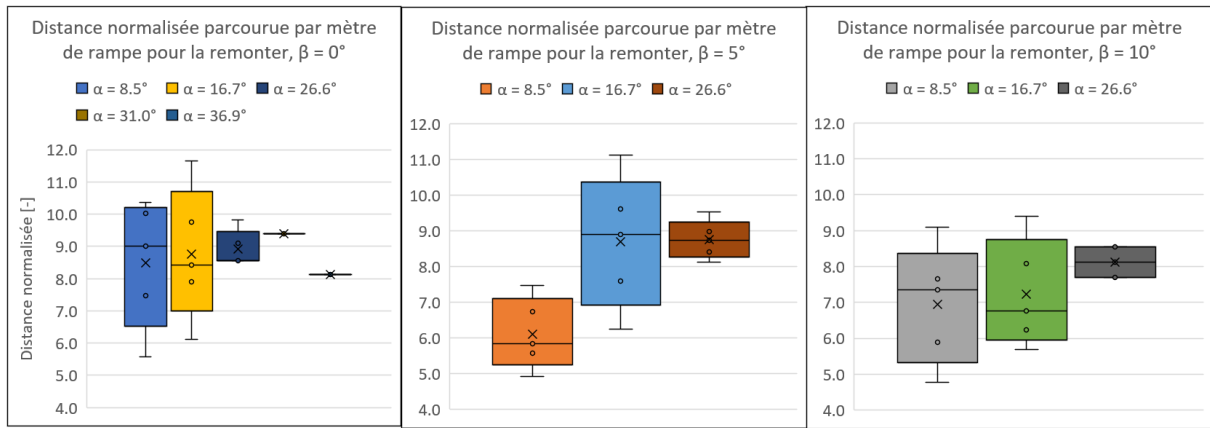


FIGURE 8.10 – Représentation graphique de la distance normalisée moyenne parcourue pour remonter la rampe en fonction de la pente longitudinale.

La Figure [8.11] montre que pour des pentes longitudinales supérieures, la distance parcourue décroît lorsque la pente transversale augmente. En revanche, il n'est pas possible d'identifier cette même tendance pour la pente longitudinale plus faible de $\alpha = 8.5^\circ$. La section [8.1.4] mettra en évidence que dans cette configuration, les anguilles n'ont pas privilégié le substrat de fond pour remonter la rampe. En effet, elles ont préféré utiliser le couloir I (couloir sous eau sans substrat : voir section [8.1.4]) qui est le chemin le plus court pour atteindre l'amont. De façon générale, nous pouvons donc observer que plus la pente transversale augmente, plus les distances moyennes diminuent.

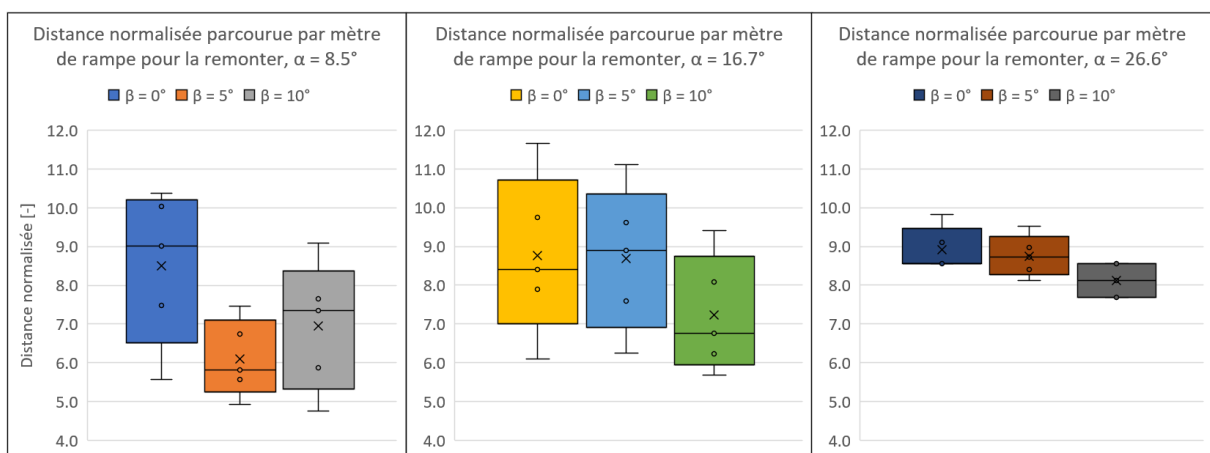


FIGURE 8.11 – Représentation graphique de la distance normalisée moyenne parcourue pour remonter la rampe en fonction de la pente transversale.

Vitesses de remontée

Puisque les distances parcourues et les temps de remontée sont connus, nous pouvons déterminer la vitesse moyenne de progression des anguilles au sein de la rampe. Celle-ci correspond au rapport entre la distance parcourue par les anguilles et le temps total (qui prend en compte les temps d'arrêts) nécessaire pour franchir la rampe. Cette vitesse peut être normalisée par la taille de l'anguille afin de faire abstraction de cette variable. La vitesse moyenne ne s'exprime donc plus en $[m/s]$ mais en $[BL/s]$ (body-length par seconde). D'un point de vue mathématique, nous obtenons :

$$\text{Vitesse moyenne } [BL/s] = \frac{\text{Distance parcourue}}{\text{Temps de remontée} \cdot \text{Taille de l'anguille}}$$

Les box-plots reprenant les vitesses moyennes de remontée par condition d'essais sont représentées à la Figure [8.12]). Les influences longitudinale et transversale sont respectivement visibles aux Figures [8.13] et [8.14]. Les valeurs chiffrées ayant permis d'établir ces box-plots sont reprises au Tableau [8.6].

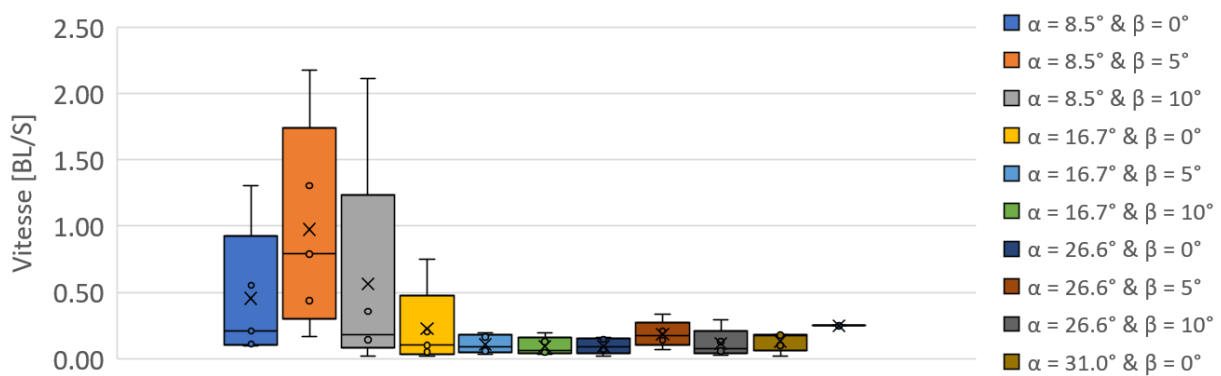


FIGURE 8.12 – Représentation graphique de la vitesse moyenne par body-length pour remonter la rampe en fonction des différentes conditions d'essais.

Conditions d'essais	Min.	Q 1	Médiane	Q 3	Max.	Moy.	Etendue
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	0.10	0.11	0.21	0.55	1.30	0.45	1.21
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	0.17	0.44	0.79	1.30	2.17	0.92	2.01
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	0.02	0.14	0.18	0.36	2.11	0.42	2.09
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	0.02	0.05	0.10	0.20	0.75	0.20	0.73
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	0.03	0.06	0.09	0.16	0.20	0.11	0.16
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	0.03	0.05	0.06	0.13	0.20	0.10	0.16
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	0.02	0.07	0.09	0.15	0.16	0.10	0.14
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	0.07	0.14	0.18	0.21	0.33	0.18	0.26
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	0.03	0.06	0.08	0.13	0.29	0.12	0.26
$\alpha = 31.0^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	0.02	0.10	0.18	0.18	0.18	0.13	0.16
$\alpha = 36.9^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.00

TABLE 8.6 – Valeurs caractéristiques permettant d'élaborer des box-plots de la vitesse relative des anguilles pour remonter la rampe (les vitesses sont exprimées en $[BL/s]$).

La Figure [8.13] met en évidence une certaine décroissance entre les différentes conditions lorsque la pente longitudinale augmente. A nouveau, le résultat du cas $\alpha = 26.6^\circ$ et $\beta = 0^\circ$ vient contredire cette observation mais il ne prête pas à conséquence sur la tendance puisqu'il provient d'un seul individu. Nous constatons que les vitesses moyennes diminuent proportionnellement avec une augmentation de la pente longitudinale.

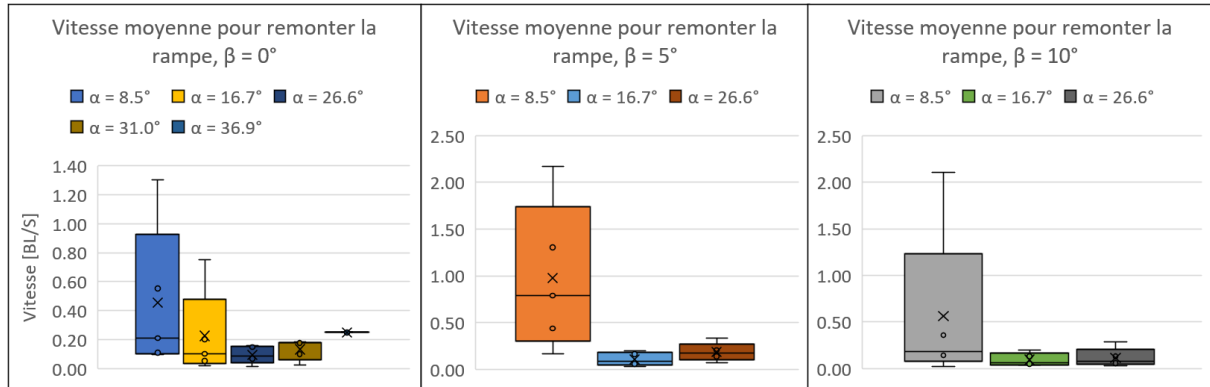


FIGURE 8.13 – Représentation graphique de la vitesse moyenne par body-length pour remonter la rampe en fonction de la pente longitudinale.

La Figure [8.14] montre qu'il n'est pas possible d'identifier une tendance générale selon la variation des pentes transversales. Néanmoins, pour le cas d'une pente longitudinale $\alpha = 16.7^\circ$ une décroissance est visible lorsque la pente transversale augmente.

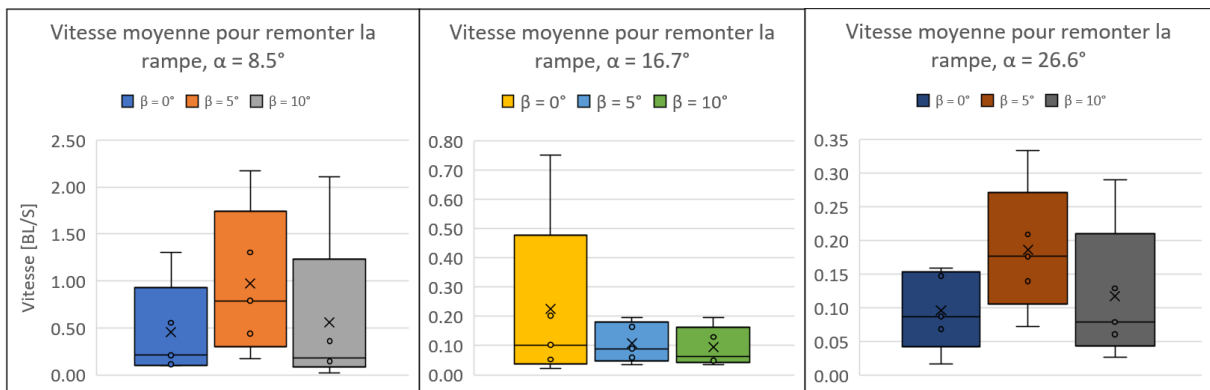


FIGURE 8.14 – Représentation graphique de la vitesse moyenne par body-length pour remonter la rampe en fonction de la pente transversale.

Dans le cas d'une rampe avec une pente longitudinale $\alpha = 8.5^\circ$, les vitesses sont plus importantes que dans les deux autres cas. La section [8.1.4] mettra en évidence que dans cette configuration, les anguilles privilégient en partie le couloir I (couloir sous eau sans substrat : voir section [8.1.4]) pour leurs remontées. Il s'agit du chemin le plus court pour atteindre l'amont, tant en termes de temps que de distance.

Angles réalisés dans le substrat

Les anguilles qui remontent le dispositif se déplacent entre les picots du substrat. Elles forment ainsi toutes formes d'angles compris entre 0° et 180° . La Figure [8.15] illustre ce phénomène. En plus des déplacements au sein des picots, les anguilles ont aussi utilisé le

couloir I (couloir sans substrat : voir section [8.1.4]) pour remonter la rampe. Dans ce cas, elles ne forment pas d'angle et remontent la rampe de façon rectiligne. Le temps et les outils d'analyses disponibles n'ont pas permis de systématiser ces observations.

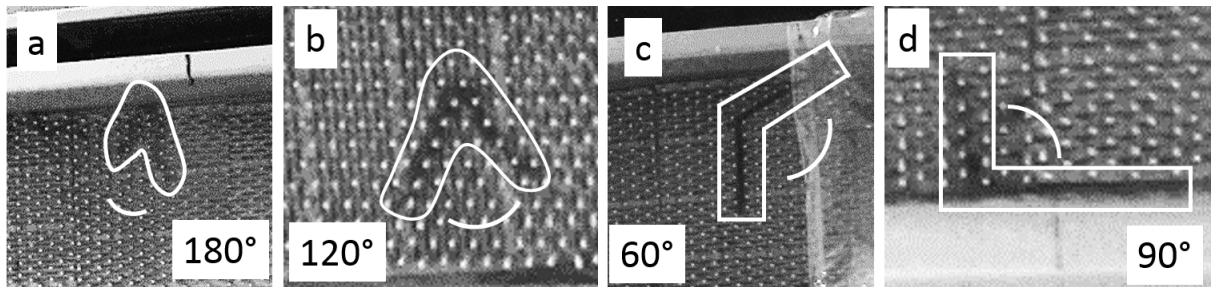


FIGURE 8.15 – Illustration des différents angles formés par les anguilles dans le substrat.

8.1.3 Nombre de remontées par tentatives de remontées

Définition

Afin de déterminer l'impact des pentes longitudinale et transversale sur l'évolution des anguilles dans la rampe, il est également intéressant de quantifier le nombre de remontées réalisées en fonction du nombre de tentatives. Celui-ci s'obtient en effectuant le rapport entre le nombre de remontées et le nombre de tentatives de remontées réalisées par condition d'essais.

Résultats

Les rapports sont indiqués dans le Tableau [8.7] pour chaque condition d'essais. Un mode opératoire identique aux cas de tentatives de remontées et de remontées elles-mêmes est appliqué pour obtenir les graphiques. Les Figures [8.16-a] et [8.16-b] illustrent respectivement l'influence des pentes longitudinale (α) et transversale (β) sur les remontées par tentatives de remontées constatées. De manière générale, le rapport entre le nombre de remontées et le nombre de tentatives de remontées augmente lorsque les pentes deviennent plus importantes. Cependant, cette observation n'est pas quantifiable et le peu de résultats à disposition ne permet pas d'établir de tendance affirmée.

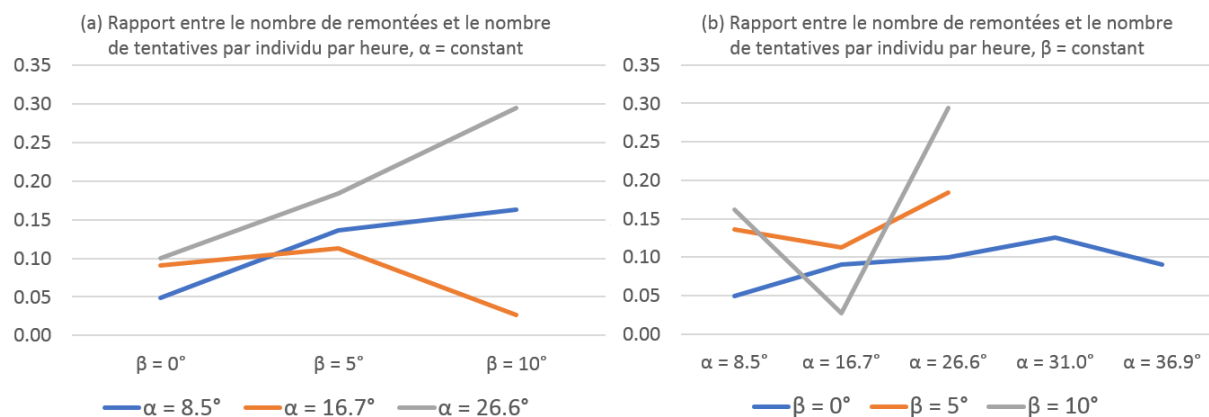


FIGURE 8.16 – Rapport des tentatives et des remontées en fonction du dispositif étudié.

Cond. d'essai	α	8.5°			16.7°			26.6°			31.0°	36.9°
	β	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	0°
Test 1		0.08	0.18	0.19	0.14	0.14	0.04	0.05	0.17	0.33	0.20	0.00
Test 2		0.04	0.12	0.13	0.06	0.07	0.02	0.13	0.20	0.25	0.11	0.13
Total (1&2)		0.05	0.14	0.16	0.09	0.11	0.03	0.10	0.18	0.29	0.13	0.09

TABLE 8.7 – Rapport entre le nombre de tentatives de remontées et le nombre de remontées elles-mêmes par condition d'essais.

8.1.4 Couloirs de remontée

Intéressons-nous maintenant au comportement de l'anguille en divisant la rampe en différents couloirs longitudinaux caractérisés par des hauteurs d'eau différentes.

Définition des couloirs de remontée

Chaque condition possède un écoulement différent en raison des variations de pente. Afin de caractériser celui-ci, il a été décidé de diviser la largeur de la rampe en différents couloirs dont les hauteurs d'eau varient. Pour déterminer un profil transversal des hauteurs d'eau propre à chaque condition d'essais, nous les avons mesurées à plusieurs endroits dans l'auge. La Figure [8.17] reprend l'ensemble des profils transversaux des lames d'eau pour chaque condition d'essais.

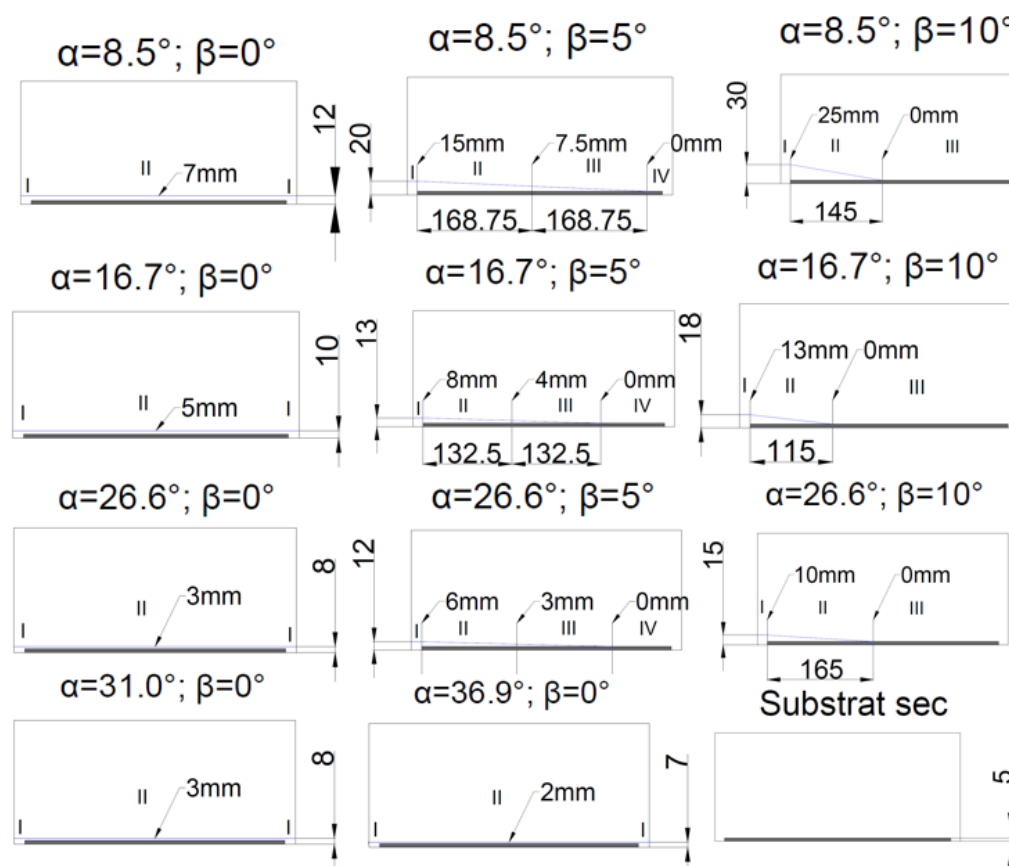


FIGURE 8.17 – Profils transversaux des hauteurs d'eau pour chaque condition d'essais (en bleu le substrat de type picot de 5mm d'épaisseur).

Le choix du nombre de couloirs est basé sur la géométrie de la pente transversale. En fonction de celle-ci, la rampe est divisée longitudinalement en plus ou moins de couloirs :

- Pour une pente transversale de 0° : 2 couloirs.
- Pour une pente transversale de 5° : 4 couloirs.
- Pour une pente transversale de 10° : 3 couloirs.

L'idée de cette division est d'isoler des couloirs ayant des conditions différentes d'écoulement dans la rampe :

- Le **couloir I** : il s'agit du couloir dans lequel il n'y a pas de substrat. Il est toujours sous eau et possède une largeur de 1.5 [cm].
- Le **couloir II** (dans le cas d'une pente transversale de 10°) **ou II et III** (dans le cas d'une pente transversale de 5°) : il s'agit des couloirs humidifiés munis d'un substrat. Dans le cas d'une pente transversale de 5° , nous avons décidé de diviser la zone humidifiée en deux parties car la quasi-totalité de la largeur de la rampe est sous eau. Dans les deux cas, le couloir II est toujours humidifié.
- Le **couloir III** (dans le cas d'une pente transversale de 10°) **ou IV** (dans le cas d'une pente transversale de 5°) : il s'agit des couloirs secs, sans écoulement d'eau.

Pour rappel, le diamètre moyen des anguilles est de 5 [mm], ce qui permet de constater qu'elles privilégient les zones dans lesquelles elles sont partiellement ou complètement immergées sous la lame d'eau et ce peu importe la condition d'essais étudiée.

Résultats

Grâce au time code des enregistrements vidéo, nous avons déterminé deux paramètres : le temps écoulé et la distance parcourue par l'anguille dans un couloir en particulier. De cette façon, nous observons les taux d'utilisation de chaque couloir en fonction du temps et de la distance qu'elle y aura parcouru. Ceux-ci sont repris dans le Tableau [8.8].

Conditions d'essais		Temps				Distance			
		Zones d'activité				Zones d'activité			
α	β	I	II	III	IV	I	II	III	IV
8.5°	0°	25.0%	75.0%	/	/	25.0%	75.0%	/	/
8.5°	5°	66.7%	33.3%	0.0%	0.0%	77.8%	22.2%	0.0%	0.0%
8.5°	10°	20.0%	80.0%	0.0%	/	40.0%	53.3%	6.7%	/
16.7°	0°	0.0%	100.0%	/	/	0.0%	100.0%	/	/
16.7°	5°	12.5%	87.5%	0.0%	0.0%	37.5%	50.0%	12.5%	0.0%
16.7°	10°	0.0%	100.0%	0.0%	/	0.0%	100.0%	0.0%	/
26.6°	0°	0.0%	100.0%	/	/	0.0%	100.0%	/	/
26.6°	5°	0.0%	71.4%	14.3%	14.3%	0.0%	57.1%	14.3%	28.6%
26.6°	10°	0.0%	100.0%	0.0%	/	0.0%	100.0%	0.0%	/
31.0°	0°	0.0%	100.0%	/	/	0.0%	100.0%	/	/
36.9°	0°	0.0%	100.0%	/	/	0.0%	100.0%	/	/

TABLE 8.8 – Proportions des taux d'utilisation en termes de temps et de distance pour chaque condition d'essais.

La Figure [8.18] illustre le taux d'utilisation de chaque couloir en fonction du temps que l'anguille y a passé tandis que la Figure [8.19] illustre le taux d'utilisation de chaque

couloir en fonction de la distance que l'anguille y a parcouru. Nous avons décidé de ne pas présenter les résultats combinés en fonction de la pente longitudinale pour éviter toute confusion en utilisant un nombre différent de couloirs humidifiés par condition. Il s'indique d'interpréter ces résultats avec précaution car chaque condition d'essais possède des tailles de couloirs et des conditions différentes d'écoulement. Certains points communs entre les couloirs permettent toutefois de comparer les différents dispositifs entre eux.

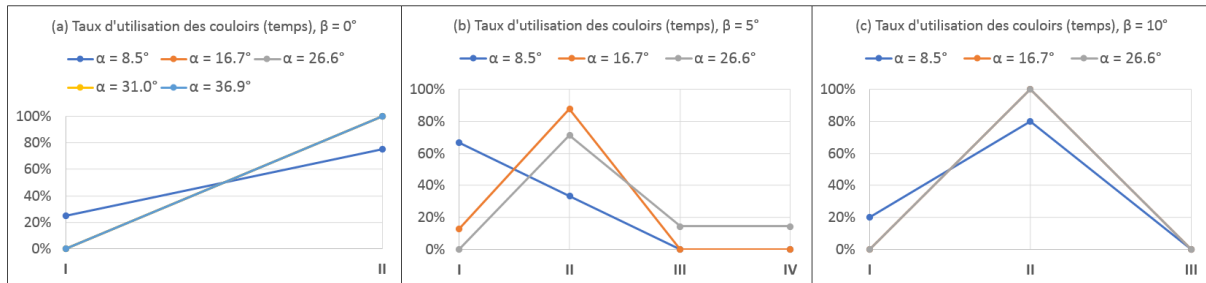


FIGURE 8.18 – Taux d'utilisation de chaque couloir selon le temps que l'anguille y a passé en fonction de la pente transversale.

Les Figures [8.18] et [8.19] mettent en évidence que la zone II (zone humidifiée avec la hauteur d'eau la plus élevée sur le substrat) est privilégiée pour remonter la rampe à partir d'une certaine pente longitudinale, tant en termes de temps passé que de distance parcourue. En effet, pour une pente longitudinale très faible, les anguilles utilisent encore régulièrement la portion de rampe qui ne possède pas de substrat. En revanche, dès que la pente augmente légèrement, l'anguille utilise systématiquement une zone humidifiée avec substrat. Son utilisation est donc nécessaire au franchissement des anguilles.

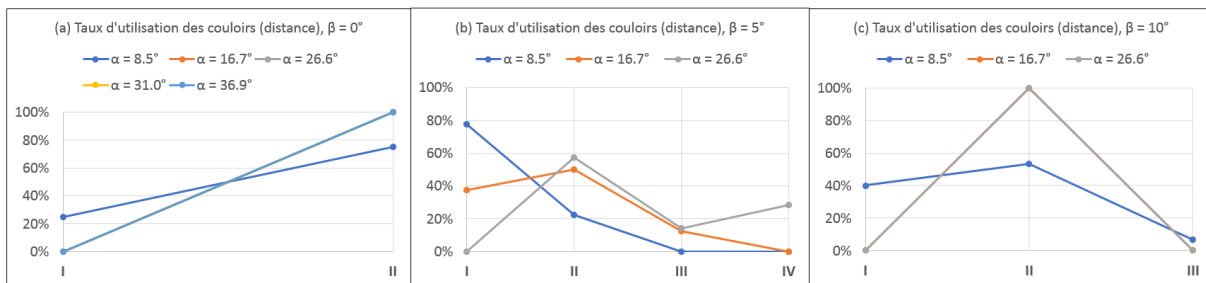


FIGURE 8.19 – Taux d'utilisation de chaque couloir selon la distance que l'anguille y a parcouru en fonction de la pente transversale.

Vitesse de progression dans les couloirs

La vitesse de progression des anguilles dans les différents couloirs est aussi quantifiable. Elle est déterminée en calculant le rapport entre la distance parcourue par l'anguille dans chaque couloir et le temps (sans les arrêts) que l'anguille a pris pour parcourir cette distance. Les box-plots reprenant ces vitesses de progression par condition d'essais et par couloir sont repris aux Figures [8.20], [8.21] et [8.22].

Lorsque les anguilles empruntent le couloir I, qui correspond à la portion sous eau sans substrat, la vitesse chute lorsque la pente longitudinale augmente (Figure [8.20]). Pour les autres couloirs humidifiés (Figures [8.21] et [8.22]), les vitesses de progression sont assez

variables et sans tendance.

Les valeurs chiffrées ayant permis d'établir ces box-plots sont reprises aux Tableaux [8.9], [8.10], [8.11].

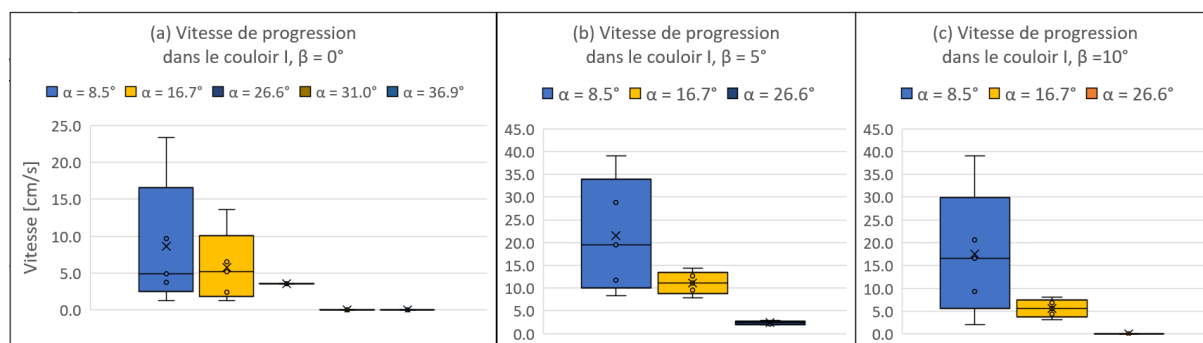


FIGURE 8.20 – Intervalles de vitesse obtenus dans le couloir I.

Condition d'essais	Min.	Q 1	Médiane	Q 3	Max.	Moy.	Etendue
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	1.3	3.8	4.9	9.7	23.4	8.6	22.1
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	8.4	11.7	19.5	28.7	39.0	20.9	30.7
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	2.0	9.3	16.5	20.6	39.1	16.0	37.2
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	1.3	2.4	5.2	6.5	13.6	5.8	12.3
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	7.9	9.5	11.1	12.7	14.3	11.1	6.4
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	3.2	4.4	5.7	6.9	8.1	5.7	5.0
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	0.0
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	1.9	2.1	2.4	2.6	2.8	2.4	0.9
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$\alpha = 31.0^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$\alpha = 36.9^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABLE 8.9 – Valeurs caractéristiques permettant d'établir les box-plots de la vitesse des anguilles dans le couloir I.

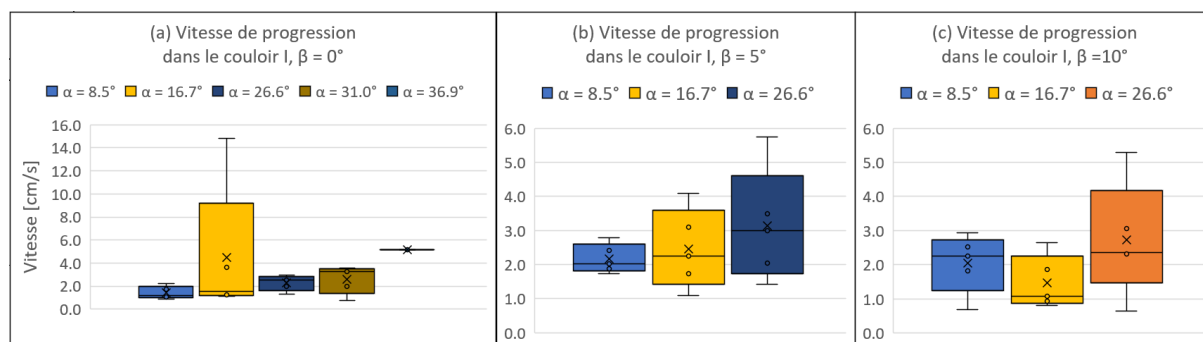


FIGURE 8.21 – Intervalles de vitesse obtenus dans le couloir II.

Condition d'essais	Min.	Q 1	Médiane	Q 3	Max.	Moy.	Etendue
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	0.9	1.0	1.2	1.7	2.2	1.4	1.3
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	1.7	1.9	2.0	2.4	2.8	2.2	1.0
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	0.7	1.8	2.3	2.5	2.9	2.0	2.3
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	1.1	1.3	1.6	3.6	14.8	3.9	13.7
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	1.1	1.7	2.2	3.1	4.1	2.4	3.0
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	0.8	0.9	1.1	1.9	2.7	1.5	1.8
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	1.3	1.9	2.5	2.7	2.9	2.3	1.6
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	1.4	2.0	3.0	3.5	5.7	3.0	4.3
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	0.6	2.3	2.4	3.1	5.3	2.7	4.6
$\alpha = 31.0^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	0.7	2.0	3.2	3.4	3.6	2.5	2.8
$\alpha = 36.9^\circ$ & $\beta = 0^\circ$	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	0.0

TABLE 8.10 – Valeurs caractéristiques permettant d'établir les box-plots de la vitesse des anguilles dans le couloir II.

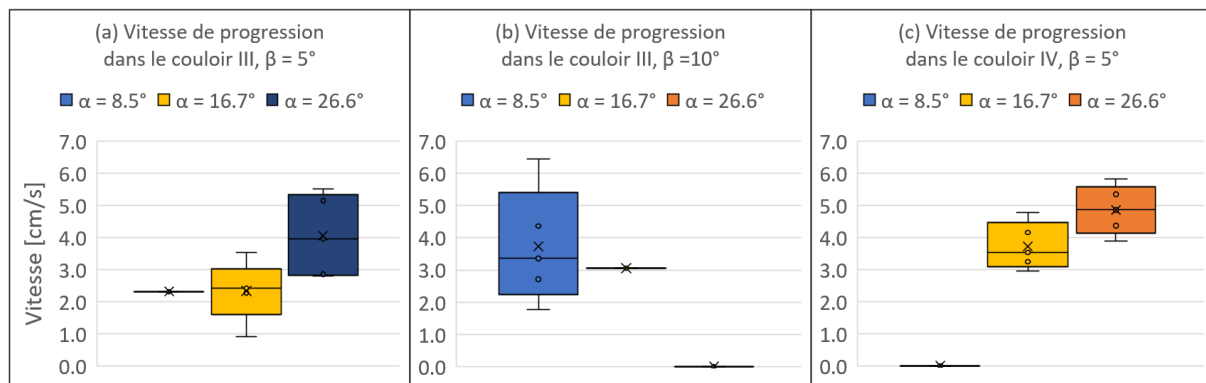


FIGURE 8.22 – Intervalles de vitesse obtenus dans les couloirs III et IV.

Coulors III								
Condition d'essais	Min.	Q 1	Médiane	Q 3	Max.	Moy.	Etendue	
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	0.0	
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	0.9	2.3	2.4	2.5	3.5	2.4	2.6	
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	2.8	2.9	4.0	5.2	5.5	4.1	2.7	
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	1.8	2.7	3.4	4.4	6.4	3.7	4.7	
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	0.0	
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 10^\circ$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Coulors IV								
Condition d'essais	Min.	Q 1	Médiane	Q 3	Max.	Moy.	Etendue	
$\alpha = 8.5^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
$\alpha = 16.7^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	3.0	3.2	3.5	4.1	4.8	3.8	1.8	
$\alpha = 26.6^\circ$ & $\beta = 5^\circ$	3.9	4.4	4.9	5.3	5.8	4.9	1.9	

TABLE 8.11 – Valeurs caractéristiques permettant d'établir les box-plots de la vitesse des anguilles dans les couloirs III et IV.

8.1.5 Paramètres du lot

Mortalité

Un seul cas de mortalité est à déplorer au terme des expérimentations. L'individu a réussi à quitter le modèle et a été aspiré par la pompe en raison de l'absence d'un embout filtrant à l'extrémité du tuyau. Les lésions induites par la pompe ont entraîné la mort de l'individu 2 jours après l'accident.

Distribution des tailles

La distribution des tailles de l'ensemble des individus ayant participé aux expériences ne s'éloigne pas considérablement de celle de l'ensemble du lot. Cela signifie que le type de substrat choisi est adapté à la gamme de taille utilisée. Une comparaison entre ces deux distributions est illustrée à la Figure [8.23].

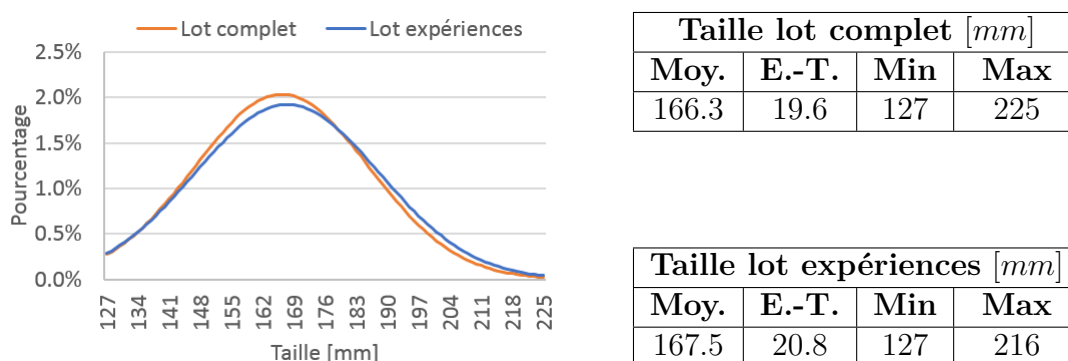


FIGURE 8.23 – Distribution statistique de la taille des anguilles ayant participé aux expériences.

8.2 Discussion

8.2.1 Analyse

En raison du faible nombre de répliques (2), de la courte durée des tests (40 [min]), du faible nombre d'individus utilisés pour chaque condition d'essais (5) et de l'impossibilité de différencier les spécimens entre eux, aucune discussion ne sera établie sur base des résultats individuels. Les limitations expérimentales ne permettent en effet pas de réaliser des tests statistiques fiables et représentatifs de la réalité quant au nombre d'individus capables de franchir une rampe dotée d'un substrat de type picot. En revanche, certaines observations générales peuvent être faites. D'une part, les chiffres montrent une influence des pentes longitudinale et transversale sur la remontée des individus. D'autre part, les expérimentations ont mis en évidence que plusieurs anguilles favorisent une certaine zone du tapis picot pour opérer leurs mouvements. Ces deux constatations permettent de formuler des observations quant à l'utilisation de ce type de substrat pour une rampe à anguilles.

Premièrement, les enregistrements vidéo ont mis en évidence des tendances comportementales intéressantes concernant le choix du couloir préférentiel de remontée. Tout

d'abord, les anguilles vont largement privilégier le couloir II. Même si sa largeur peut varier d'une condition d'essais à l'autre, cette portion de rampe est systématiquement revêtue du substrat humidifié avec la hauteur d'eau la plus élevée (Figure [8.17]). Cette tendance est valable pour une pente transversale (β) nulle ou égale à 10° , quelle que soit la condition de la pente longitudinale. Elle s'observe à la fois en ce qui concerne les intervalles de temps les plus longs passés sur la rampe (Figure [8.18]) et sur la plus longue distance parcourue sur la rampe (Figure [8.19]).

Cependant, lorsque la pente transversale est intermédiaire ($\beta = 5^\circ$) et que la pente longitudinale est minimale ($\alpha = 8.5^\circ$), les anguilles vont favoriser le couloir I qui est celui sans substrat à la hauteur d'eau la plus élevée (Figure [8.17]). En revanche, dès que la pente longitudinale augmente, elles vont immédiatement adapter leur comportement et se diriger vers le couloir II humidifié. De manière générale, nous constatons que pour des pentes longitudinales proches de celles d'ouvrages existants, les anguilles privilégient le substrat pour remonter la rampe et celui-ci montre donc toute son utilité.

Deuxièmement, il convient d'évaluer si un dispositif de remontée présente un nombre de remontées plus élevé, gage d'une plus grande efficacité. Avec les résultats à notre disposition, il est difficile de tirer une tendance liée à l'évolution de la pente transversale ou de la pente longitudinale sur le nombre de remontées (Figure [8.4]). Nous remarquons tout de même que le nombre de remontées décroît lorsque la pente longitudinale augmente (Figure [8.4-b]). Cette observation est évidente puisqu'il est a priori plus difficile de gravir un obstacle plus abrupt.

Par ailleurs, nous observons qu'en fonction de la pente longitudinale choisie pour une rampe spécifique à anguilles avec substrat de type picot (dans les mêmes conditions d'écoulement que les essais réalisés), il est préférable d'introduire une pente transversale pour maximiser le nombre de remontées horaires. Dans la réalité, un ouvrage rentable présentera une pente longitudinale la plus élevée possible. Il est donc important de savoir jusqu'à quelle pente longitudinale il est envisageable de construire tout en gardant un taux de franchissement relativement acceptable, et d'analyser si une pente transversale peut permettre d'augmenter la pente longitudinale de l'ouvrage. Les constatations qui ressortent de notre étude pour les différentes combinaisons de pentes sont les suivantes :

1. Pour une pente longitudinale minimale ($\alpha = 8.5^\circ$), il est préférable d'introduire une pente transversale maximale ($\beta = 10^\circ$).
2. Pour une pente longitudinale intermédiaire de $\alpha = 16.7^\circ$, il est préférable d'introduire une pente transversale de maximum $\beta = 5^\circ$. Au-delà, le nombre de remontées diminuerait.
3. Pour une pente longitudinale intermédiaire de $\alpha = 26.6^\circ$, il est préférable d'introduire une pente transversale intermédiaire ($\beta = 5^\circ$).
4. Les cas des pentes longitudinales supérieures à $\alpha = 26.6^\circ$ montrent une décroissance nette du nombre de remontées. Cependant, ces essais n'ont été réalisés qu'avec une pente transversale nulle ($\beta = 0^\circ$). Sur cette base uniquement, nous concluons que si une pente transversale nulle est choisie dans la construction d'une rampe à anguilles, il vaut mieux la combiner avec des pentes longitudinales plus faibles.

Nous constatons aussi que l'introduction d'une pente transversale influence le nombre de remontées et que ce sont les trois premiers cas présentés ci-dessus qui maximisent le nombre

de remontées. En outre, ces mêmes trois cas ont montré que les anguilles ont à chaque fois privilégié la zone II pour remonter la rampe. Le substrat montre à nouveau toute son utilité.

Troisièmement, une analyse des vitesses moyennes des anguilles a été faite en fonction des différentes conditions d'essais. Ce paramètre peut donner des indications sur les éventuels retards à la remontée d'un certain type de dispositif. Les résultats des vitesses représentés graphiquement aux Figures [8.13] et [8.14] ne permettent pas de mettre cela en évidence pour une pente transversale constante. En revanche, pour une pente transversale identique, la vitesse $[BL/s]$ va diminuer avec la pente longitudinale. Cela signifie que pour une pente longitudinale minimale ($\alpha = 8.5^\circ$), les vitesses seront maximales. Cependant, ces résultats ne différencient pas les couloirs utilisés et ils sont dès lors difficiles à interpréter. Il est donc plus cohérent d'étudier l'influence des pentes sur les vitesses de déplacement des anguilles dans le couloir II puisque ce dernier est privilégié.

La Figure [8.21] et le Tableau [8.10] montrent d'une part qu'il y a une tendance à la hausse des vitesses de progression dans le couloir II pour une pente transversale intermédiaire $\beta = 5^\circ$ et une pente longitudinale qui croît. Ces observations restent discutables et nécessitent des tests supplémentaires compte tenu de la petite taille de l'échantillon analysé. En moyenne, les vitesses de progression dans la zone II sont de l'ordre de $3.0 [cm/s]$ et leur ordre de grandeur ne varie pas considérablement avec la pente transversale.

En conclusion, nous pouvons affirmer qu'il y a une influence des pentes transversale et longitudinale ainsi que du substrat sur l'évolution des anguilles dans la rampe. L'introduction d'une pente transversale favorise la remontée des anguilles et l'utilisation d'un substrat est nécessaire puisque la voie II est largement privilégiée pour des pentes longitudinales plus importantes. Aucune anguille n'est d'ailleurs capable de gravir la rampe sans utiliser le substrat pour des pentes longitudinales supérieures proches d'ouvrages existants. Il est difficile de comparer l'ensemble de nos résultats aux résultats de la littérature car les paramètres sur lesquels nous pouvions jouer étaient restreints. En effet, notre débit était fixe, la durée des essais réduite et le nombre d'individus par essai limité en comparaison à ce qui s'est déjà fait dans d'autres études. Au terme des essais, il semble qu'un substrat de type picot présente des taux de remontées moindres que d'autres substrats pour des pentes de rampe proches d'ouvrages existants. C'est notamment le cas pour deux études (présentées à la section [2.3]) qui obtiennent des taux de franchissement dépassant 50% pour des pentes longitudinales situées entre 30° et 50° (Jellyman et al., 2017; Watz et al., 2019). Ce constat doit être nuancé compte tenu de la taille de notre échantillon et des conditions d'essais.

Notre substrat ouvre toutefois des perspectives puisqu'il favorise les remontées lorsque la pente longitudinale augmente. A l'issue des expérimentations, nous ne sommes néanmoins pas en mesure de le recommander dans sa configuration actuelle pour la gamme de taille ciblée. Pour cela, il faudrait réaliser des essais jouant sur les paramètres géométriques du substrat afin de réellement montrer son intérêt ou non par rapport à d'autres dispositifs performants. De plus, les essais réalisés par Legault (1992) sur des rampes à anguilles mettent en évidence qu'une pente longitudinale de 30° est une valeur minimale à viser. Elle montre des taux de franchissement efficaces tout en restant relativement rentable en termes de coût. L'optimum économique se dirige cependant vers des pentes plus élevées et l'étude d'un autre substrat permettrait d'obtenir des résultats plus convaincants pour des

rampes plus pentues.

A la lecture de nos résultats, une pente surpassant 30° ne présente pas la même réussite avec un substrat de type picot et remet donc en question l'avantage de celui-ci sur d'autres dispositifs. Le fait de pouvoir faire varier les paramètres géométriques des picots (hauteur, diamètre, espacement) peut servir à mettre en évidence une configuration plus efficace. Cependant, un point commun entre nos résultats et ceux de la littérature est le fait que la pente transversale montre de l'intérêt dans la mesure où elle favorise le nombre de remontées des anguilles.

Le peu de résultats quantifiables expliqué par les conditions d'essais relativement précaires imposées par les contingences du confinement dictées par la Covid-19 ne permet pas d'affirmer de manière statistique fiable les résultats avancés. Nous pouvons cependant lancer des pistes pour poursuivre ce type d'étude.

8.2.2 Pistes d'amélioration

Au terme de l'analyse des résultats liés à l'influence des pentes longitudinale et transversale d'une rampe sur l'évolution d'anguilles, aucune constatation ne peut être généralisée avec certitude. Plusieurs raisons sont avancées et proviennent principalement des limitations expérimentales : modèle réduit, matériel disponible, nombre et durée des essais, etc. Toutefois, des pistes d'amélioration peuvent être mises en œuvre afin d'affiner les résultats.

Tout d'abord, le nombre d'individus et le temps consacré par expérience devrait être augmenté afin de pouvoir dégager des tendances comportementales plus représentatives de la réalité. En effet, limiter le nombre d'individus à dix par condition d'essais et ne les observer que 40 minutes permet de dégager des comportements mais pas de quantifier statistiquement l'efficacité d'un dispositif à l'ensemble d'une population. Pour ce faire, il conviendrait de réitérer les expériences sur des durées plus longues, avec plus d'individus par condition d'essais et de répliquer celles-ci plusieurs fois.

Ensuite, les expériences devraient aussi être réalisées de nuit car les anguilles sont des espèces nocturnes (Van Veen et al., 1976). La réalisation unique d'essais en pleine journée n'est pas tout à fait représentative de la réalité. Des expériences sur des périodes de 24h suivant un cycle circadien calqué sur celui des périodes de remontée des anguilles dans la réalité peut améliorer la qualité des résultats. Ce genre de tests nécessite des caméras de type infrarouge capables d'enregistrer dans l'obscurité.

Finalement, la grosse problématique dans le cadre des expériences menées sur les anguilles a été la limitation à l'accès à du matériel technique. Il a fallu réaliser les expériences avec des moyens et des accès limités en raison du confinement. Afin de rendre le modèle plus performant, il faudrait pouvoir mesurer avec précision les angles des pentes et les débits ainsi qu'imaginer une configuration qui permettrait d'identifier les individus avec la technologie PIT. De plus, il serait judicieux d'installer d'une part un bac aval qui ne soit pas entièrement influencé par les vitesses dans la rampe afin de pouvoir en étudier l'attractivité, et d'autre part un bac amont dans lequel il serait possible de piéger les anguilles afin d'éviter tout phénomène d'apprentissage ou d'allers-retours dans la rampe.

Chapitre 9

Conclusions et perspectives

9.1 Conclusions

Notre mémoire s'est attaché à étudier la problématique de la préservation de la continuité écologique des rivières et plus particulièrement l'optimisation des ouvrages de franchissement. Ceux-ci ont montré leur efficacité en ce qui concerne le contournement des constructions hydrauliques humaines (tels que les barrages) par les poissons migrateurs. Nous avons analysé les comportements de deux espèces du bassin mosan : celui du saumon atlantique et celui de l'anguille européenne. Nos travaux ont pris place au Laboratoire de la Direction des Recherches Hydrauliques *André Sterling* du Service Public de Wallonie à Châtelet. Ce choix s'est justifié par le fait qu'un modèle réduit de la passe à bassins de Rivière à l'échelle 1 : 5 y est disponible.

Au cours des années académiques précédentes, différents travaux ont été menés sur ce modèle, à la fois sur les conditions hydrauliques de l'écoulement et sur le comportement de matériel vivant en son sein. Ceux-ci ont permis de déterminer les dimensions physiques finales à adopter pour la rénovation de la passe de Rivière au moyen d'outils numériques. Ils ont également montré qu'une passe à bassins, initialement prévue pour les bons nageurs que sont les salmonidés, pouvait être adaptée à la montaison d'autres espèces, notamment au moyen de rugosités de fond. Nous avons poursuivi ces études en nous focalisant sur deux aspects spécifiques. Le premier consistait à améliorer les conditions de franchissement d'une passe à poissons. Le second cherchait à ouvrir la possibilité d'adapter une passe à bassins à une espèce atypique : l'anguille européenne.

Deux objectifs distincts avaient été fixés dès le départ de notre projet. Le premier s'attachait à étudier l'influence d'un dispositif d'ombrage sur les modalités de montaison d'un poisson. Pour ce faire, trois conditions d'essai ont été élaborées : le modèle réduit dans sa disposition actuelle avec les parois transparentes (dispositif *brut*), le même modèle dont les parois ont été opacifiées (dispositif *opacifié*) et une dernière configuration où le dessus des bassins est recouvert d'une moustiquaire pour simuler l'effet d'un ombrage (dispositif *ombragé*). L'espèce choisie pour effectuer ces tests était le saumon atlantique en raison de l'efficacité de sa capacité de remontée établie au cours de tests précédents.

Le deuxième objectif était de modifier les conditions de rugosité du revêtement du modèle réduit afin que des anguilles puissent emprunter une passe à bassins à échancrures verticales. Différents types de substrats devaient être utilisés et étudiés afin de faciliter les

conditions de nage de l'espèce dans ce type d'ouvrage. En raison des conditions sanitaires imposées par les autorités académiques et gouvernementales lors de la pandémie de Covid-19, cet objectif n'a pas pu être conduit à son terme tel que nous l'avions idéalement souhaité. Néanmoins, nous avons élaboré et présenté dans ce mémoire un protocole expérimental qui sera poursuivi par Gil Zorzan et son équipe au hall d'essais de Châtelet.

Pour pallier ce contretemps, nous avons réorienté nos recherches en développant un troisième objectif qui nous permettait d'exploiter le travail entrepris. Afin de valoriser les anguilles à disposition, un modèle simplifié a été construit à l'aide d'une auge d'alevinage pour reconstituer une rampe à anguilles. Celui-ci a été utilisé pour évaluer l'influence des pentes longitudinale et transversale sur la progression de jeunes anguilles à travers un substrat de type picot.

Voici nos conclusions pour chacun des trois objectifs.

L'objectif d'analyse de l'influence d'un dispositif d'ombrage sur l'augmentation des montaisons recensées en journée n'a pas montré de tendance franche d'un dispositif à l'autre. De manière générale, relativement peu d'individus sont parvenus à s'engager dans le modèle réduit. Nous émettons donc l'hypothèse que l'attractivité pourrait être améliorée et faire l'objet d'une analyse approfondie. Même si l'activité des poissons semble légèrement augmenter en présence d'un dispositif occultant les parois, le nombre de poissons attirés et/ou ayant franchi la passe est équivalent d'une configuration d'essais à l'autre. Au-delà de ce constat, la présence d'un ombrage supérieur, simulé par un film moustiquaire, ne semble pas marquer de changement dans la montaison des jeunes saumons. Les résultats obtenus ne permettent donc pas d'affirmer que l'ombrage soit une solution qui incite plus ces poissons à franchir une passe pendant la journée.

Par ailleurs, nous avons observé des comportements déjà remarqués au cours d'expérimentations antérieures. En effet, il semble que le saumon atlantique privilégie ses mouvements lors des périodes de transition entre le jour et la nuit. Son caractère crépusculaire et son cycle biologique interne prédominent sur des aides à la montaison apportées en journée. D'autre part, sur le nombre total de tacons arrivés à l'amont, certains se sont trompés de canal et ont emprunté le canal d'attrait. Ce comportement illustre la capacité de nage supérieure du saumon puisque les différences de vitesse entre la passe et le canal d'attrait atteignent localement des facteurs de 3-4.

Nous avons aussi constaté une très grande mortalité au cours du mois d'essais consacré à l'étude de l'ombrage. Une photopériode relativement proche de la saison du printemps, couplée à une température d'eau supérieure aux conditions idéales, a accéléré la métamorphose des tacons en smolts. Cela semble confirmer que la photopériode, et plus spécifiquement l'exposition à la lumière, favorise la smoltification des salmonidés. Les paramètres biologiques requis à ce stade sont ceux d'un milieu marin. De plus, la motivation des smolts à remonter la passe diminue puisqu'ils cherchent à dévaler les rivières pour rejoindre la mer afin d'y développer leur croissance. Ces raisons peuvent expliquer la faible quantité de franchissements recensés.

En ce qui concerne l'objectif de modification de rugosité du revêtement du modèle réduit, les tests préliminaires effectués en vue d'adapter une passe à bassins ont montré

que des rugosités de fond couplées à des zones de recirculation étendues permettaient d'envisager le franchissement de la passe par les anguilles les plus vigoureuses. En effet, les anguilles sont des espèces aux vitesses de nage très faibles qui utilisent les substrats et leurs capacités de reptation pour progresser face au courant qui leur fait face dans un ouvrage de franchissement. Il sera d'ailleurs intéressant de suivre les résultats qui seront récoltés durant les mois de juin et juillet par l'équipe de Gil Zorzan à propos du protocole expérimental proposé dans ce travail.

L'étude de l'influence des pentes longitudinale et transversale sur le comportement des anguilles dans une rampe qui leur est consacrée - qui correspond au troisième objectif de ce mémoire - a montré que les pentes ont un impact sur leur comportement. Lorsque la pente longitudinale passe au-delà d'un certain angle, les remontées se font plus rares. En revanche, la pente transversale montre son intérêt puisqu'une fois introduite, elle enregistre un plus grand nombre de remontées. Une pente transversale accompagnée d'un substrat de type picot a pour sa part favorisé la remontée des anguilles.

Le substrat de type picot est largement utilisé dans la remontée des anguilles. Il donne une liberté de mouvement totale à l'anguille dans sa progression car elle peut former des angles plus ou moins grands pour changer de direction. L'anguille ne semble donc pas être bloquée par ce genre d'aide à la remontée. De plus, les anguilles favorisent la zone humidifiée du substrat qui possède la plus haute lame d'eau afin de remonter la rampe. Cela signifie que cette portion de rampe située en contrebas de la pente transversale est fortement favorisée par les individus.

Enfin, lorsque les résultats chiffrés obtenus sont mis en relation avec d'autres dispositifs performants et actuellement utilisés, le substrat de type picot ne présente pas les meilleurs taux de remontée. Dans une optique où ce substrat serait étendu et substitué aux dispositifs de type plots et brosses dont l'efficacité est actée, il serait judicieux de configurer ses paramètres géométriques. En effet, l'espacement semble être le facteur limitant qui freine certains individus de diamètre supérieur.

Sur base de nos différentes conclusions, quelles pourraient être des pistes futures de recherche ? C'est ce que nous évoquerons dans la dernière section de ce mémoire.

9.2 Perspectives

Au terme des travaux expérimentaux effectués, nous avons fourni des réponses aux trois objectifs définis en préambule. Même si l'objectif concernant l'adaptation d'une passe à bassins n'a pas pu être entièrement finalisé, il sera toutefois poursuivi par l'équipe de Gil Zorzan. Les tests complémentaires offriront des réponses sur l'opportunité ou non d'adapter des passes à bassins aux moins bons nageurs. En outre, ils permettront de vérifier si ce type de disposition élaborée pour la montaison de l'anguille ne gêne pas les autres espèces habituées à des revêtements sans substrat.

D'autre part, même si les essais menés sur l'ombrage n'ont pas été concluants, il serait opportun de repartir du protocole expérimental établi en adaptant certains éléments. Une première idée serait de travailler dans des conditions de température et d'éclairement adaptés spécialement aux espèces salmonicoles. Cela passe par une baisse de la tempé-

rature de l'eau et une photopériode réduite qui permettent d'éviter la smoltification des poissons. Il est concevable que ces conditions nécessitent des périodes expérimentales plus conséquentes mais elles sont nécessaires à l'obtention de résultats statistiques pertinents.

Une deuxième idée consiste à envisager l'utilisation d'espèces au rythme d'activité différent. Puisque le saumon atlantique est une espèce crépusculaire, la majorité de ses mouvements s'opèrent à des heures où l'effet de l'ombrage n'est pas visible. Un poisson à l'activité principalement diurne permettrait de mieux évaluer l'influence de l'ombrage sur son franchissement. Le choix pourrait se porter sur le gardon, une espèce mosane pour laquelle des tests n'ont pas encore été réalisés sur le modèle réduit de la passe de Rivière. A l'inverse, repartir du même raisonnement avec une espèce nocturne ne semble pas approprié dans ce contexte.

Ensuite, il apparaît à la fin des expériences sur l'ombrage que le nombre de franchissements soit relativement faible. Ceci s'explique en partie par le fait qu'un individu sur cinq ait réussi à s'engager dans le modèle. Cela réduit fortement le nombre de spécimens sur lesquels la franchissabilité peut être étudiée. Pour les travaux futurs, il semble judicieux de séparer l'analyse de l'attractivité de celle de la franchissabilité. Une attention particulière pourrait d'ailleurs être faite sur l'étude de l'attractivité en tenant compte du débit de la rivière. Ce paramètre est à la base du bon dimensionnement d'un ouvrage de franchissement et peu d'études lui ont été consacrées.

Après cinq études sur le modèle réduit de la passe de Rivière, il serait désormais utile que des tests in-situ soient menés sur des espèces adultes dont le comportement à l'échelle réduite a été observé. Cela permettrait de comparer l'expérimental au réel et d'affirmer si l'utilisation du matériel vivant à échelle réduite est pertinente. Il est encore impossible de prévoir si les variables biologiques se comportent à échelle réduite de la même façon que les variables physiques. En effet, peu de moyens analytiques sont actuellement disponibles pour évaluer la vitesse de nage d'un poisson. Les modèles les plus fiables sont empiriques et tiennent compte des propriétés spécifiques de l'espèce. Ainsi, il serait intéressant de voir si ce type de loi respecte les conditions de similitudes.

Concernant les objectifs liés aux conditions de pente et de rugosité d'une rampe à anguilles, il serait utile d'étendre l'analyse qui n'a pas pu être finalisée pour les raisons liées au coronavirus. A titre d'exemples, citons la durée des essais, l'utilisation d'anguilles de taille différente, le test de pentes longitudinale et transversale plus élevées, la prise en compte de débits d'écoulement différents, l'influence de la longueur de la rampe, l'analyse d'autres substrats comme des géotextiles ou des substrats de type *brosse de rue* ou encore des espacements plus éloignés pour celui de type picot.

Il peut également être utile d'imaginer un dispositif de rampe qui combine différents substrats ou du moins différents espacements entre les picots ou les plots. En effet, la taille de l'anguille est le facteur qui détermine principalement sa remontée au travers d'une rampe. En multipliant les possibilités d'espacements au sein d'un même revêtement, nous pourrions ainsi étendre considérablement le spectre d'individus ciblés. Il reste à savoir si ce type de rampe est envisageable au niveau des conditions d'écoulement et une analyse particulière de l'influence des débits devra être menée en parallèle. Ce type d'expérimentations pourrait également prendre place in-situ pour jouir des mêmes avantages cités plus

haut.

Puisque les anguilles favorisent la zone humidifiée du substrat, il peut être intéressant de jouer sur la largeur des rampes. En effet, lorsqu'une pente transversale est introduite, une partie de la rampe est sèche. Etudier des cas de rampes avec des largeurs limitées uniquement à des zones humides peut montrer de l'intérêt. En effet, cela ouvrirait la porte à des rampes dont la largeur serait minimale pour garantir un taux de franchissabilité adéquat tout en diminuant l'impact financier d'un tel ouvrage.

La vérification des études réalisées en laboratoire sur les rampes spécifiques à anguilles pourrait également être testée in-situ. Les dispositifs étudiés en laboratoire présentent des conditions différentes de la réalité puisqu'ils ne sont que des modèles. La longueur d'une rampe dans la réalité est beaucoup plus longue et certains facteurs comme la fatigue ou la prédation peuvent interférer avec des conditions expérimentales idéales. C'est pourquoi il peut être judicieux de mettre en place les mêmes conditions de pentes, d'écoulement et de substrat déterminées par expériences pour étudier si leur efficacité est la même dans la réalité.

Bibliographie

- Alexander, R. M. (1966). Physical aspects of swimbladder function. *Biological Reviews*, 41(1) :141–176.
- Als, T. D., Hansen, M. M., Maes, G. E., Castonguay, M., Riemann, L., Aarestrup, K., Munk, P., Sparholt, H., Hanel, R., and Bernatchez, L. (2011). All roads lead to home : panmixia of european eel in the sargasso sea. *Molecular Ecology*, 20(7) :1333–1346.
- Amiard-Triquet, C., Amiard, J., Andersen, A., Elie, P., and Metayer, C. (1987). The eel (*anguilla anguilla* l.) as a bioindicator of metal pollution : Factors limiting its use. *Water science and technology*, 19(7) :1229–1232.
- Aprahamian, M. (1988). Age structure of eel, *anguilla anguilla* (l.), populations in the river severn, england, and the river dee, wales. *Aquaculture Research*, 19(4) :365–376.
- Armstrong, G., Aprahamian, M., Fewings, G., Gough, P., Reader, N., and Varallo, P. (2004). Environment agency fish pass manual : guidance notes on the legislation, selection and approval of fish passes in england and wales. *Environment Agency, Wales, UK*.
- Arthur, M. and Saffer, D. (n.d.). *The Future of Dams : Developing Nations*. <https://www.e-education.psu.edu/earth111/node/895>, consulté le 21 mars 2020.
- Baillon, L., Osés, J., Pierron, F., du Colombier, S. B., Caron, A., Normandeau, E., Lambert, P., Couture, P., Labadie, P., Budzinski, H., Dufour, S., Bernatchez, L., and Baudrimont, M. (2015). Gonadal transcriptome analysis of wild contaminated female european eels during artificial gonad maturation. *Chemosphere*, 139 :303 – 309.
- Baisez, A. (2001). *Optimisation des suivis des indices d’abondances et des structures de taille de l’anguille européenne (Anguilla anguilla L.) dans un marais endigué de la côte atlantique : relations espèce-habitat*. PhD thesis, Toulouse 3.
- Bao, J., Li, W., Zhang, C., Mi, X., Li, H., Zhao, X., Cao, N., Twardek, W. M., Cooke, S. J., and Duan, M. (2019). Quantitative assessment of fish passage efficiency at a vertical-slot fishway on the daduhe river in southwest china. *Ecological Engineering*, 141(105597).
- Baran, P., Basilico, L., and Rigaud, C. (2011). Quelles solutions pour optimiser la conception et la gestion des ouvrages ?
- Baras, E. and Lagardère, J.-P. (1995). Fish telemetry in aquaculture : review and perspectives. *Aquaculture International*, 3(2) :77–102.
- Baras, E., Malbrouck, C., Houbart, M., Kestemont, P., and Mélard, C. (2000). The effect of pit tags on growth and physiology of age-0 cultured eurasian perch *perca fluviatilis* of variable size. *Aquaculture*, 185(1-2) :159–173.

- Baras, E., Westerloppe, L., Mélard, C., Philippart, J.-C., and Bénech, V. (1999). Evaluation of implantation procedures for pit-tagging juvenile nile tilapia. *North American Journal of Aquaculture*, 61(3) :246–251.
- Barbin Zydlewski, G., Haro, A., Whalen, K., and McCormick, S. (2001). Performance of stationary and portable passive transponder detection systems for monitoring of fish movements. *Journal of Fish Biology*, 58(5) :1471–1475.
- Barton, M. and Bond, C. E. (2007). *Bond's biology of fishes*. Thomson.
- Bauchot, M. (1986). Anguillidae. *Fishes of the North-eastern Atlantic and the Mediterranean*, 2 :535–536.
- Baudouin, J.-M., Burgun, V., Chanseau, Matthieu Larinier, M., Ovidio, M., William, S., Steinbach, P., and Voegtle, B. (2014). *Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes*.
- Bauernfeind, E. (2018). *The King of Fish*. <https://www.neaq.org/blog/atlantic-salmon-the-king-of-fish/>, consulté le 20 mars 2020.
- Bagnée, A. and De Greef, J.-C. (2014). Modélisation numérique de l'écoulement d'une échelle à poissons. *UCLouvain. Ecole polytechnique de Louvain*, page 178.
- Beach, M. (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. page 45.
- Becerra-Jurado, G., Cruikshanks, R., O'Leary, C., Kelly, F., Poole, R., and Gargan, P. (2014). Distribution, prevalence and intensity of anguillicola crassus (nematoda) infection in anguilla anguilla in the republic of ireland. *Journal of Fish Biology*, 84(4) :1046–1062.
- Bell, M. C. (1990). Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Technical report, Corps Of Engineers Portland Or North Pacific Div.
- Belpaire, C. and Goemans, G. (2007). The european eel anguilla anguilla, a rapporteur of the chemical status for the water framework directive? *Vie et Milieu*, 57 :235–252.
- Belpaire, C., Reyns, T., Geeraerts, C., and Loco, J. V. (2015). Toxic textile dyes accumulate in wild european eel anguilla anguilla. *Chemosphere*, 138 :784 – 791.
- Belpaire, C. G. J., Goemans, G., Geeraerts, C., Quataert, P., Parmentier, K., Hagel, P., and De Boer, J. (2009). Decreasing eel stocks : survival of the fattest? *Ecology of Freshwater Fish*, 18(2) :197–214.
- Benitez, J.-P., Dierckx, A., Nzau Matondo, B., Philippart, J.-C., Mandiki, R., Erraud, A., Kestemont, P., and Ovidio, M. (2019). Rapport de convention sur la réhabilitation du saumon atlantique dans le bassin de la meuse. page 160.
- Berg, A., Hansen, T., and Stefansson, S. (1992). First feeding of atlantic salmon (salmo salar l.) under different photoperiods. *Journal of Applied Ichthyology*, 8(1-4) :251–256.
- Bevacqua, D., Melia, P., De Leo, G. A., and Gatto, M. (2011). Intra-specific scaling of natural mortality in fish : the paradigmatic case of the european eel. *Oecologia*, 165(2) :333–339.

- Bilau, M., Sioen, I., Matthys, C., Vocht, A. D., Goemans, G., Belpaire, C., Willems, J. L., and Henaux, S. D. (2007). Probabilistic approach to polychlorinated biphenyl (pcb) exposure through eel consumption in recreational fishermen vs. the general population. *Food Additives & Contaminants*, 24(12) :1386–1393. PMID : 17852389.
- Blaxter, J. (1969). Swimming speeds of fish. 62 :69–100.
- Blaxter, J. and Dickson, W. (1959). How fast can fish swim. *Scot. Fish. Bull*, 12 :14–18.
- Bodarwé, A. and Cabo, T. (2018). Passe à poissons : étude expérimentale d’un substrat de fond pour les poissons à faible capacité natatoire dans un modèle réduit. *UCLouvain. Ecole polytechnique de Louvain*, page 251.
- Boeuf, G. and Le Bail, P.-Y. (1999). Does light have an influence on fish growth? *Aquaculture*, 177(1-4) :129–152.
- Bolland, J., Cowx, I., and Lucas, M. (2009). Evaluation of vie and pit tagging methods for juvenile cyprinid fishes. *Journal of Applied Ichthyology*, 25(4) :381–386.
- Bone, Q. (1966). On the function of the two types of myotomal muscle fibre in elasmobranch fish. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 46(2) :321–349.
- Booth, R. K., McKinley, R. S., Økland, F., and Sisak, M. M. (1997). In situ measurement of swimming performance of wild atlantic salmon (*salmo salar*) using radio transmitted electromyogram signals. *Aquatic Living Resources*, 10(4) :213–219.
- Brett, J. (1965). The swimming energetics of salmon. *Scientific American*, 213(2) :80–87.
- Briand, C., Fatin, D., Feunteun, E., and Fontenelle, G. (2005). Estimating the stock of glass eels in an estuary by mark-recapture experiments using vital dyes. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (378-379) :23–46.
- Bridger, C. J. and Booth, R. K. (2003). The effects of biotelemetry transmitter presence and attachment procedures on fish physiology and behavior. *Reviews in Fisheries Science*, 11(1) :13–34.
- Bunt, C. M., Castro-Santos, T., and Haro, A. (2016). Reinforcement and validation of the analyses and conclusions related to fishway evaluation data from bunt et al. : ‘performance of fish passage structures at upstream barriers to migration’. *River Research and Applications*, 32(10) :2125–2137.
- Burgun, V. and Ovidio, M. (2014). Continuité écologique et exigences pour l’ichtyofaune.
- Byer, J. D., Lebeuf, M., Alae, M., Stephen, B. R., Trottier, S., Backus, S., Keir, M., Couillard, C. M., Casselman, J., and Hodson, P. V. (2013). Spatial trends of organo-chlorinated pesticides, polychlorinated biphenyls, and polybrominated diphenyl ethers in atlantic anguillid eels. *Chemosphere*, 90(5) :1719 – 1728.
- Castonguay, M., Hodson, P. V., Moriarty, C., Drinkwater, K. F., and Jessop, B. M. (1994). Is there a role of ocean environment in american and european eel decline? *Fisheries oceanography*, 3(3) :197–203.
- Chanseau, M. (2013). Des solutions techniques permettant de limiter les impacts, solutions techniques à la dévalaison.

- CIGB (n.d.). *Rôle des barrages*. Commission internationale des grands barrages. https://www.icold-cigb.org/FR/Barrages/role_des_barrages.asp, consulté le 21 mars 2020.
- CIPR (2004). Impact des usines hydroélectriques des affluents du rhin sur la dévalaison des poissons migrateurs. Technical report, Commission Internationale pour la Protection du Rhin.
- Clay, C. H. (1994). *Design of fishways and other fish facilities*. CRC Press.
- Comolet, R. (1958). Introduction à l'analyse dimensionnelle et aux problèmes de similitudes en mécanique des fluides. page 116.
- Cook, J., Sutterlin, A., and McNiven, M. A. (2000). Effect of food deprivation on oxygen consumption and body composition of growth-enhanced transgenic atlantic salmon (salmo salar). *Aquaculture*, 188(1-2) :47–63.
- Cooke, S. J., Woodley, C. M., Eppard, M. B., Brown, R. S., and Nielsen, J. L. (2011). Advancing the surgical implantation of electronic tags in fish : a gap analysis and research agenda based on a review of trends in intracoelomic tagging effects studies. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 21(1) :127–151.
- Couillard, C., Hodson, P., and Castonguay, M. (1997). Correlations between pathological changes and chemical contamination in american eels, *anguilla rostrata*, from the st. lawrence river. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54(8) :1916–1927.
- Courtois, E. and Van Audenhaege, L. (2017). Étude comportementale de différentes espèces de poisson dans un modèle réduit de la passe à bassins multi-espèces de rivière en meuse belge. *UCLouvain. Ecole polytechnique de Louvain*, page 269.
- Cox, K. (2001). *Atlantic salmon vanishing, report says*. The Globe and Mail. <https://www.theglobeandmail.com/technology/science/atlantic-salmon-vanishing-report-says/article4148623/>, consulté le 2 juin 2020.
- Dahl, A. J. (1991). Eel passes in denmark, why and how ? *Paper presented at the EIFAC Working Party on Eels, Dublin*, page 15.
- D'aout, K. and Aerts, P. (1999). A kinematic comparison of forward and backward swimming in the eel *anguilla anguilla*. *Journal of Experimental Biology*, 202(11) :1511–1521.
- de Oliveira Mesquita, F., Godinho, H. P., de Azevedo, P. G., and Young, R. J. (2008). A preliminary study into the effectiveness of stroboscopic light as an aversive stimulus for fish. *Applied Animal Behaviour Science*, 111(3) :402 – 407.
- Deelder, C. (1985). Exposé synoptique des données biologiques sur l'anguille : *anguilla anguilla*, linnaeus 1758. *F.A.O. synopsis sur les pêches*, 80 :11.
- Dekker, W. (1989). Death rate, recapture frequency and changes in size of tagged eels. *Journal of fish biology*, 34(5) :769–777.

- Dieterman, D. J. and Hoxmeier, R. J. H. (2009). Instream evaluation of passive integrated transponder retention in brook trout and brown trout : effects of season, anatomical placement, and fish length. *North American Journal of Fisheries Management*, 29(1) :109–115.
- Doughty, E. (2019). *Atlantic salmon numbers are falling in British rivers — here's how you can help*. Inews. <https://inews.co.uk/inews-lifestyle/food-and-drink/salmon-fish-atlantic-scotland-decline-sustainable-814794>, consulté le 2 juin 2020.
- Drouineau, H., Bau, F., Alric, A., Deligne, N., Gomes, P., and Sagnes, P. (2017). Silver eel downstream migration in fragmented rivers : use of a bayesian model to track movements triggering and duration. *Aquatic Living Resources*, 30 :5.
- Drouineau, H., Rochard, E., Castonguay, M., Yokouchi, K., Mateo, M., Verreault, G., Durif, C., and Lambert, P. (2018). Freshwater eels : A symbol of the effects of global change. *Fish and Fisheries*.
- Dumonceau, F. (2013). L'hydroélectricité : questions-réponses, impacts sur le milieu aquatique et la faune piscicole.
- Dunbar, P. (n.d.a). *Anguille européenne (Anguilla anguilla)*. Maison Wallonne de la Pêche. http://www.maisondelapeche.be/Fr/Fiche-poisson---L-anguille-europeenne_96_1.html, consulté le 29 avril 2020.
- Dunbar, P. (n.d.b). *Saumon atlantique (Salmo salar)*. Maison Wallonne de la Pêche. http://www.maisondelapeche.be/Fr/Fiche-poisson---Le-saumon-atlantique_90_1.html, consulté le 28 avril 2020.
- Dębowski, P., Bernaś, R., Skóra, M., and Morzuch, J. (2016). Mortality of silver eel (*anguilla anguilla*) migrating downstream through a small hydroelectric plant on the drawa river in northern poland. *Archives of Polish Fisheries*, 24(2) :69–75.
- Eckersley, M. (1982). Operation of the eel ladder at the mores-saunders generating station, cornwall 1974-1979. *Ontario fisheries technical report series*.
- Edeline, E., Lambert, P., Rigaud, C., and Elie, P. (2006). Effects of body condition and water temperature on *anguilla anguilla* glass eel migratory behavior. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 331(2) :217–225.
- Elenkov, I. J. and Chrousos, G. P. (2006). Stress system–organization, physiology and immunoregulation. *Neuroimmunomodulation*, 13(5-6) :257–267.
- ERB (n.d.). *L'anguille*. Eaux et Rivières de Bretagne. <http://educatif.eau-et-rivieres.asso.fr/pdf/anguille.pdf>, consulté le 29 avril 2020.
- FAO (2020). *FAO Fisheries & Aquaculture - Aquatic species*. Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/fishery/species/2203/en>, consulté le 29 avril 2020.
- Ferguson, J. W., Absolon, R. F., Carlson, T. J., and Sandford, B. P. (2006). Evidence of delayed mortality on juvenile pacific salmon passing through turbines at columbia river dams. *Transactions of the American Fisheries Society*, 135(1) :139–150.

- Feunteun, E., Acou, A., Laffaille, P., and Legault, A. (2000). European eel (*anguilla anguilla*) : prediction of spawner escapement from continental population parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(8) :1627–1635.
- Feunteun, E., Laffaille, P., Robinet, T., Briand, C., Baisez, A., Olivier, J.-M., and Acou, A. (2003). A review of upstream migration and movements in inland waters by anguillid eels : toward a general theory. In *Eel biology*, pages 191–213. Springer.
- Fjelldal, P. G., Hansen, T., and Huang, T.-S. (2011). Continuous light and elevated temperature can trigger maturation both during and immediately after smoltification in male atlantic salmon (*salmo salar*). *Aquaculture*, 321(1-2) :93–100.
- Fournier, T., Dupuis, T., Plaut, W., Boucault, J., Lienard, V., and Blazejewski, B. (2015). *Les poissons et leurs habitats dans le bassin Artois-Picardie*. https://www.peche62.fr/wp-content/uploads/2015/04/GUIDE_POISSON_2013_WEB-BD3.pdf, consulté le 18 mai 2020.
- Fraser, N. H. C. and Metcalfe, N. B. (1997). The costs of becoming nocturnal : feeding efficiency in relation to light intensity in juvenile atlantic salmon. *Functional Ecology*, 11(3) :385–391.
- Froese, R. (2020). *Anguilla anguilla*. FishBase. <https://www.fishbase.org/summary/Anguilla-anguilla.html>, consulté le 30 avril 2020.
- Garbrecht, G. (1988). Water management for irrigation in antiquity (urartu 850 to 600 bc). *Irrigation and drainage systems*, 2(2) :185–198.
- Geeraerts, C. and Belpaire, C. (2010). The effects of contaminants in european eel : a review. *Ecotoxicology*, 19(2) :239–266.
- Geo-Synthetic (n.d.). *Enkamat, Flatback erosion protection mat*. Geo Synthetic. http://www.geomuanyag.hu/en/products/enkamat_flatback_erosion_protection_mat/35, consulté le 15 mai 2020.
- Gibbons, W. J. and Andrews, K. M. (2004). Pit tagging : simple technology at its best. *Bioscience*, 54(5) :447–454.
- Gillespie, J. H. (1976). The role of migration in the genetic structure of populations in temporally and spatially varying environments ii. island models. *Theoretical population biology*, 10(2) :227–238.
- Goberville, E., Beaugrand, G., and Edwards, M. (2014). Synchronous response of marine plankton ecosystems to climate in the northeast atlantic and the north sea. *Journal of Marine Systems*, 129 :189 – 202.
- Goodess, C. M., Palutikof, J. P., and Davies, T. D. (1992). *The nature and causes of climate change : assessing the long-term future*. Belhaven Press, London, UK.
- Groot, C. (2010). *Physiological ecology of Pacific salmon*. UBC Press Nature.
- Gueguen, J. C. and Prouzet, P. (1994). *Le saumon atlantique : biologie et gestion de la ressource*. Editions Quae.

- Guillaume, J., Kaushik, S., Bergot, P., and Metailler, R. (2001). *Nutrition and feeding of fish and crustaceans*. Springer Science & Business Media.
- Hadderingh, R., Van Der Stoep, J., and Hagraken, J. (1992). Deflecting eels from water inlets of power stations with light. *Irish Fish. Invest*, 36 :37–41.
- Hansen, T., Stefansson, S., and Taranger, G. (1992). Growth and sexual maturation in atlantic salmon, salmon, salar l., reared in sea cages at two different light regimes. *Aquaculture Research*, 23(3) :275–280.
- Harrison, A. J., Walker, A. M., Pinder, A. C., Briand, C., and Aprahamian, M. W. (2014). A review of glass eel migratory behaviour, sampling techniques and abundance estimates in estuaries : implications for assessing recruitment, local production and exploitation. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 24(4) :967–983.
- Heggenes, J. and Traaen, T. (1988). Downstream migration and critical water velocities in stream channels for fry of four salmonid species. *Journal of Fish Biology*, 32(5) :717–727.
- Hertel, H. (1966). Structure, form, movement.
- Hirt-Chabbert, J. and Young, O. (2012). Effects of surgically implanted pit tags on growth, survival and tag retention of yellow shortfin eels *anguilla australis* under laboratory conditions. *Journal of Fish Biology*, 81(1) :314–319.
- Hoar, W. (1988). 4. the physiology of smolting salmonids. In *Fish physiology*, volume 11, pages 275–343. Elsevier.
- Hühn, D., Klefoth, T., Pagel, T., Zajicek, P., and Arlinghaus, R. (2014). Impacts of external and surgery-based tagging techniques on small northern pike under field conditions. *North American journal of fisheries management*, 34(2) :322–334.
- Huusko, R., Huusko, A., Mäki-Petäys, A., Orell, P., and Erkinaro, J. (2016). Effects of tagging on migration behaviour, survival and growth of hatchery-reared atlantic salmon smolts. *Fisheries Management and Ecology*, 23(5) :367–375.
- ICEM (n.d.). *Un curieux animal migrateur : la lamproie*. Institut Cooperatif de l'Ecole Moderne - Pedagogie Freinet. <http://www.icem-freinet.net/~btj/anguille/ang7.htm>, consulté le 29 avril 2020.
- IEA (n.d.). *Data and Statistics*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Electricity%20generation%20by%20source>, consulté le 21 mars 2020.
- Jellyman, P., Bauld, J., and Crow, S. (2017). The effect of ramp slope and surface type on the climbing success of shortfin eel (*anguilla australis*) elvers. *Marine and Freshwater Research*, 68 :1317–1324.
- Jepsen, N., Christoffersen, M., and Munksgaard, T. (2008). The level of predation used as an indicator of tagging/handling effects. *Fisheries Management and Ecology*, 15(5-6) :365–368.
- Jepsen, N., Koed, A., Thorstad, E. B., and Baras, E. (2002). Surgical implantation of telemetry transmitters in fish : how much have we learned ? In *Aquatic Telemetry*, pages 239–248. Springer.

- Johnston, I. and Ball, D. (1997). Thermal stress and muscle function in fish. In *Seminar Series-Society For Experimental Biology*, volume 61, pages 79–104. Cambridge University Press.
- Johnston, I. A. (1981). Structure and function of fish muscles. Number 48, pages 71–113. Symp. zool. Soc. Lond.
- Jonsson, B. and Jonsson, N. (2009). A review of the likely effects of climate change on anadromous atlantic salmon *salmo salar* and brown trout *salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of Fish Biology*, 75(10) :2381–2447.
- Jonsson, N. (1991). Influence of water flow, water temperature and light on fish migrations in rivers. *Nord J Freshw Res*, 66 :20–35.
- Kaplan, N. (2017). *Limite du temps d'enregistrement vidéo des appareils photo numériques.* <https://nicolaskaplan.fr/blog/limite-du-temps-denregistrement-video-des-appareils-photo-reflex/#douane>, consulté le 12 mai 2020.
- Katopodis, C. (1994). Analysis of ichthyomechanical data for fish passage or exclusion system design. pages 318–323.
- Katopodis, C. and Eng, P. (1992). Introduction to fishway design. page 71.
- Katopodis, C. and Gervais, R. (2012). Ecohydraulic analysis of fish fatigue data. *River Research and Applications*, 28(4) :444–456.
- Katopodis, C. and Gervais, R. (2016). Fish swimming performance database and analyses. page 550.
- Kerr, J. R., Karageorgopoulos, P., and Kemp, P. S. (2015). Efficacy of a side-mounted vertically oriented bristle pass for improving upstream passage of european eel (*anguilla anguilla*) and river lamprey (*lampetra fluviatilis*) at an experimental crump weir. *Ecological Engineering*, 85 :121 – 131.
- Kettle, A. J., Asbjørn Vøllestad, L., and Wibig, J. (2011). Where once the eel and the elephant were together : decline of the european eel because of changing hydrology in southwest europe and northwest africa ? *Fish and Fisheries*, 12(4) :380–411.
- Kettle, A. J. and Haines, K. (2006). How does the european eel (*anguilla anguilla*) retain its population structure during its larval migration across the north atlantic ocean ? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63(1) :90–106.
- Kirk, R. S. (2003). The impact of *anguillicola crassus* on european eels. *Fisheries Management and Ecology*, 10(6) :385–394.
- Kleckner, R. C., McCleave, J. D., and Wippelhauser, G. S. (1983). Spawning of american eel, *anguilla rostrata*, relative to thermal fronts in the sargasso sea. *Environmental Biology of Fishes*, 9(3-4) :289–293.
- Knights, B. (2003). A review of the possible impacts of long-term oceanic and climate changes and fishing mortality on recruitment of anguillid eels of the northern hemisphere. *Science of The Total Environment*, 310(1) :237 – 244. Detecting Environmental Change : Science and Society.

- Knights, B. and White, E. (1998). Enhancing immigration and recruitment of eels : the use of passes and associated trapping systems. *Fisheries Management and Ecology*, 5(6) :459–471.
- Laffaille, P., Acou, A., and Guillouët, J. (2005). The yellow european eel (*anguilla anguilla* l.) may adopt a sedentary lifestyle in inland freshwaters. *Ecology of freshwater Fish*, 14(2) :191–196.
- Larinier, M. (2001). Environmental issues, dams and fish migration. *FAO fisheries technical paper*, 419 :45 – 89.
- Larinier, M. and Boyer-Bernard, S. (1991). La dévalaison des smolts de saumon atlantique au barrage de poutès sur l’allier (43) : utilisation de lampes à vapeur de mercure en vue d’optimiser l’efficacité de l’exutoire de dévalaison. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (323) :129–148.
- Larinier, M., Courret, D., and Gomes, P. (2006). Guide technique pour la conception des passes naturelles. page 66.
- Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.-P., and Gosset, C. (1994). Passes à poissons : expertise et conception des ouvrages de franchissement. page 335. CSP.
- Larsen, M. H., Thorn, A. N., Skov, C., and Aarestrup, K. (2013). Effects of passive integrated transponder tags on survival and growth of juvenile atlantic salmon *salmo salar*. *Animal Biotelemetry*, 1(1) :19.
- Lecomte-Finiger, R. (1992). Growth history and age at recruitment of european glass eels (*anguilla anguilla*) as revealed by otolith microstructure. *Marine Biology*, 114(2) :205–210.
- Legat, V. and Winckelmans, G. (2015). Mécanique des fluides et transferts 1, notes de cours. *Université Catholique de Louvain*, page 182.
- Legault, A. (1992). Étude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (325) :83–91.
- Legault, A. (1993). L’anguille (aménagement des obstacles à la migration). *Publication de l’Association pour le développement de l’aquaculture*.
- Leonardi, M. and Klempau, A. (2003). Artificial photoperiod influence on the immune system of juvenile rainbow trout (*oncorhynchus mykiss*) in the southern hemisphere. *Aquaculture*, 221(1-4) :581–591.
- Lin, C., Dai, H., Shi, X., Deng, Z. D., Mao, J., Zhao, S., Luo, J., and Tan, J. (2019). An experimental study on fish attraction using a fish barge model. *Fisheries Research*, 210 :181 – 188.
- Logrami (n.d.). *Le saumon atlantique et la truite de mer*. Loire Grands Migrateurs. <https://www.logrami.fr/sensibilisation/poissons-migrateurs/saumon/>, consulté le 28 avril 2020.
- Lotze, H. K. and Milewski, I. (2004). Two centuries of multiple human impacts and successive changes in a north atlantic food web. *Ecological Applications*, 14(5) :1428–1447.

- Lucas, M. and Baras, E. (2001). *Migration of freshwater fishes*. Blackwell Science Ltd.
- Lucas, M. C. and Baras, E. (2000). Methods for studying spatial behaviour of freshwater fishes in the natural environment. *Fish and fisheries*, 1(4) :283–316.
- Luna, S. M. (2020). *Salmo salar*. FishBase. <https://www.fishbase.org/summary/Salmo-salar.html>, consulté le 30 avril 2020.
- Maes, G., Raeymaekers, J., Pampoulie, C., Seynaeve, A., Goemans, G., Belpaire, C., and Volckaert, F. (2005). The catadromous european eel *anguilla anguilla* (l.) as a model for freshwater evolutionary ecotoxicology : Relationship between heavy metal bioaccumulation, condition and genetic variability. *Aquatic Toxicology*, 73(1) :99 – 114.
- Maine (n.d.). *Atlantic salmon parr drawing*. Atlantic Salmon and Sea-run Fish Restoration. <https://atlanticsalmonrestoration.org/resources/images-1/atlantic-salmon-parr-drawing/view>, consulté le 28 avril 2020.
- Malbrouck, C., Micha, J.-C., and Philippart, J.-C. (2007). *Projet Meuse Saumon 2000. La réintroduction du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse : synthèse et résultats*.
- Martin, P., Rancon, J., Segura, G., Laffont, J., Boeuf, G., and Dufour, S. (2012). Experimental study of the influence of photoperiod and temperature on the swimming behaviour of hatchery-reared atlantic salmon (*salmo salar* l.) smolts. *Aquaculture*, 362 :200–208.
- Massie, F. (1998). The uncommon guide to common life of narragansett bay. *Save The Bay*.
- Mateo, M., Lambert, P., Tetard, S., Castonguay, M., Ernande, B., and Drouineau, H. (2017). Cause or consequence ? exploring the role of phenotypic plasticity and genetic polymorphism in the emergence of phenotypic spatial patterns of the european eel. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 74(7) :987–999.
- Matondo, B. N. and Ovidio, M. (2018). Decreased stock entering the belgian meuse is associated with the loss of colonisation behaviour in yellow-phase european eels. *Aquatic Living Resources*, 31 :7.
- Mazel, V., Charrier, F., Legault, A., and Laffaille, P. (2013). Long-term effects of passive integrated transponder tagging (pit tags) on the growth of the yellow european eel (*anguilla anguilla* (linnaeus, 1758)). *Journal of Applied Ichthyology*, 29(4) :906–908.
- McCleave, J. (1980). Swimming performance of european eel (*anguilla anguilla* (l.)) elvers. *Journal of Fish Biology*, 16(4) :445–452.
- McDonald, D., McFarlane, W., and Milligan, C. (1998). Anaerobic capacity and swim performance of juvenile salmonids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(5) :1198–1207.
- McFarlane, G. and Wydoski, R. (1990). Historical review of the development of external tags and marks. pages 9– ; 29 in nc parker, ae giorgi, rc heidinger, db jester, jr., e. d. prince, and ga winans, editors. fish-marking techniques. In *American Fisheries Society, Symposium*, volume 7.

- McHugh, B., Poole, R., Corcoran, J., Anninou, P., Boyle, B., Joyce, E., Foley, M. B., and McGovern, E. (2010). The occurrence of persistent chlorinated and brominated organic contaminants in the european eel (*anguilla anguilla*) in irish waters. *Chemosphere*, 79(3) :305 – 313.
- Morris, S. (2009). *Eels in crisis after 95% decline in last 25 years*. The Guardian. <https://www.theguardian.com/environment/2009/may/01/eel-fishing-europe-environment>, consulté le 2 juin 2020.
- Morro, B., Balseiro, P., Albalat, A., MacKenzie, S., Pedrosa, C., Nilsen, T. O., Suzuki, S., Shimizu, M., Sveier, H., Gorissen, M., et al. (2019). Effects of temperature and photoperiod on rainbow trout (*oncorhynchus mykiss*) smoltification and haematopoiesis. *Aquaculture*, page 734711.
- Mota, M., Rochard, E., and Antunes, C. (2016). Status of the diadromous fish of the iberian peninsula : Past, present and trends. 29 :1–18.
- Navarro, I. and Gutiérrez, J. (1995). Chapter 17 fasting and starvation. In Hochachka, P. and Mommsen, T., editors, *Metabolic biochemistry*, volume 4 of *Biochemistry and Molecular Biology of Fishes*, pages 393 – 434. Elsevier.
- Nielsen, J. (1988). Marking and tagging methods applied to eel, *anguilla anguilla* (l.). *EIFAC Occasional Paper (FAO)*.
- NOAA (2020a). *Atlantic Salmon*. NOAA Fisheries. <https://www.fisheries.noaa.gov/species/atlantic-salmon>, consulté le 28 avril 2020.
- NOAA (2020b). *Atlantic Salmon (Protected)*. NOAA Fisheries. <https://www.fisheries.noaa.gov/species/atlantic-salmon-protected>, consulté le 28 avril 2020.
- Nyqvist, D., Greenberg, L. A., Goerig, E., Calles, O., Bergman, E., Ardren, W. R., and Castro-Santos, T. (2017). Migratory delay leads to reduced passage success of atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. *Ecology of Freshwater Fish*, 26(4) :707–718.
- Nzau Matondo, B., Benitez, J.-P., Dierckx, A., Philippart, J.-C., and Ovidio, M. (2017). Assessment of the entering stock, migration dynamics and fish pass fidelity of european eel in the belgian meuse river. *River research and applications*, 33(2) :292–301.
- Okamura, B., Hartikainen, H., Schmidt-Posthaus, H., and Wahli, T. (2011). Life cycle complexity, environmental change and the emerging status of salmonid proliferative kidney disease. *Freshwater Biology*, 56(4) :735–753.
- Ostrand, K. G., Zydlewski, G. B., Gale, W. L., and Zydlewski, J. D. (2011). Long term retention, survival, growth, and physiological indicators of juvenile salmonids marked with passive integrated transponder tags. In *American Fisheries Society Symposium*, volume 76.
- O'Connor, J., Major, J., and Grant, G. (2008). *Down with the Dams : Unchaining U.S. Rivers*. Geotimes. http://www.geotimes.org/mar08/article.html?id=feature_dams.html, consulté le 2 juin 2020.
- Palstra, A. P. and Planas, J. V. (2012). *Swimming Physiology of Fish : Towards using exercise to farm a fit fish in sustainable aquaculture*. Springer Science & Business Media.

- Pandian, T. (1980). Impact of dam-building on marine life. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33(1) :415.
- Pauty, P. (n.d.). *Des solutions à la montaison des Anguilles - Passe à Anguilles*. Marseille Modelage Mécanique. <https://www.montaison-anguille.fr/>, consulté le 23 mars 2020.
- Philippart, J.-C. and Ovidio, M. (2009). L'impact des prises d'eau industrielles et des turbinages hydroélectriques sur la dynamique des populations de poissons et la qualité de leur habitat dans les cours d'eau navigables, le cas de la meuse et de l'ourthe en wallonie.
- Philippart, J.-C., Ovidio, M., Rimbaud, G., Dierckx, A., and Poncin, P. (2010). Bilan des observations sur les populations de l'anguille dans les sous-bassins hydrographiques meuse aval, ourthe, amblève et vesdre comme bases biologiques à la prise de mesures de gestion en rapport avec le règlement anguille 2007 de l'union européenne.
- Piper, A. T., Wright, R. M., and Kemp, P. S. (2012). The influence of attraction flow on upstream passage of european eel (*anguilla anguilla*) at intertidal barriers. *Ecological Engineering*, 44 :329 – 336.
- Prentice, E. F. (1990). Feasibility of using implantable passive integrated transponder (pit) tags in salmonids. *Fish-marking techniques*, 7 :ages317–322.
- Prouzet, P. (2003). Étude sur la civelle (*anguilla anguilla*) dans l'estuaire de l'adour : Pêche, biologie, comportement, modélisations hydrodynamique et comportementale, estimations des flux de civelles en estuaire. *Rapport Institution Adour-Ifremer-Univ. Pau-Adour*.
- Pype, J.-C. (2015). Passes à poissons : Etude comportementale expérimentale en modèle réduit. *UCLouvain. Ecole polytechnique de Louvain*, page 107.
- Randall, D. and Brauner, C. (1991). Effects of environmental factors on exercise in fish. *Journal of Experimental Biology*, 160(1) :113–126.
- Raynal, S., Chatellier, L., Courret, D., Larinier, M., and David, L. (2014). Streamwise bars in fish-friendly angled trashracks. *Journal of hydraulic research*, 52(3) :426–431.
- Reinach, A. J. (1911). Les fouilles en Égypte (1909-11). *Revue Archéologique*, 18 :317–337.
- Richardson, N. E. and McCleave, J. D. (1974). Locomotor activity rhythms of juvenile atlantic salmon (*salmo salar*) in various light conditions. *The Biological Bulletin*, 147(2) :422–432.
- Rigaud, C., Prouzet, P., Feunteun, E., and Adam, G. (2008). *L'anguille européenne : indicateurs d'abondance et de colonisation*. Quae.
- Robins, C. R., Cohen, D. M., and Robins, C. H. (1979). The eels, *anguilla* and *histiobranchus*, photographed on the floor of the deep atlantic in the bahamas. *Bulletin of Marine Science*, 29(3) :401–405.
- Roscoe, D. W. and Hinch, S. G. (2010). Effectiveness monitoring of fish passage facilities : historical trends, geographic patterns and future directions. *Fish and Fisheries*, 11(1) :12–33.

- Rub, A. M. W., Jepsen, N., Liedtke, T. L., Moser, M. L., and Weber III, E. S. (2014). Surgical insertion of transmitters and telemetry methods in fisheries research. *American journal of veterinary research*, 75(4) :402–416.
- Sadatshojaie, A. and Rahimpour, M. R. (2020). Chapter 1 - co2 emission and air pollution (volatile organic compounds, etc.) - related problems causing climate change. In Figoli, A., Li, Y., and Basile, A., editors, *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, pages 1 – 30. Elsevier.
- Sand, O., Enger, P., Karlsen, H., and Knudsen, F. (2001). Detection of infrasound in fish and behavioral responses to intense infrasound in juvenile salmonids and european silver eels : a minireview. *American Fisheries Society Symposium*, 26 :183–193.
- Saunders, R., Duston, J., and Benfey, T. (1994). Environmental and biological factors affecting growth dynamics in relation to smolting of atlantic salmon, salmo salar l. *Aquaculture Research*, 25(1) :9–20.
- Schmidt, J. (1906). *Contributions to the life-history of the eel (Anguilla vulgaris, Flem.)*.
- Schofield, P. and Fuller, P. (2011). *European eel (Anguilla anguilla) - Species Profile*. United States Geological Survey. <https://nas.er.usgs.gov/queries/FactSheet.aspx?speciesID=308>, consulté le 29 avril 2020.
- Sfakiotakis, M., Lane, D., and Davies, J. (1999). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 24 :237 – 252.
- Shearer, K. D., Åsgård, T., Andorsdóttir, G., and Aas, G. H. (1994). Whole body elemental and proximate composition of atlantic salmon (salmo salar) during the life cycle. *Journal of Fish Biology*, 44(5) :785–797.
- Shotzberger, S. L. and Strait, K. A. (2002). Successful migration of juvenile american eels (anguilla rostrata) at two experimental eel ladders on small delaware impoundments. *Paper presented at the American Fisheries Society Annual Meeting, Baltimore,.*
- Sigholt, T., Åsgård, T., and Staurnes, M. (1998). Timing of parr-smolt transformation in atlantic salmon (salmo salar) : effects of changes in temperature and photoperiod. *Aquaculture*, 160(1-2) :129–144.
- Silva, S., Lowry, M., Macaya-Solis, C., Byatt, B., and Lucas, M. C. (2017). Can navigation locks be used to help migratory fishes with poor swimming performance pass tidal barrages ? a test with lampreys. *Ecological Engineering*, 102 :291 – 302.
- Simon, J. and Dörner, H. (2011). Growth, mortality and tag retention of small anguilla anguilla marked with visible implant elastomer tags and coded wire tags under laboratory conditions. *Journal of Applied Ichthyology*, 27(1) :94–99.
- Solbakken, V. A., Hansen, T., and Stefansson, S. O. (1994). Effects of photoperiod and temperature on growth and parr-smolt transformation in atlantic salmon (salmo salar l.) and subsequent performance in seawater. *Aquaculture*, 121(1-3) :13–27.
- Solomon, D. J. and Beach, M. H. (2004). Manual for provision of upstream migration facilities for eel and elver.

- Sonny, D. (2006). *Etude des profils de dévalaison des poissons dans la Meuse moyenne belge*. PhD thesis, Thèse de doctorat en sciences (biologie animale), Université de Liège.
- Sprengel, G., Lüchtenberg, H., et al. (1991). Infection by endoparasites reduces maximum swimming speed of european smelt *osmerus eperlanus* and european eel *anguilla anguilla*. *Diseases of aquatic organisms*, 11(1) :31–35.
- Székely, C., Palstra, A., Molnár, K., and Van den Thillart, G. (2009). Impact of the swim-bladder parasite on the health and performance of european eels. In *Spawning migration of the European eel*, pages 201–226. Springer.
- Taranger, G. L., Haux, C., Hansen, T., Stefansson, S. O., Björnsson, B. T., Walther, B. T., and Kryvi, H. (1999). Mechanisms underlying photoperiodic effects on age at sexual maturity in atlantic salmon, *salmo salar*. *Aquaculture*, 177(1-4) :47–60.
- Taylor, E., Egginton, S., Taylor, S., and Butler, P. (1997). Factors which may limit swimming performance at different temperatures. In *Seminar series-society for experimental biology*, volume 61, pages 105–134. Cambridge University Press.
- Tentelier, C. and Piou, C. (2011). Obstacles to migration constrain nest distribution of atlantic salmon. *Ecology of Freshwater Fish*, 20(3) :400–408.
- Tesh, F. (1977). The eel : biology and management of anguillid eels.
- Thomassen, S., Pedersen, M. I., and Holdensgaard, G. (2000). Tagging the european eel *anguilla anguilla* (l.) with coded wire tags. *Aquaculture*, 185(1-2) :57–61.
- Trancart, T., Carpentier, A., Acou, A., Charrier, F., Mazel, V., Danet, V., and Feunteun, E. (2020). When 'safe' dams kill : Analyzing combination of impacts of overflow dams on the migration of silver eels. *Ecological Engineering*, 145 :105741.
- Tsukamoto, K., Aoyama, J., and Miller, M. J. (2009). Present status of the japanese eel : resources and recent research. In *Eels at the edge : American Fisheries Society, symposium*, volume 58, pages 21–35. American Fisheries Society Bethesda, MD.
- Tucker, V. A. (1970). Energetic cost of locomotion in animals. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 34 :841–846.
- Tummers, J. S., Winter, E., Silva, S., O'Brien, P., Jang, M.-H., and Lucas, M. C. (2016). Evaluating the effectiveness of a larinier super active baffle fish pass for european river lamprey *lampetra fluviatilis* before and after modification with wall-mounted studded tiles. *Ecological Engineering*, 91 :183 – 194.
- Tétard, S., Maire, A., Lemaire, M., Oliveira, E. D., Martin, P., and Courret, D. (2019). Behaviour of atlantic salmon smolts approaching a bypass under light and dark conditions : Importance of fish development. *Ecological Engineering*, 131 :39 – 52.
- UE (2006). *Qualité des eaux piscicoles*. Union Européenne. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32006L0044#ntr3-L_2006264FR.01002401-E0003, consulté le 1 mai 2020.
- Van den Thillart, G., Dufour, S., and Rankin, J. C. (2009). Spawning migration of the european eel. *Fish and Fisheries Series*, 30.

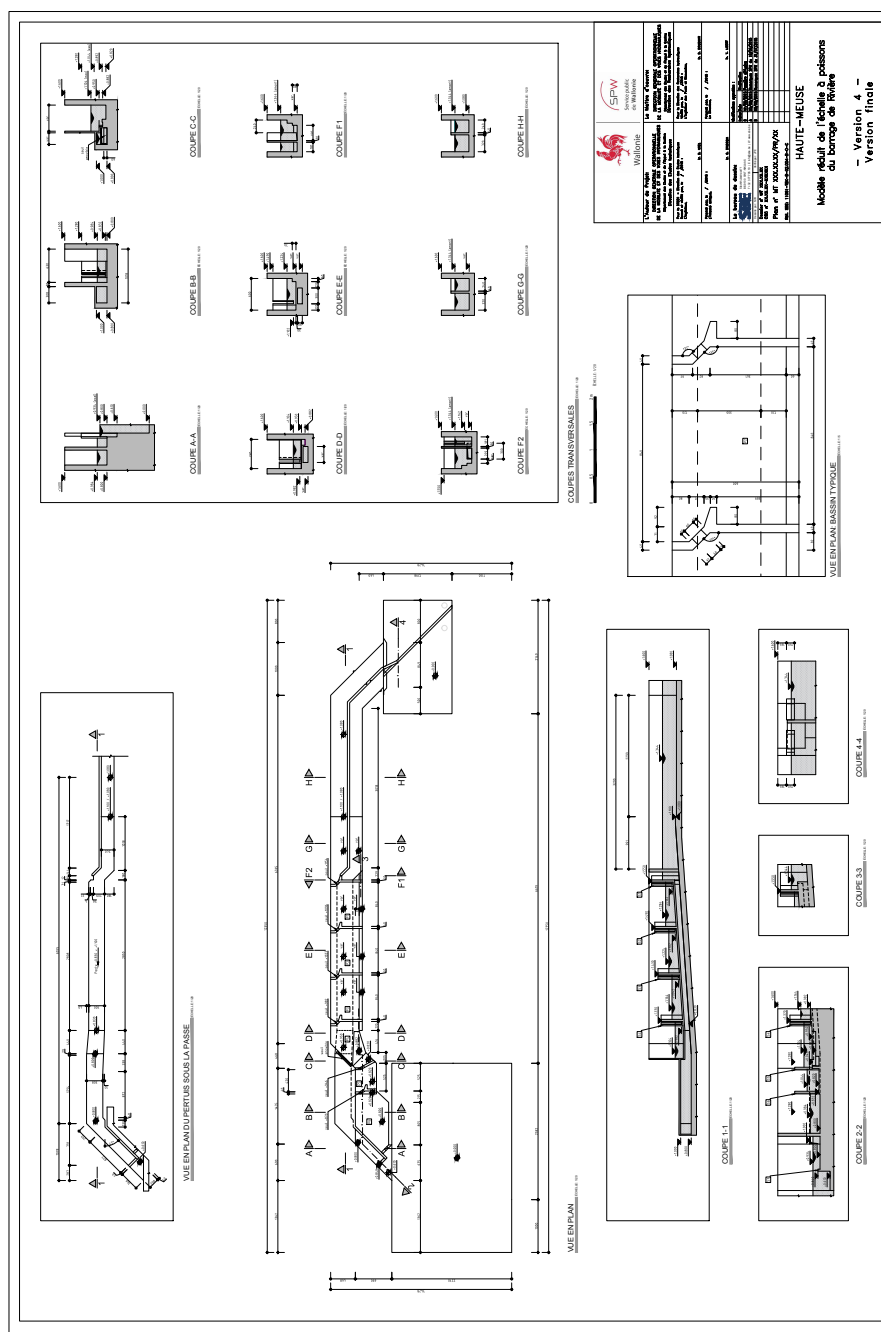
- Van Veen, T., Hartwig, H., and Müller, K. (1976). Light-dependent motor activity and photonegative behavior in the eel (*anguilla anguilla* l.). *Journal of comparative physiology*, 111(2) :209–219.
- Videler, J. J. (1993). *Fish swimming*, volume 10. Springer Science & Business Media.
- Vita-Finzi, C. (1961). Roman dams in tripolitania. *Antiquity*, 35(137) :14–20.
- Vlietinck, C., Stevens, M., Coeck, J., Philippart, J.-C., Gomez-da Silva, S., and Thirion, A. (2008). Eel management plan for belgium. Technical report, Agentschap voor Natuur en Bos.
- Voegtle, B. and Larinier, M. (2000). Etude sur les capacités de franchissement des civelles et anguillettes : Site hydroélectrique de tuilières sur la dordogne (24) barrage estuarien d’arzal sur la vilaine (56). *CSP, Cemagref, GHAAPE Rep. RA00*, 5.
- Walker, P. (2019). *Why saving the European eel matters*. The Ecologist. <https://theecologist.org/2019/jul/16/why-saving-european-eel-matters>, consulté le 2 juin 2020.
- Ward, D. L., Maughan, O. E., and Bonar, S. A. (2002). A variable-speed swim tunnel for testing the swimming ability of age-0 fish. *North American Journal of Aquaculture*, 64(3) :228–231.
- Wardle, C. (1975). Limit of fish swimming speed. *Nature*, 255(5511) :725–727.
- Watz, J., Nilsson, P. A., Degerman, E., Tamario, C., and Calles, O. (2019). Climbing the ladder : an evaluation of three different anguillid eel climbing substrata and placement of upstream passage solutions at migration barriers. *Animal Conservation*, 22(5) :452–462.
- Webb, P. W. (1975). Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. 190 :158.
- Wikipedia (2020a). *Fish locomotion*. Wikipedia - The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Fish_locomotion, consulté le 2 avril 2020.
- Wikipedia (2020b). *Meuse (fleuve)*. Wikipedia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Meuse_\(fleuve\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Meuse_(fleuve)), consulté le 2 juin 2020.
- Winter, H., Jansen, H., and Bruijs, M. (2006). Assessing the impact of hydropower and fisheries on downstream migrating silver eel, *anguilla anguilla*, by telemetry in the river meuse. *Ecology of Freshwater Fish*, 15 :221 – 228.
- Wolter, C. and Arlinghaus, R. (2003). Navigation impacts on freshwater fish assemblages : the ecological relevance of swimming performance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13(1) :63–89.
- Wolter, C. and Arlinghaus, R. (2004). Burst and critical swimming speed of fish and their ecological relevance in waterways. *Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)*, pages 77–93.
- Zech, Y. (2007). Hydraulique 1, notes de cours. *Université Catholique de Louvain*, page 315.

- Zenimoto, K., Kitagawa, T., Miyazaki, S., Sasai, Y., Sasaki, H., and Kimura, S. (2009). The effects of seasonal and interannual variability of oceanic structure in the western pacific north equatorial current on larval transport of the japanese eel *anguilla japonica*. *Journal of Fish Biology*, 74(9) :1878–1890.
- Zhou, Y. (1982). The swimming behaviour of fish in towed gears ; a reexamination of the principles. *Scott. Fish. Work. Pap., Dept. Agric. Fish. Scotland*, 4 :1–55.
- Zimmerman, J. L. and Welsh, S. A. (2008). Pit tag retention in small (205-370 mm) american eels, *anguilla rostrata*. *Proceedings of the West Virginia Academy of Science*, 79(2) :1–8.
- Zorzan, G., Bousmar, D., and Libert, Y. (2016). Modernisation de l'échelle à poissons du barrage de rivière (haute-meuse). *Service Public de Wallonie, DG02, D0.222*, page 49.

Annexes

Annexe se rapportant au modèle

A.1 Plans de la passe



Annexe B

Annexe se rapportant au matériel

B.1 Distributions statistiques des lots de tacons

B.1.1 Compilation des paramètres mathématiques par lot

Taille [mm]					Poids [g]			
Lot	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
1	124.2	10.4	106	157	21.8	6.2	14.4	46.3
2	128.2	9.7	111	157	23.9	5.7	14.9	42.7
3	124.1	12.7	104	157	21.6	6.6	11.3	40.7
4	125.8	12.6	106	157	22.7	7.8	13.7	46.3
5	124.2	11.7	104	157	22.0	6.4	11.3	40.7
6	124.5	8.2	111	147	21.5	4.2	14.9	32.1
7	125.8	11.7	104	157	22.8	7.2	11.3	46.3
8	123.1	8.8	105	143	20.8	4.1	13.6	31.8
9	127.2	12.4	107	157	23.3	7.3	14.3	46.3

TABLE B.1 – Valeurs caractéristiques mathématiques des 9 échantillons.

B.1.2 Représentations graphiques des distributions

Lots ayant participé au dispositif brut

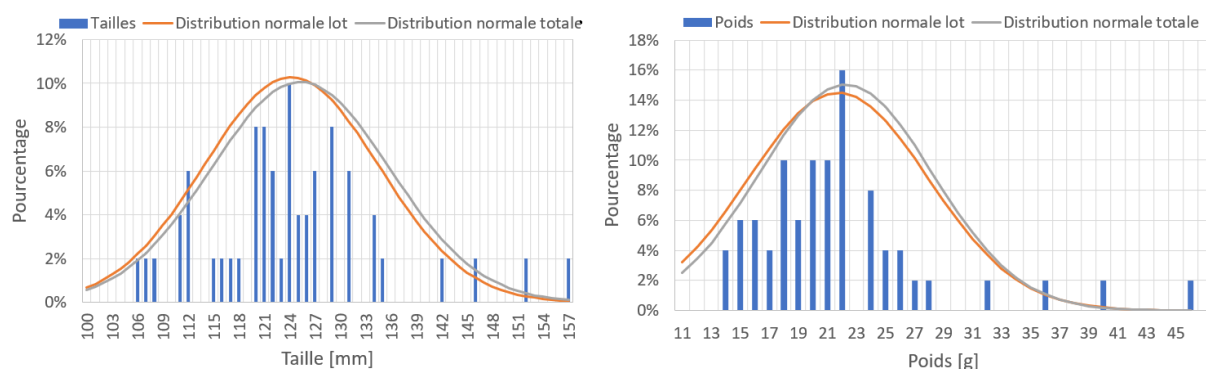


FIGURE B.1 – Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 1.

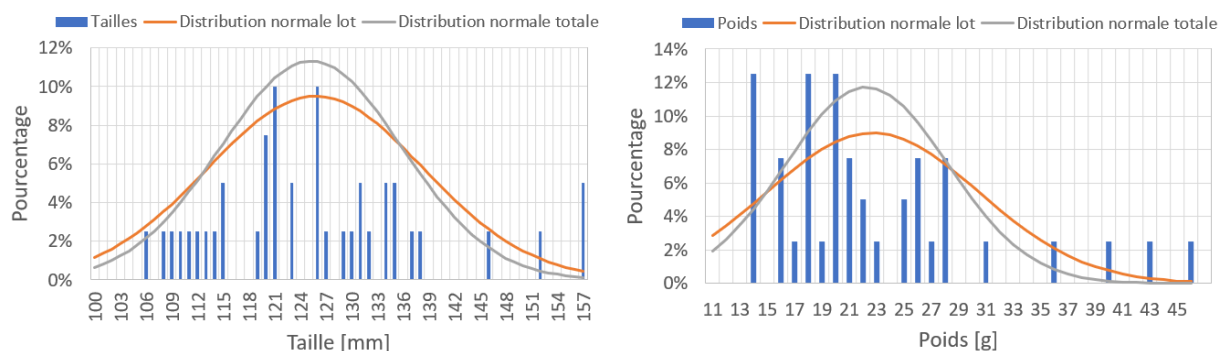


FIGURE B.2 – Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 4.

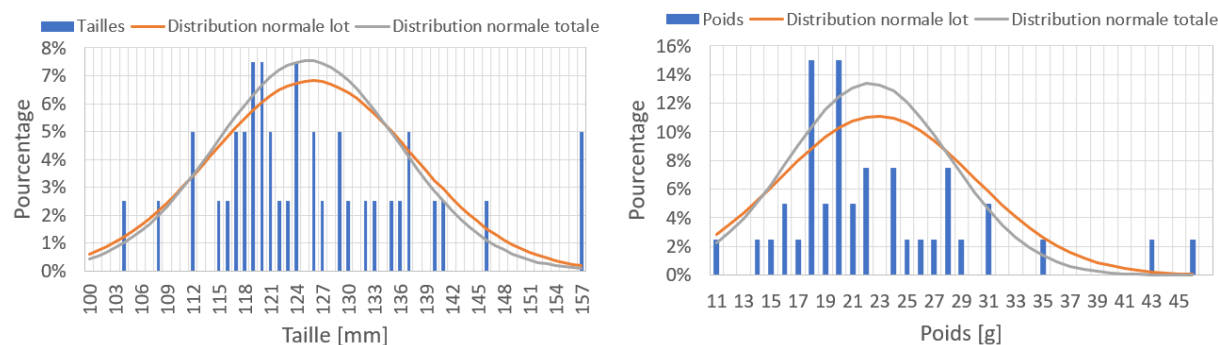


FIGURE B.3 – Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 7.

Lots ayant participé au dispositif opacifié

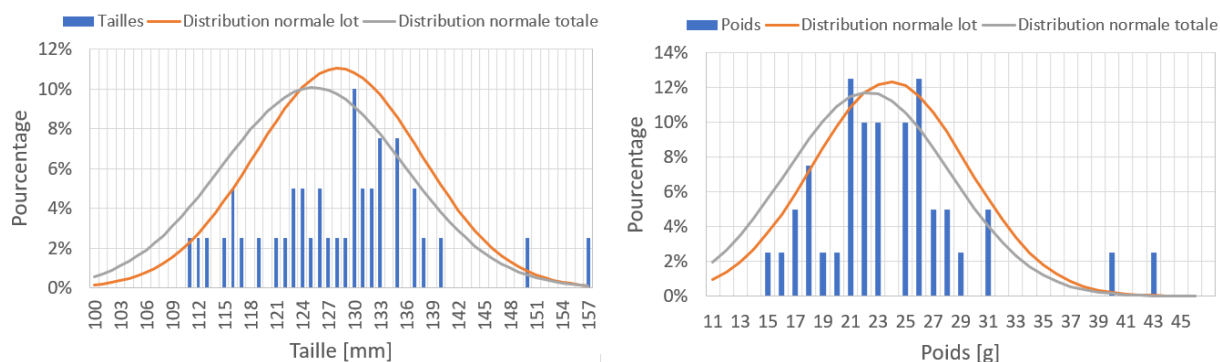


FIGURE B.4 – Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 2.

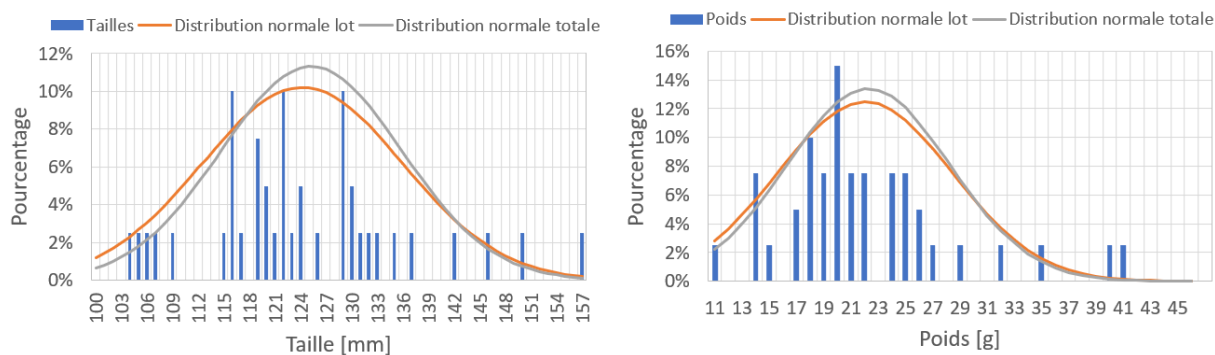


FIGURE B.5 – Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 5.

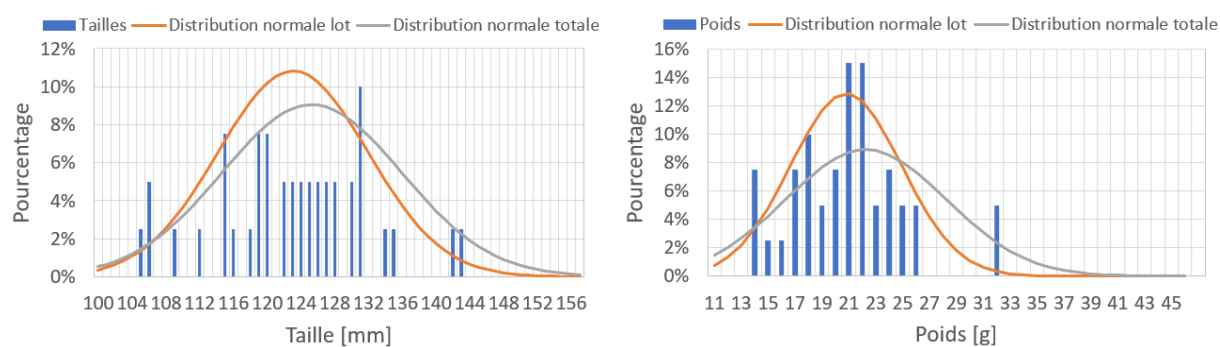


FIGURE B.6 – Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 8.

Lots ayant participé au dispositif ombragé

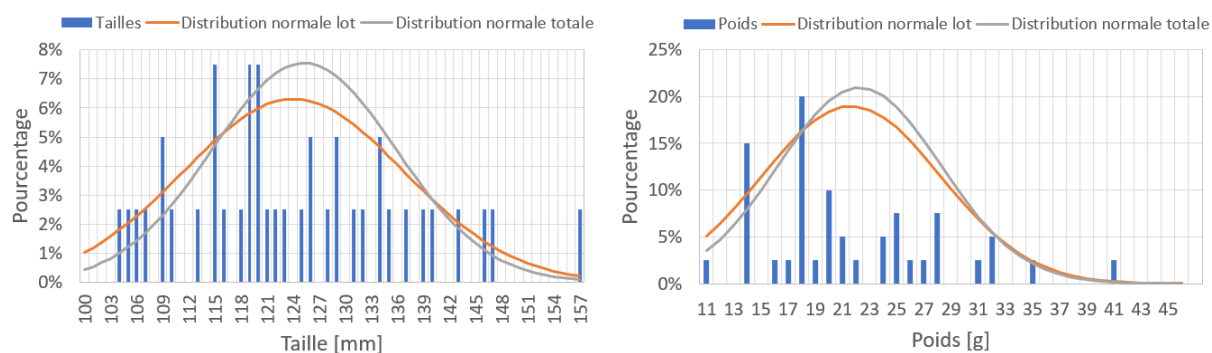


FIGURE B.7 – Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 3.

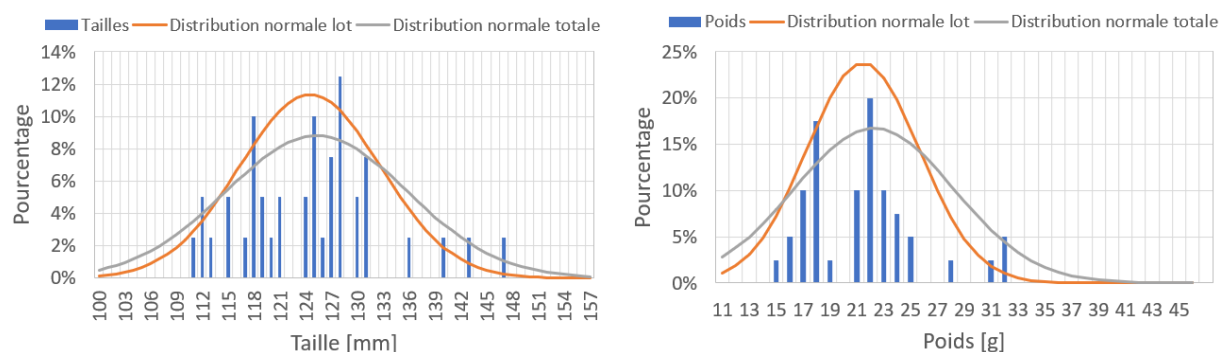


FIGURE B.8 – Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 6.

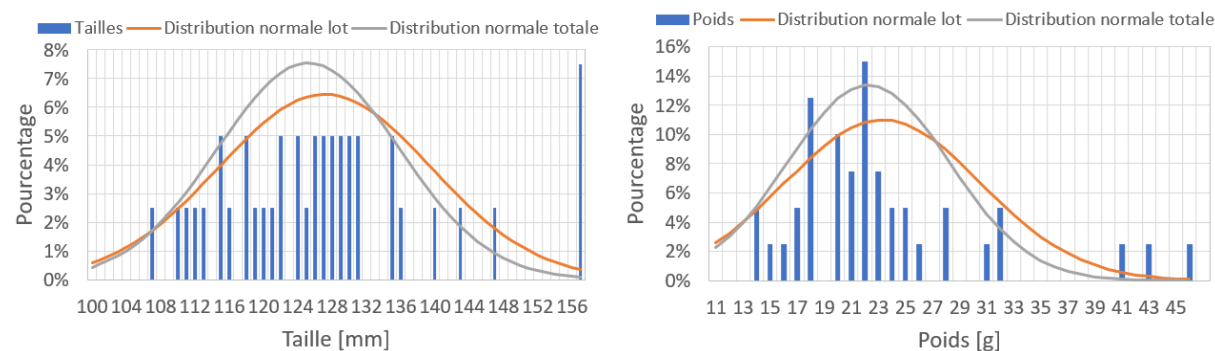


FIGURE B.9 – Distributions statistiques de la taille et du poids, lot 9.

B.2 Relations poids-taille des lots de tacons

B.2.1 Lots ayant participé au dispositif brut

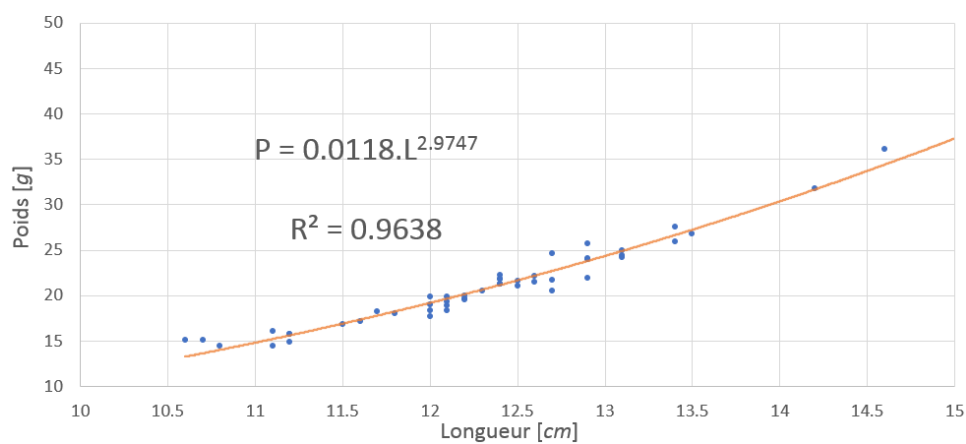


FIGURE B.10 – Relation liant la taille et le poids, lot 1.

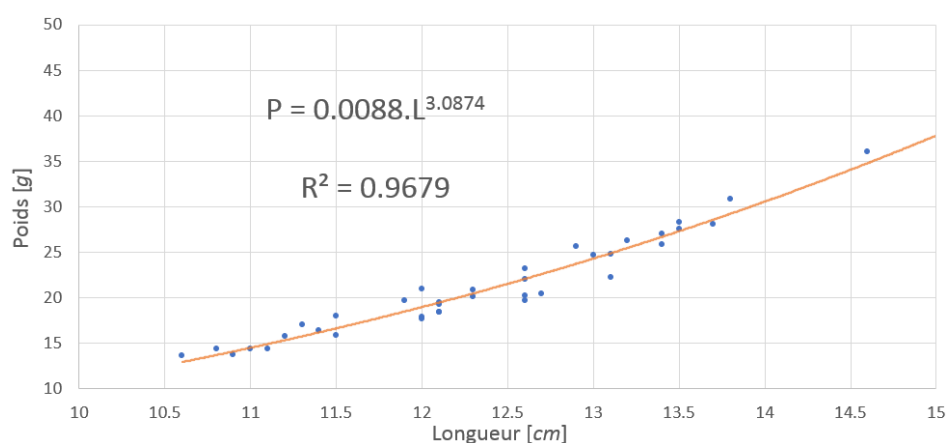


FIGURE B.11 – Relation liant la taille et le poids, lot 4.

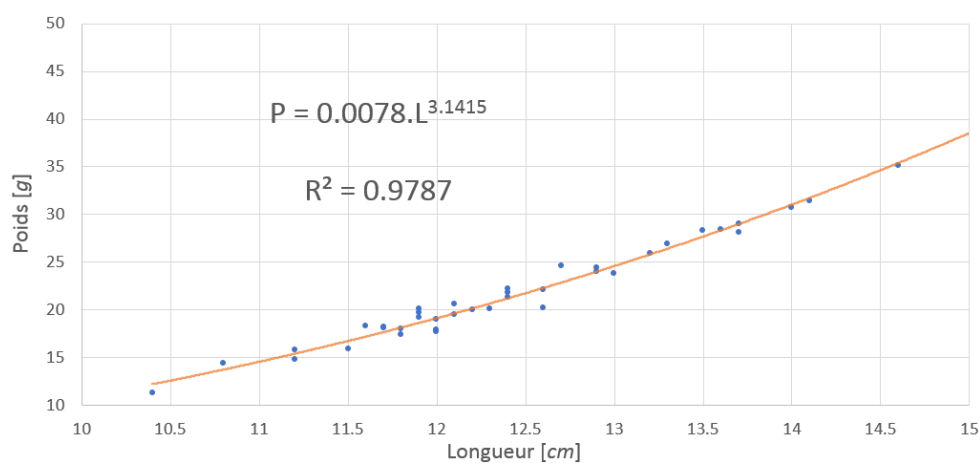


FIGURE B.12 – Relation liant la taille et le poids, lot 7.

B.2.2 Lots ayant participé au dispositif opacifié

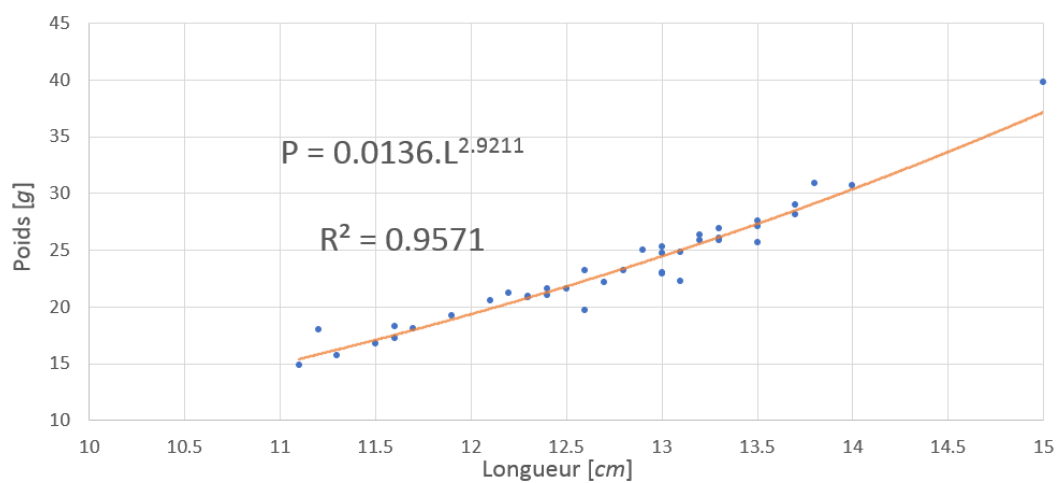


FIGURE B.13 – Relation liant la taille et le poids, lot 2.

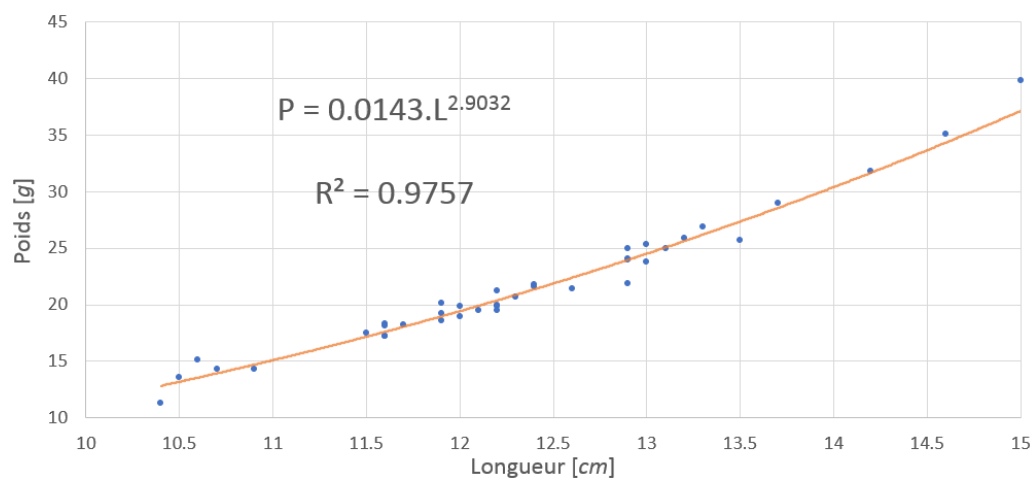


FIGURE B.14 – Relation liant la taille et le poids, lot 5.

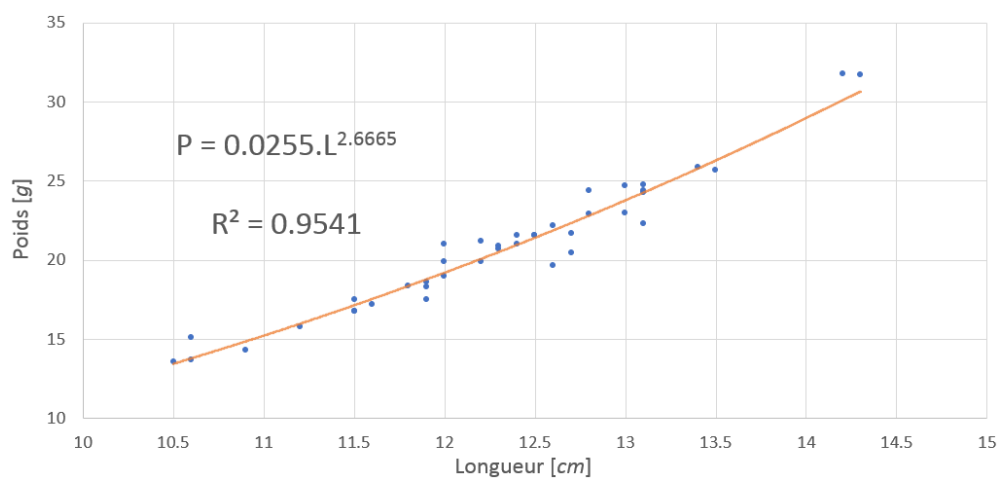


FIGURE B.15 – Relation liant la taille et le poids, lot 8.

B.2.3 Lots ayant participé au dispositif ombragé

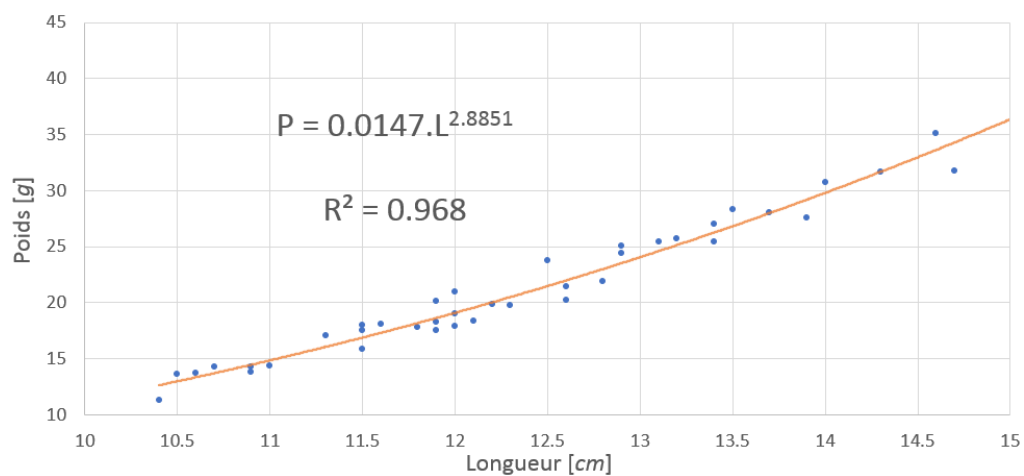


FIGURE B.16 – Relation liant la taille et le poids, lot 3.

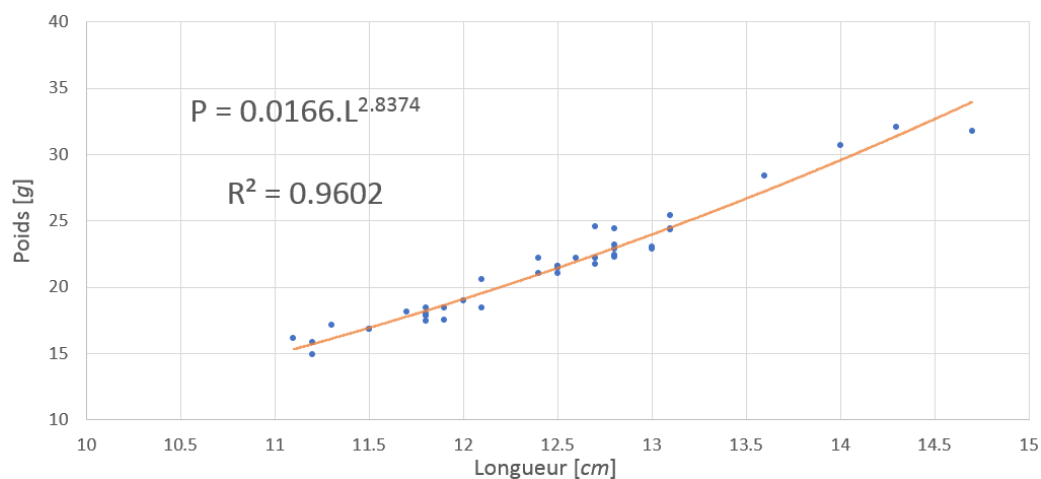


FIGURE B.17 – Relation liant la taille et le poids, lot 6.

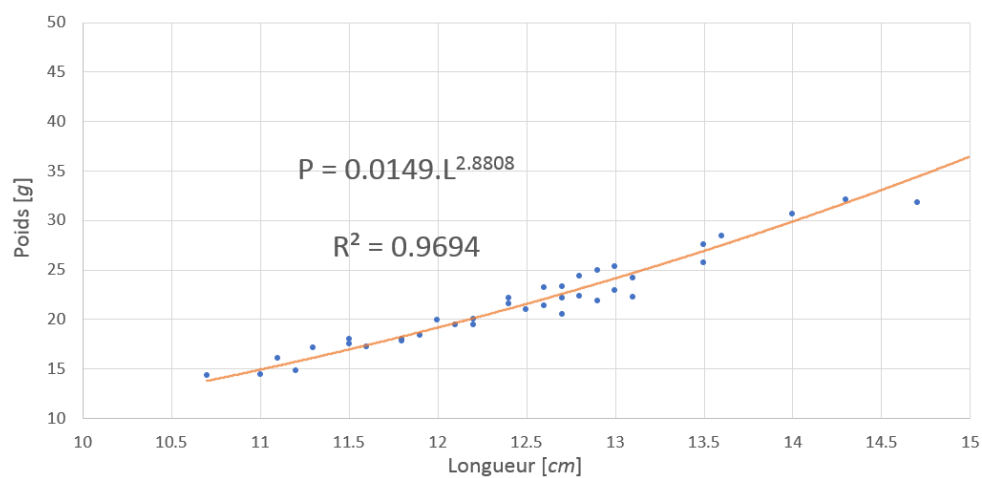


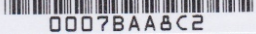
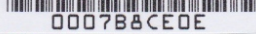
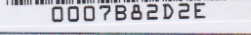
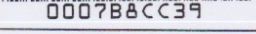
FIGURE B.18 – Relation liant la taille et le poids, lot 9.

B.3 Recensement des 200 tacons pit-tagués, mesurés et pesés à la pisciculture d'Erezée

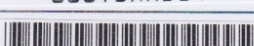
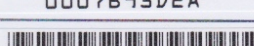
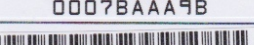
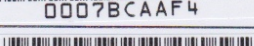
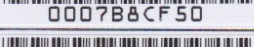
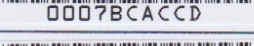
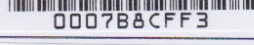
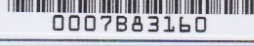
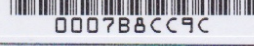
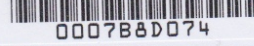
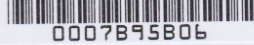
Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
1	128	22,3	0006CA1264
2	127	23,3	000718DD4B
3	121	19,5	0006B9E2B2
4	133	27,4	00071587B2
5	133	26,9	0006B9933C
6	138	30,9	000718DOE8
7	121	19,3	000715CFED
8	127	23,5	0006C9ED87
9	126	23,9	0006CE36BD
10	125	21,0	0007159E4A
11	121	20,6	000719414D
12	128	24,4	0006C9FB7F
13	126	22,2	0006CA0A11
14	115	16,8	0006C9FE80
15	129	21,9	0006CA0ED4
16	118	16,7	000718F852
17	137	29,0	0006B8B295
18	132	26,3	00071587AA
19	128	22,3	 0007B63270
20	130	23,5	 0006C86CA8

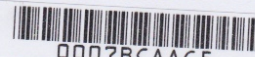
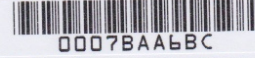
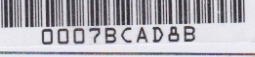
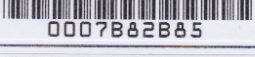
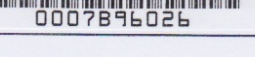
Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
21	131	22,3	 0007BCAC15
22	110	14,9	 0007B95C7C
23	119	18,3	 0007B8CEFE
24	131	24,3	 0007B8CCFD
25	121	19,5	 0007B8D2AF
26	141	31,4	 0007B8D1A8
27	142	31,8	 0007BCAA26
28	123	20,9	 0007B95E67
29	127	20,5	 0007B831E0
30	122	21,2	 0007BCAA37
31	120	18,3	 0007B8D099
32	134	27,0	 0007B8D36F
33	137	28,4	 0007B8CC19
34	129	24,1	 0007BCA820
35	137	28,2	 0007BAA8F5
36	127	24,6	 0007B8CCD8
37	121	18,9	 0007BAA8C2
38	134	25,4	 0007B8CE0E
39	133	26,1	 0007B82D2E
40	130	24,7	 0007B8CC39

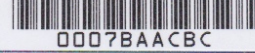
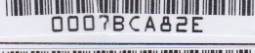
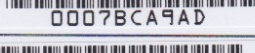
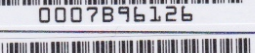
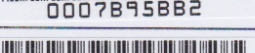
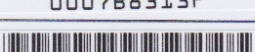
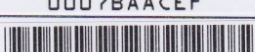
Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
41	125	20,7	 0007B96191
42	126	22,1	 0007BAABE1
43	117	18,2	 0007B95E04
44	136	28,4	 0007B8D398
45	123	20,1	 0007BAAB04
46	126	21,4	 0007B8D188
47	116	16,4	 0007B8CEF1
48	118	18,4	 0007B95D2A
49	106	13,7	 0007BAAA98
50	128	22,4	 0007BCAAF4
51	128	23,2	 0007B8CF50
52	114	15,5	 0007BCACCD
53	119	20,1	 0007BC3E40
54	114	16,4	 0007B8CFF3
55	133	25,9	 0007B83160
56	119	19,7	 0007B8CC9C
57	124	22,2	 0007BCABE0
58	125	23,8	 0007B8D074
59	131	25,0	 0007B95B06
60	123	20,5	 0007BAAB96

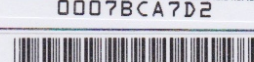
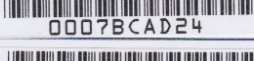
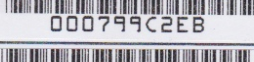
Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
61	131	24,4	 0007B95D5A
62	132	25,8	 0007B8CE9B
63	123	19,8	 0007B8CF72
64	124	21,6	 0007BCAAC5
65	107	15,1	 0007BCA968
66	108	14,4	 0007BAA6BC
67	116	18,1	 0007BCAB74
68	121	18,4	 0007B8CD4E
69	119	17,5	 0007BCAC37
70	124	21,3	 0007BCADAC
71	111	16,1	 0007BCAD8B
72	129	25,0	 0007BAA7D1
73	130	23,0	 0007BAA781
74	146	36,1	 0007B8D14A
75	114	17,3	 0007B82B85
76	129	24,0	 0007BCAAA1
77	120	19,0	 0007B831EE
78	147	31,8	 0007BAAC8E
79	124	21,8	 0007BCAB6D
80	119	18,6	 0007B96026

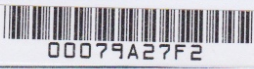
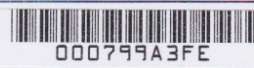
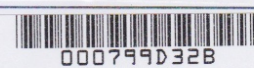
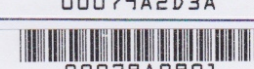
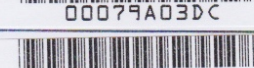
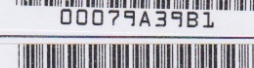
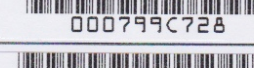
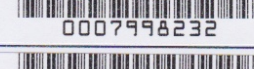
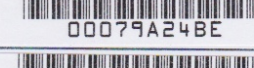
Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
81	135	27,6	 0007B8D085
82	135	30,1	 0007BCAC90
83	139	33,1	 0007BAADA3
84	116	17,2	 0007B8CD93
85	124	20,4	 0007BAACBC
86	119	19,2	 0007BCAA17
87	120	19,9	 0007BCA82E
88	150	39,8	 0007BAAC3E
89	134	27,5	 0007BCA9AD
90	139	31,1	 0007B96126
91	137	28,1	 0007B958B2
92	127	21,7	 0007B8CCEF
93	115	15,9	 0007B8313F
94	127	20,3	 0007BAACEF
95	112	18,0	 0007BCA8CE
96	106	15,1	 0007BAA838
97	118	18,0	 0007BAA797
98	125	21,6	 0007BCAE41
99	112	15,8	 0007BCAEB8
100	112	15,8	 0007BAAC66

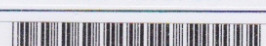
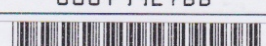
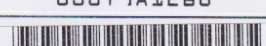
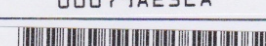
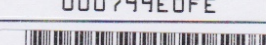
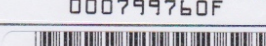
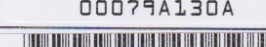
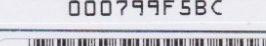
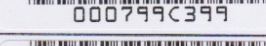
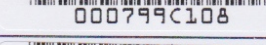
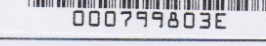
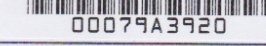
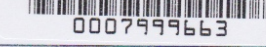
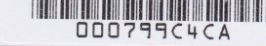
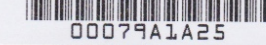
Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
101	112	14,9	 0007B82CEA
102	132	25,7	 0007B8D051
103	132	24,4	 0007B8CD18
104	124	21,3	 0007B8D41B
105	146	35,1	 0007B8D2EA
106	134	27,7	 0007B82D20
107	135	28,3	 0007B8D1C3
108	119	19,2	 0007B8D386
109	120	21,0	 0007BAAC34
110	137	28,0	 0007BCAE3D
111	121	19,9	 0007BCA939
112	128	24,6	 0007B8CFBD
113	133	24,0	 0007BCA7D2
114	127	22,4	 0007B9616C
115	117	19,5	 0007B8D349
116	130	23,8	 0007BCAD24
117	134	25,9	 0007BAA9E1
118	124	21,8	 000799C2EB
119	128	23,6	 00079A0CB9
120	113	15,7	 00079A0C7F

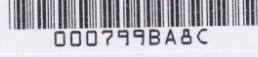
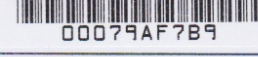
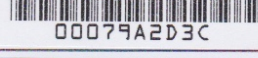
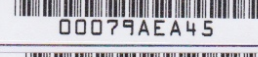
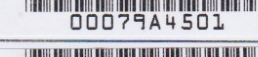
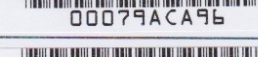
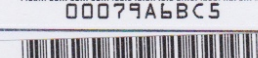
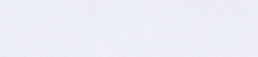
Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
121	122	19,9	 00079A27F2
122	135	25,7	 000799A841
123	120	19,0	 000799A3FE
124	122	20,0	 000799C1BB
125	157	42,7	 000799D32B
126	115	17,5	 000799BBD6
127	126	23,2	 0007999E58
128	157	46,3	 00079A2D3A
129	130	25,3	 00079A0901
130	129	25,7	 000799A61D
131	109	14,3	 000799F711
132	126	19,7	 00079A03DC
133	132	25,9	 00079A0103
134	143	32,1	 00079A39B1
135	124	21,0	 000799B2F3
136	132	24,2	 000799C728
137	115	18,0	 0007998232
138	113	17,1	 000799FD95
139	118	17,4	 00079A24BE
140	114	17,3	 000799D617

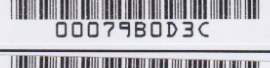
Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
141	123	20,8	 000799E37D
142	127	22,2	 000799F3E6
143	116	17,2	 000799DF0F
144	126	21,5	 000799E1E3
145	109	13,8	 0007996D5A
146	115	16,8	 000799E78B
147	111	14,3	 00079A1268
148	111	15,8	 00079A23EA
149	105	13,6	 000799E0FE
150	111	16,1	 000799760F
151	104	13,2	 00079A130A
152	123	25,1	 000799F5BC
153	133	25,8	 000799C399
154	123	24,4	 000799C108
155	131	24,2	 000799803E
156	135	27,1	 00079A3920
157	154	37,8	 0007999663
158	157	40,7	 000799C4CA
159	143	31,7	 00079A1A25
160	133	27,6	 0007998023

Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
161	120	15,2	 000799F481
162	121	18,4	 00079A32E7
163	125	22,1	 000799BA8C
164	135	26,8	 00079A13CC
165	119	18,5	 00079AF7B9
166	131	24,8	 00079A2D3C
167	130	22,9	 00079AEA45
168	140	30,7	 00079A4501
169	131	25,4	 00079ACA96
170	119	18,0	 00079B153A
171	116	18,3	 00079A6B05
172	117	18,1	 00079A6B5A
173	129	23,3	 00079AE542
174	126	20,2	 00079ABDF6
175	125	21,4	 00079AD579
176	122	19,6	 00079AE496
177	140	30,7	 00079AEE70
178	147	35,0	 00079AE988
179	142	32,4	 00079A6F33
180	150	37,2	 00079AE19C

Marquage saumons expérience châtelet

N°	LF(mm)	Poids(g)	Marque
181	152	40,0	 00079A4882
182	120	17,7	 00079B0382
183	125	21,6	 00079AF58E
184	130	23,3	 00079AF64F
185	123	20,7	 00079AABCO
186	118	19,2	 00079A4F63
187	128	21,9	 00079A7DBA
188	119	18,4	 00079ACD4E
189	120	17,4	 00079ACBE1
190	111	14,4	 00079AF9E5
191	110	14,4	 00079B102B
192	122	19,5	 00079AC6CB
193	120	18,0	 00079AC6BB
194	118	17,8	 00079AE1AF
195	112	14,8	 00079B0D3C
196	120	17,9	 00079AF7C8
197	107	14,3	 00079A48EA
198	100	11,6	 00079AFED4
199	104	11,3	 00079AF6FC
200	107	12,6	 00079AE757

B.4 Recensement des 250 anguilles pit-taguées, mesurées et pesées par l'Université de Liège

Marquage anguille : hachet 13/03/2020

Taille/Poids - ID		Taille/Poids - ID		Taille/Poids - ID		Taille/Poids - ID	
150/3,2	-0007CCCCFC	170/4	-0007CD0E9D	188/10,3	-0007CD287D	167/5,8	-0007CCF400
151/4,2	-0007CD23B3	156/5,3	-0007CD1CDE	152/5,7	-0007CCCECB9	160/5,8	-0007CD32A7
161/6,2	-0007CCD755	157/5,7	-0007CCCEA17	180/8,7	-0007CD305C	160/7,5	-0007CC8923
157/8,8	-0007CCD8C0	143/4	-0007CD342F	133/3,8	-0007CD24B7	161/7,4	-0007CCF6CB
158/11,1	-0007CD1F3D	144/5,3	-0007CD0022	150/11,2	-0007CCDC57	121/3,3	-0007CD0EB9
32/4,6	-0007CD222B	142/8,2	-0007CD1BE4	153/14	-0007CD1FD7	140/4,5	-0007CCF82D
135/3,2	-0007CCCFB0E	145/13	-0007CCF55L	171/8,6	-0007CCD4EA	138/8,8	-0007CCFEBO
142/1,2	-0007CCDD33	150/5	-0007CD212A	163/5,7	-0007CD10E0	176/3	-0007CCCEE8D
71/6,8	-0007CCF3A5	140/4	-0007CCFAFD	158/14,7	-0007CD16CA	148/13	-0007CCF9FB
55/7,6	-0007CCFA75	155/7,2	-0007CCF7A7	757/5	-0007CD0010	183/16	-0007CCD697
30/3,5	-0007CCCEA51	147/5,3	-0007CD13F6	134/4,1	-0007CCCE55D	176/11,6	-0007CCFE03
151/5,2	-0007CD13D3	166/14,2	-0007CCF6C9	147/11	-0007CCFBOA	178/7,5	-0007CCCE6F1
51/5	-0007CCFBB82	128/5,3	-0007CD2757	167/15	-0007CCD6A8	137/12,3	-0007CD023A
50/5,3	-0007CCFEA22	162/12	-0007CD27EC	175/7,6	-0007CD27F0	721/7,5	-0007CD1458
83/8,7	-0007CD061B	164/12	-0007CD05DF	165/6	-0007CD05BF	154/5,6	-0007CD01DB
55/14,1	-0007CCF436	157/13	-0007CD13B3	200/14,6	-0007CD0EA7	160/6,5	-0007CD2B0E
58/8	-0007CCDB2C	152/13	-0007CD11E8	171/13	-0007CD078F	165/6,3	-0007CCF3F5
3/7	-0007CCD575	203/11	-0007CCCEEO	166/7	-0007CCF714	170/8,5	-0007CD3307
7/8,7	-0007CD43F8	111/3,2	-0007CCCD43	115/11,8	-0007CD3765	188/23	-0007CCD8FD
15	-0007CCD607	155/6,4	-0007CCDE33	153/13	-0007CCD011	184/13	-0007CCD0F7B
13/12,7	-0007CD2B9F	153/13,3	-0007CCF88F	178/10,8	-0007CCCE8EE	192/16	-0007CD13A3
56/6	-0007CCD31C	156/14,8	-0007CD0DE8	180/11,2	-0007CD2728	148/14	-0007CD050B
61/6,8	-0007CD15BA	204/11,7	-0007CCF604	136/13,8	-0007CCD3E9	137/13,5	-0007CCCE4E7
61/14,4	-0007CD21C7	167/6,5	-0007CCCE0D	160/6,1	-0007CCCEA5B	167/18	-0007CCCEC67
12/3	-0007CD122F	155/5,6	-0007CD1FE9	157/5,7	-0007CD1D48	162/12	-0007CCF208
61/8,2	-0007CCF261	116/14,2	-0007CD202E	148/11,3	-0007CD0080	138/5	-0007CCF0FD
1/1,2	-0007CD2B3E	170/8,1	-0007CCCE638	140/3,5	-0007CD0892	151/5,1	-0007CD2LSE
4/7,3	-0007CD043C	132/3,6	-0007CCFE0B	186/10,2	-0007CD1185	721/10,1	-0007CD323B
61/4	-0007CD1A8B	142/13,8	-0007CCFF63	158/5,7	-0007CCFD4A	168/7,8	-0007CD270E
1/5,7	-0007CCCE63C	147/5,3	-0007CCF3BE	133/3,7	-0007CD13E7	192/14,4	-0007CDDE95
7/5,3	-0007CD23AC	167/15,8	-0007CCDD94	168/18	-0007CCF34C	183/10,2	-0007CD31A7
13/11	-0007CCFA4F	174/7,7	-0007CD07CD	138/11	-0007CD0F6C	132/17,7	-0007CD0E67
1/10	-0007CD2LFO	203/10,2	-0007CCDF73	170/18	-0007CCF4F4	167/15,5	-0007CCD23E
8/2,3	-0007CCD717	152/5,3	-0007CD051D	184/10,8	-0007CCF3E2	168/7,6	-0007CCCE4E6
7/4,6	-0007CD13AE	152/16,2	-0007CCF328	147/13,5	-0007CD17CE	177/18,3	-0007CD0A64
3/6,6	-0007CCDE7E	180/7,2	-0007CD1328	181/11	-0007CCD6D0	74/8,4	-0007CD1716
173	-0007CCCA6A	141/15	-0007CD0AB6	152/3,2	-0007CD207C	157/5,7	-0007CD2LDB
3/4,2	-0007CD06B8	167/6,1	-0007CCED2B	162/5	-0007CCCD0C7	151/12	-0007CD2888
15/4	-0007CD1576	162/6,5	-0007CD3734	186/8,3	-0007CCDED1	713/5,1	-0007CD05E7
1/8,8	-0007CD01DF	153/5,3	-0007CCCB34	164/12	-0007CCCE4F5	156/13	-0007CCCE150
6/3,8	-0007CD3613	720/13	-0007CD36EB	201/14,3	-0007CD0B0C	165/17	-0007CD1FLD
1/4,5	-0007CCCE6B3	160/13	-0007CD0355	156/12,2	-0007CCF84D	710/7,2	-0007CCCCB0
1/3,1	-0007CD0182	155/16	-0007CD0B73	162/6,7	-0007CCD204	152/12,4	-0007CD2DD7
1/6	-0007CD0B3D	186/7,7	-0007CCDE02B	168/18	-0007CCD0FA	152/5,7	-0007CCCCAA
1/5,3	-0007CCDF10	161/16,8	-0007CCCE8FB	171/14,6	-0007CD04B0	131/13,3	-0007CD1CE3
2/5,8	-0007CCF2C7	136/13,1	-0007CE02FB	162/11,7	-0007CCD50F	167/13	-0007CD118B
1/7,1	-0007CD2D53	173/13,3	-0007CDAG610	157/5	-0007CD2FCF	209/10	-0007CCF434
0/7,5	-0007CCCE44E	161/5,3	-0007CD2C22	172/14,2	-0007CE05A2	133/7,1	-0007CD23F7
0/6,6	-0007CCD471	736/14,3	-0007CCB237	176/15	-0007CD144A	206/14,4	-0007CD0DEF
4/6,3	-0007CCF34D	148/15,5	-0007CD2F53	161/5,1	-0007CE01CE	182/8,8	-0007CCF5F7
8/5,5	-0007CCF1BA	743/6,8	-0007CCCE07	167/16,7	-0007CCD7E4	148/13,4	-0007CCCE59
1/6,5	-0007CCD632	130/14,5	-0007CD00DE	157/5,1	-0007CD05D	137/3,3	-0007CCD833
7/3	-0007CCCEAFB	123/11,8	-0007CD1F83	148/14,8	-0007CCD008	140/14,8	-0007CCDDE2
1/5,2	-0007CD162F	173/13,3	-0007CCDFBF	171/6,7	-0007CCF3AF	146/15,4	-0007CCD9EC
17,5	-0007CD144C	201/12,5	-0007CD1183	147/14,7	-0007CD07DB	164/12,2	-0007CD0C8B
1/1,7	-0007CCCE3A	190/10,5	-0007CCF78C	133/14,3	-0007CCD1F5	128/3,5	-0007CD26B7
15,2	-0007CCCFE2	240/12	-0007CCD9E7	123/13,7	-0007CCCEA4A	151/4,8	-0007CCF5B5
1/2	-0007CD12AD	181/13	-0007CCF430	135/7	-0007CD0C22	175/12	-0007CCD00E
5/6	-0007CD321D	135/7	-0007CD0C22	163/16	-0007CD2033	150/16,4	-0007CCF447
11	-0007CD07B	163/16	-0007CD2033			137/13	-0007CCF9FE

B.5 Certificat de formation sur le bien-être animal

UCL Université catholique de Louvain



Faculté de Médecine

Animalerie Sectorielle - UCL

Louvain en Woluwe, le 25 octobre 2019

Cette attestation confirme que **Gilles Deveen** a suivi la formation destinée aux personnes/techniciens apportant des soins élémentaires aux animaux.

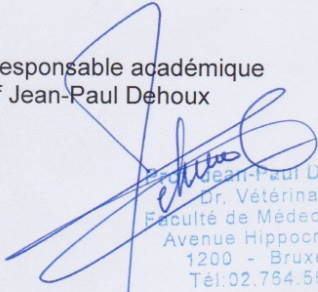
Conformément à l'Annexe I de l'arrêté royal du 13 septembre 2004 relatif à protection des animaux d'expérience en ce qui concerne la formation des personnes effectuant des expériences sur animaux, y participant ou assurant les soins aux animaux utilisés à des fins expérimentales,

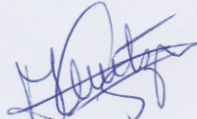
L'apprentissage comprend :

- (i) Une formation théorique d'un minimum de 4 heures abordant les notions relatives aux thèmes repris ci-après : 1. Connaissance du mode d'utilisation et d'entretien des équipements de stérilisation et de nettoyage; 2. Entretien, nettoyage et désinfection des aires de service (hygiène des locaux-laveries, des couloirs,...); 3. Manipulation des déchets d'animalerie; 4. Réception, déchargement et entreposage des fournitures d'animalerie; 5. Notion du contrôle de l'environnement des animaux utilisés à des fins expérimentales et du bon fonctionnement des appareils de désinfection et de stérilisation; 6. Hébergement et soins aux animaux utilisés à des fins expérimentales en élevage et en cours de procédure; 7. Maniement et contention des espèces d'animaux les plus couramment utilisées à des fins expérimentales; 8. Contrôle de l'état de santé des animaux utilisés à des fins expérimentales; 9. Hygiène des locaux d'animalerie et des locaux d'expérience et apport des articles courants de protection (gants, masques, survêtements ou vêtements dédiés à l'animalerie,...); 10. Enregistrement des paramètres de l'environnement des animaux (température, humidité relative, etc.), des activités de soins aux animaux et d'hygiène des équipements et signalement des anomalies observées; 11. Sécurité du personnel et des animaux; 12. Notions sur la législation en vigueur en Belgique en matière d'hébergement et d'utilisation des animaux utilisés à des fins expérimentales.
- (ii) Une formation pratique appropriée sur le terrain, sous la responsabilité directe d'une personne ayant la formation adéquate

Le responsable académique
Prof Jean-Paul Dehoux

Le secrétaire du jury
Dr Magali Crutzen


Jean-Paul DEHOUX
Dr. Vétérinaire
Faculté de Médecine UCL
Avenue Hippocrate 56
1200 - Bruxelles
Tél: 02.764.56.22



Université catholique de Louvain – Secteur des Sciences de la Santé



Animalerie Sectorielle - UCL

Louvain en Woluwe, le 25 octobre 2019

Cette attestation confirme que **Elias Robert** a suivi la formation destinée aux personnes/techniciens apportant des soins élémentaires aux animaux.

Conformément à l'Annexe I de l'arrêté royal du 13 septembre 2004 relatif à protection des animaux d'expérience en ce qui concerne la formation des personnes effectuant des expériences sur animaux, y participant ou assurant les soins aux animaux utilisés à des fins expérimentales,

L'apprentissage comprend :

- (i) Une formation théorique d'un minimum de 4 heures abordant les notions relatives aux thèmes repris ci-après : 1. Connaissance du mode d'utilisation et d'entretien des équipements de stérilisation et de nettoyage; 2. Entretien, nettoyage et désinfection des aires de service (hygiène des locaux-laveries, des couloirs,...); 3. Manipulation des déchets d'animalerie; 4. Réception, déchargement et entreposage des fournitures d'animalerie; 5. Notion du contrôle de l'environnement des animaux utilisés à des fins expérimentales et du bon fonctionnement des appareils de désinfection et de stérilisation; 6. Hébergement et soins aux animaux utilisés à des fins expérimentales en élevage et en cours de procédure; 7. Maniement et contention des espèces d'animaux les plus couramment utilisées à des fins expérimentales; 8. Contrôle de l'état de santé des animaux utilisés à des fins expérimentales; 9. Hygiène des locaux d'animalerie et des locaux d'expérience et apport des articles courants de protection (gants, masques, survêtements ou vêtements dédiés à l'animalerie,...); 10. Enregistrement des paramètres de l'environnement des animaux (température, humidité relative, etc.), des activités de soins aux animaux et d'hygiène des équipements et signalement des anomalies observées; 11. Sécurité du personnel et des animaux; 12. Notions sur la législation en vigueur en Belgique en matière d'hébergement et d'utilisation des animaux utilisés à des fins expérimentales.
- (ii) Une formation pratique appropriée sur le terrain, sous la responsabilité directe d'une personne ayant la formation adéquate

Le responsable académique
Prof Jean-Paul Dehoux

Prof. Jean-Paul DEHOUX
Dr. Vétérinaire
Faculté de Médecine UCL
Avenue Hippocrate 56
1200 - Bruxelles
Tel: 02.764.56.22

Le secrétaire du jury
Dr Magali Crutzen

238

[illegible]

B.7 Protocole expérimental du marquage des poissons

Matériel

- Gants en latex
- Trois grand seaux
- Anesthésiant (Ether monophénylique de l'éthyléglycol [M])
- Lame de scalpel de type 11
- PIT-tags (**P**assive **I**ntegrated **T**ransponder)
- Pour la pesée : Balance
- Pour la mesure : Planche de mesure à poissons

Méthode

Pour réaliser à bien cette opération il faut être deux personnes : la première réalise l'opération, la pesée et la mesure de la longueur tandis que la seconde note toutes ces informations. De cette façon, les manipulations sont plus efficaces et le temps que passe le poisson hors de l'eau lors de celles-ci est réduit.

Trois seaux sont répartis dans la zone de travail :

- Le premier seau est rempli d'eau et sert à stocker un petit lot de poissons qui ne sont pas PIT-tagués.
- Le second seau est rempli d'eau et d'anesthésiant à raison de 2,3mL d'anesthésiant par litre. L'anesthésiant doit y être dilué convenablement. Ce seau sert à endormir les poissons pour les manipulations.
- Le troisième seau est rempli d'eau et sert à stocker un petit lot de poissons qui ont été PIT-tagués. Les effets de l'anesthésiant y sont interrompus.

Les étapes de l'opérations sont les suivantes :

1. Introduire un petit lot d'une dizaine de poissons dans le premier seau.
2. Introduire quelques poissons du premier seau dans le second seau contenant l'anesthésiant pour les endormir.
3. Une fois le poisson endormi, celui-ci peut être pesé et mesuré par la première personne. Le poids et la longueur est transmise à la seconde personne pour qu'elle les note.
4. Le ventre du poisson peut être incisé sur quelques millimètres. En fonction de l'espèce et de la taille du PIT-tag, la position et la taille de l'incision peut varier.
5. La première personne éjecte le PIT-tag de l'aiguille (les PIT-tag sont initialement contenu dans une aiguille mais celle-ci est trop large pour être utilisée comme moyen d'injection) et l'insère dans l'incision faite au préalable. La seconde personne note le code du PIT-tag inscrit sur l'emballage.
6. Le poisson est introduit dans le troisième seau pour qu'il se réveille.
7. Une fois le premier seau vidé et le troisième rempli, il faut recommencer à partir du point 1 jusqu'à ce que l'ensemble des poissons à été PIT-tagué.

Une période d'observation de quelques jours après l'opération est nécessaire afin de vérifier la qualité de celle-ci tant au niveau de survie des poissons qu'au niveau de la perte du PIT-tag.

B.8 Résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau de Châtelet

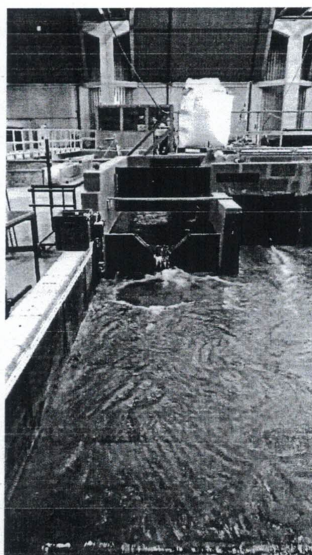


Prélèvement Entreprise

1. Identification

Nom du point de prélèvement donné par l'entreprise : premier bassin

Photos du point d'échantillonnage



Un prélèvement ponctuel a été réalisé dans le premier bassin situé à l'entrée du hall, à droite.

Date	Heure	T° (°C)	K 20°C (μS/cm)	O2 (mg/l)	O2 (%)	pH	Turbidité (NTU)	Hydrocarbures	Couleur
01/04/2019	12h00	14.8	837	10.23	102.3	8.53	0.42	Absents	normale

Boîte terrain : 10

Turbidimètre : 10

Remarque: ce rapport ne peut être reproduit, sinon en entier, sauf accord de l'Institut.
Rapport de prélèvement n°1240/2019. 2/3

Résultats

nos réf. : GE 2 / 2019 / 349

vos réf. : BDC Châtelet Avril 2019: DO222/CMD/001187

1

Paramètre	Unité	Echantillon 1	Date d'analyse
DBO5	mg O2 / l	< 3	04-04-19
Chlorures	mg Cl / l	112	04-04-19
Sulfates	mg SO4 / l	73	04-04-19
TA	°F	< 1	04-04-19
TAC	°F	13.9	04-04-19
Dureté	°F	13.9	11-04-19
Azote ammoniacal	mg N/l	< 0.04	04-04-19
Nitrates	mg N / l	4.3	04-04-19
Nitrites	mg N / l	< 0.003	08-04-19
Azote Kjeldahl	mg N/l	< 2	02-04-19
Azote total	mg N/l	4.3	
Orthophosphates	mg PO4 / l	< 0.05	09-04-19
P tot	mg P / l	< 0.06	08-04-19
Ca	mg / l	31	11-04-19
Mg	mg / l	15.0	11-04-19
Na	mg / l	63	11-04-19
K	mg / l	69	11-04-19
Si	mg / l	4.7	08-04-19
Fe	µg / l	16.6	09-04-19
Al	µg / l	50	09-04-19
Mn	µg / l	< 1.25	09-04-19

* : paramètre non accrédité

** : par calcul, paramètre non accrédité

Paramètre	Unité	GE2/2019/0349/1 Bassin	Date d'analyse
Ind. hydrocarbure C ₁₀ -C ₄₀	mg/l	< 0.1	11-04-2019
TOC	mg C/l	1.1	02-04-19

Client: Madame Christelle DERE pour le compte du
SPW-DGO2 - Direction des recherches

Identification ISSeP: GE2/2019/349

Référence client: DO222/CMD/001187

Date de réception des échantillons: 01-04-19

Date d'analyse: 01-04-19

Paramètres	Unité	GE2/2019/349/ 1 Bassin
Coliformes	nombre / 100ml	0
Coliformes thermotolérants (*)	nombre / 100ml	0
Escherichia coli	nombre / 100ml	0
Entérocoques intestinaux	nombre / 100ml	0
Spores bactéries sulfito-réductrices (*)	nombre / 100 ml	0
Clostridium perfringens	nombre / 100 ml	0
Salmonelles	Présence / 1 Litre	Absence
Chlorophylle a	µg / L	<2
Observation algues (*)	250ml	Absence

(*) paramètre non accrédité

Remarques: le dosage de la chlorophylle et l'observation en microscopie optique ont révélé l'absence d'algues. Dès lors, le dosage des microcystines n'a pas été réalisé car inutile.

Annexe C

Annexe se rapportant aux méthodes

C.1 Détails des mesures de lumière

La Figure [C.1] reprend de manière schématique les endroits de mesures arbitrairement choisis.

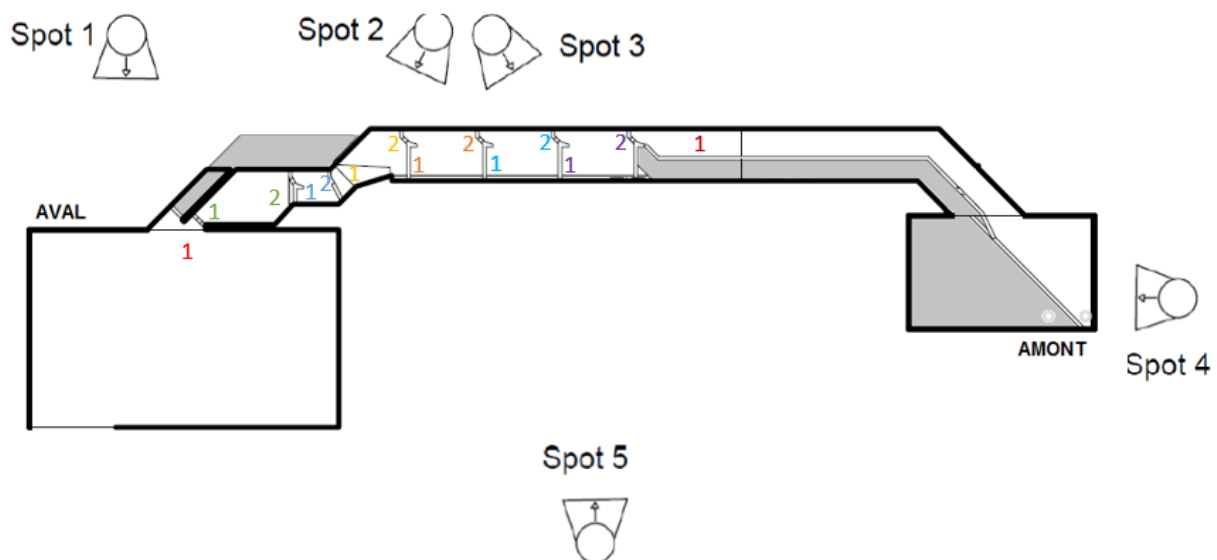


FIGURE C.1 – Schéma des endroits de mesures d'intensité lumineuse prises sur le modèle réduit.

Les Tableaux [C.1], [C.2] et [C.3] reprennent l'ensemble des mesures chiffrées établies ainsi que les moyennes pondérées pour différents cas.

Les deux mesures prises sur chaque bassin ont été réalisées aux extrémités du bassin. Ainsi, des mesures différentes peuvent varier significativement suivant l'orientation des sports vers l'endroit de mesure. De plus, les bassins proches des spots 2 et 3 seront plus éclairés. En témoignent les intensités lumineuses plus élevées obtenues pour ces bassins. Enfin, le réservoir aval est également plus sujet à capter plus de lumière en raison de sa proximité avec le spot 1 qui se dirige vers lui.

	Luxmètre 1		Luxmètre 2		Moyenne		
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Luxmètre 1	Luxmètre 2	Bassin
Bac aval	370	/	357	/	370	357	363.5
Bassin 1	336	178	323	147	257	235	246
Bassin 2	141	314	210	371	227.5	290.5	259
Bassin 3	317	367	367	335	342	351	346.5
Bassin 4	289	183	264	209	236	236.5	236.3
Bassin 5	223	201	183	184	212	183.5	197.8
Bassin 6	260	273	238	206	266.5	222	244.3
Canal	253	156	149	140	204.5	144.5	174.5

Moyenne Lux. 1	249	Moyenne Lux. 2	238	Moyenne générale	243
----------------	-----	----------------	-----	------------------	-----

TABLE C.1 – Synthèse des mesures d'intensité lumineuse pour la cas brut, résultats exprimés en lux.

	Luxmètre 1		Luxmètre 2		Moyenne		
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Luxmètre 1	Luxmètre 2	Bassin
Bac aval	347	/	357	/	347	357	352
Bassin 1	213	136	200	126	174.5	163	168.8
Bassin 2	87	141	76	169	114	122.5	118.3
Bassin 3	183	139	170	130	161	150	155.5
Bassin 4	115	118	99	102	116.5	100.5	108.5
Bassin 5	62	71	69	55	66.5	62	64.3
Bassin 6	61	95	64	86	78	375	76.5
Canal	91	/	82	/	91	82	286.5

Moyenne Lux. 1	115	Moyenne Lux. 2	108	Moyenne générale	111
----------------	-----	----------------	-----	------------------	-----

TABLE C.2 – Synthèse des mesures d'intensité lumineuse pour la cas opacifié, résultats exprimés en lux.

	Luxmètre 1		Luxmètre 2		Moyenne		
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Luxmètre 1	Luxmètre 2	Bassin
Bac aval	360	/	341	/	360	341	350.5
Bassin 1	530	250	347	373	390	360	375
Bassin 2	254	437	259	432	345.5	345.5	345.5
Bassin 3	396	493	375	458	444.5	416.5	430.5
Bassin 4	415	302	467	314	358.5	390.5	374.5
Bassin 5	486	278	374	294	382	334	358
Bassin 6	287	323	314	330	305	322	313.5
Canal	310	214	250	174	262	212	237

Moyenne Lux. 1	356
-----------------------	-----

Moyenne Lux. 2	340
-----------------------	-----

Moyenne générale	348
-------------------------	------------

TABLE C.3 – Synthèse des mesures d'intensité lumineuse pour la cas ombragé, résultats exprimés en lux.

Annexe D

Annexe se rapportant aux résultats

D.1 Attractivité de la passe en fonction de l'heure

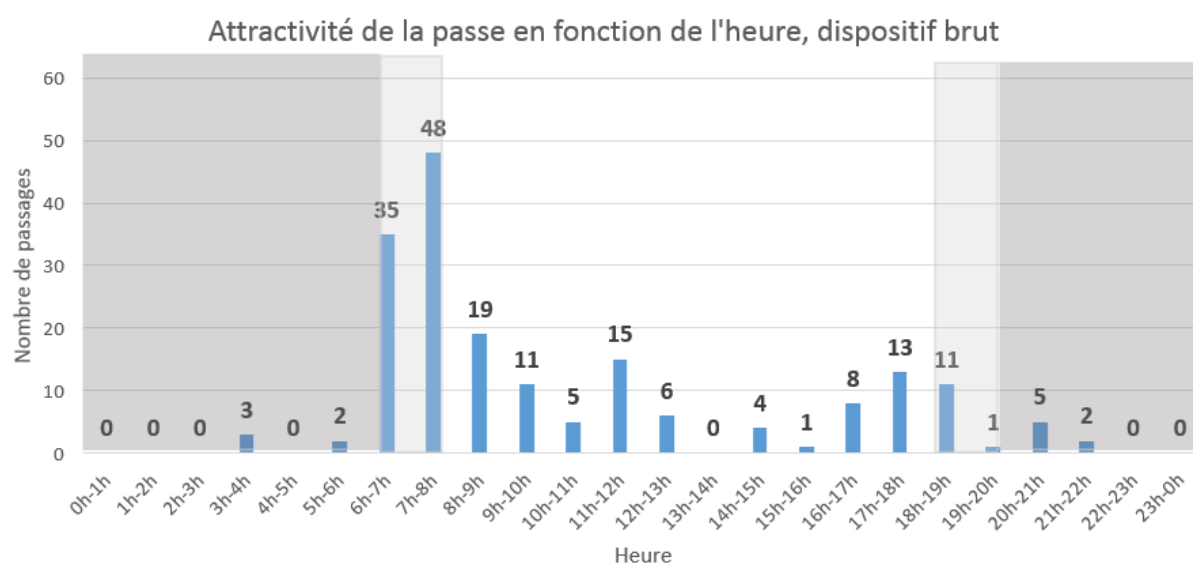


FIGURE D.1 – Nombre de passages au seuil S6, cas brut.

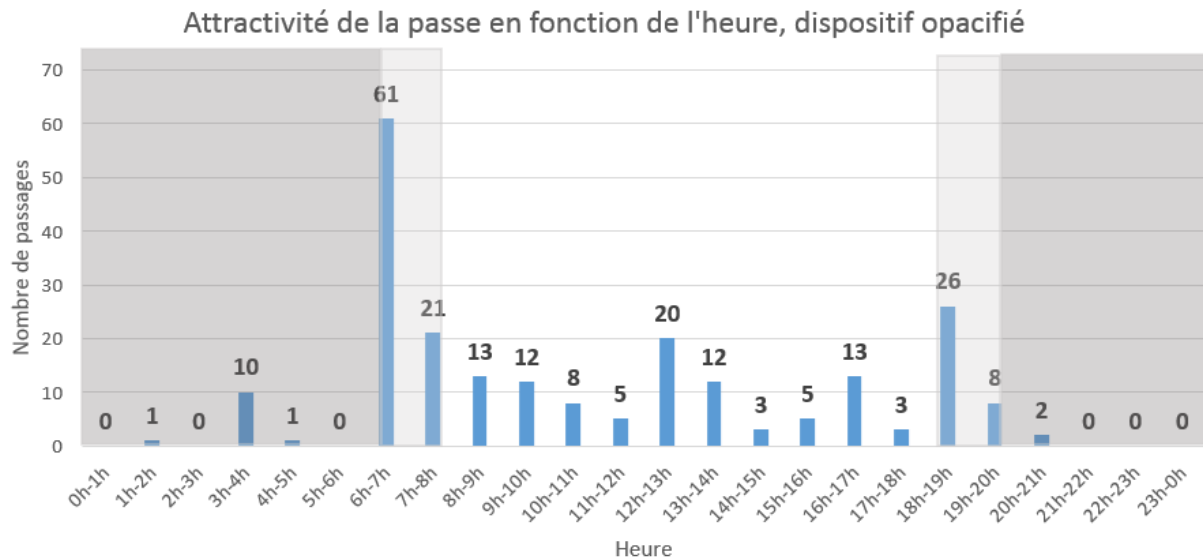


FIGURE D.2 – Nombre de passages au seuil S6, cas opacifié.

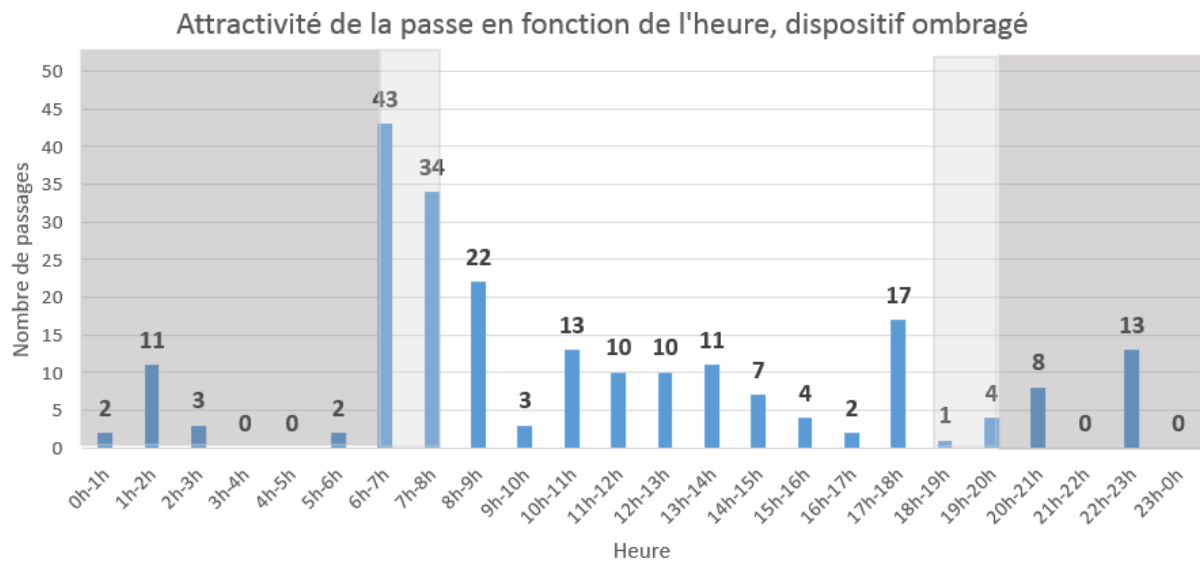


FIGURE D.3 – Nombre de passages au seuil S6, cas ombragé.

D.2 Nombre de détections recensées par antenne

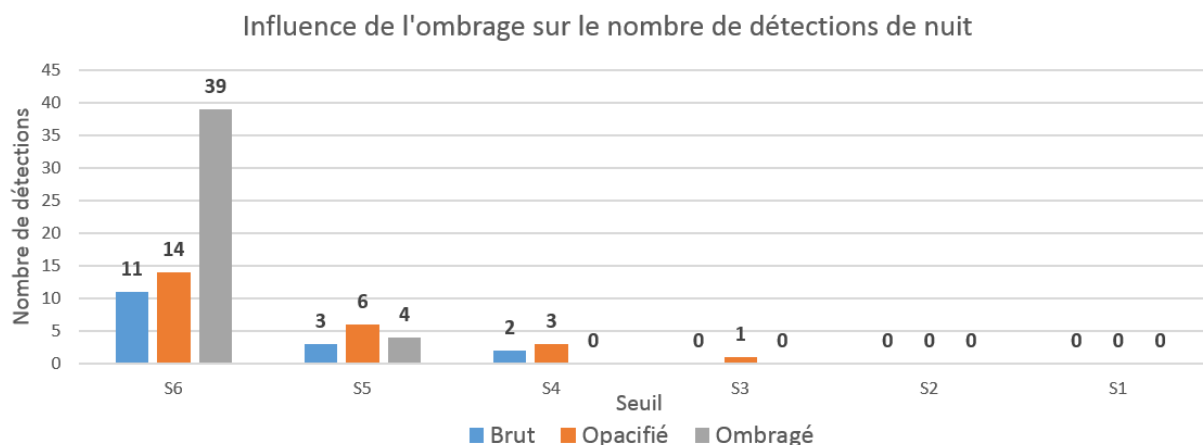


FIGURE D.4 – Nombre de détections obtenues par seuil durant la période de nuit.

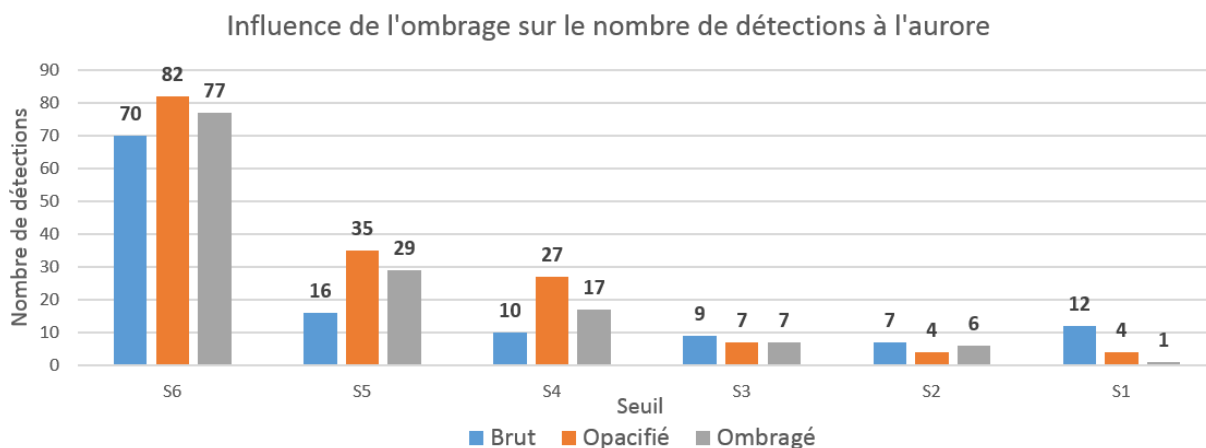


FIGURE D.5 – Nombre de détections obtenues par seuil durant la période de l'aurore.

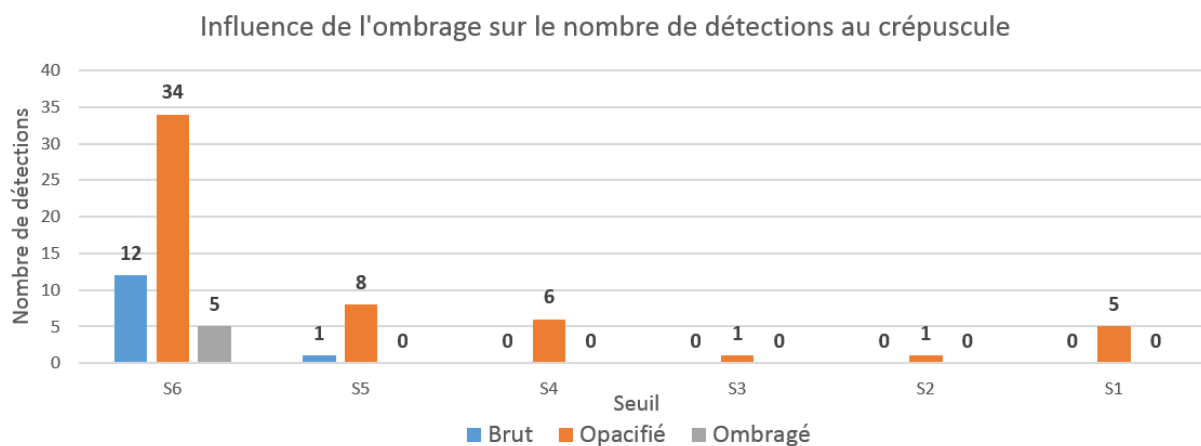


FIGURE D.6 – Nombre de détections obtenues par seuil durant la période de crépuscule.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl