



Modélisation du comportement des saumons atlantiques juvéniles à l'approche d'un ouvrage de franchissement

Noor Ben Jebria

► To cite this version:

Noor Ben Jebria. Modélisation du comportement des saumons atlantiques juvéniles à l'approche d'un ouvrage de franchissement. Ecologie, Environnement. Université de Lyon, 2022. Français. NNT : 2022LYSE1105 . tel-04198810

HAL Id: tel-04198810

<https://theses.hal.science/tel-04198810>

Submitted on 7 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre NNT : 2022LYSE1105

THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de :

l'Université Claude Bernard Lyon 1

Ecole Doctorale Numéro 341

Evolution, Ecosystème, Microbiologie, Modélisation (E2M2)

Spécialité de doctorat : Ecologie

Discipline : Hydroécologie

Soutenue publiquement le 23/06/2022, par :

Noor Ben Jebria

Modélisation du comportement des saumons atlantiques juvéniles à l'approche d'un ouvrage de franchissement

Sous la direction de :

Capra Hervé, Directeur de Recherche, INRAE Villeurbanne, directeur de thèse

De Oliveira Eric, Ingénieur de Recherche, EDF R&D, encadrant

Carmigniani Rémi, Chercheur, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, encadrant

Devant le jury composé de :

Mme. ARGILLIER Christine

Directrice de recherche, INRAE Occitanie-Montpellier

M. RIVOT Etienne

Ingénieur en chef des Ponts, des Eaux et des Forêts-HDR, Institut Agro Rennes

Mme. SILVA Ana

Chercheuse, Institut Norvégien de recherche sur la nature, Trondheim Norvège

Mme. BERTRAND Sophie

Directrice de recherche, IRD Sète

Mme. PLENET Sandrine

Directrice de recherche, Université Lyon 1

M. CAPRA Hervé

Directeur de recherche, INRAE Villeurbanne

Présidente

Rapporteur

Rapporteuse

Examinatrice

Examinatrice

Directeur de thèse

Résumé

La fragmentation des écosystèmes est une menace majeure pour la biodiversité et l'un des principaux défis pour la conservation et la restauration des milieux aquatiques. Dans les écosystèmes aquatiques, les barrières longitudinales anthropologiques, telles que les barrages, sont en partie responsables du déclin des populations de poissons. L'impact est encore plus important sur les espèces diadromes dont le cycle de vie s'étend sur les écosystèmes marins et d'eau douce. L'un des moyens les plus courants pour rétablir la continuité des cours d'eau est la mise en place d'ouvrages de franchissement (FPS), avec une efficacité variable. Le développement d'un FPS efficace dépend de la compréhension de la réponse comportementale du poisson aux conditions hydrauliques qui peuvent les attirer ou les repousser. Si une grande attention a été accordée aux solutions de montaison, les connaissances restent encore insuffisantes, notamment pour la dévalaison. La plupart des études se sont concentrées sur les grandes structures de barrage ayant un débit élevé. Pourtant, moins d'études ont été menées sur les barrages avec de grands réservoirs et de faibles débits, malgré la prévalence de ces sites où les débits relativement calmes sont connus pour désorienter les poissons.

Dans cette thèse, à partir des connaissances scientifiques et de nos résultats, nous proposons un nouvel outil numérique pour modéliser le comportement des saumons atlantiques juvéniles (smolts) lors de leur dévalaison au barrage de Poutès (Allier, France). Cet outil a pour but de fournir un nouveau cadre pour la conception des FPS.

Nous développons d'abord un modèle tridimensionnel de dynamique des fluides (CFD) de la retenue en amont du barrage de Poutès pour mieux comprendre les conditions du champ d'écoulement affectant la dévalaison des smolts, où les conditions hydrauliques sont particulièrement faibles. A partir du modèle CFD et des données de télémétrie, nous analysons ensuite l'effet des conditions hydrauliques sur le comportement des smolts dans une grande retenue en amont du barrage. Les positions mesurées des smolts et les simulations CFD ont été utilisées pour caractériser le comportement de nage des smolts en utilisant leur force de poussée, l'orientation et la direction de nage. La force de poussée a été estimée en résolvant la deuxième loi de Newton. L'étude des déplacements des poissons en fonction des conditions hydrauliques a fourni de nouvelles informations sur l'utilisation de la force de poussée, de l'orientation et de la direction de la nage comme moyen de caractériser le comportement des smolts, ce qui peut aider à la conception de FPS pour la dévalaison. Nos résultats ont montré que malgré les très faibles intensités des conditions hydrauliques dans la retenue qui provoquent la désorientation des poissons, une vitesse du fluide minimale d'environ 20 cm/s dans le réservoir était nécessaire pour guider les smolts vers le FPS. Dans la dernière partie de la thèse, basée sur le modèle CFD et l'analyse du comportement des smolts, nous développons un modèle stochastique pour prédire leur déplacement à l'approche d'un exutoire de dévalaison en fonction des conditions hydrauliques. Nous proposons une approche bayésienne à espace d'état. La dynamique des smolts est connue pour être partiellement expliquée par leur état comportemental de nage (par

exemple, passif, endurance, sprint). Pour modéliser l'état comportemental de la nage des smolts, nous avons utilisé un modèle de régression de Bézier avec l'intensité de la vitesse du fluide comme covariable. Les paramètres du processus de mouvement (vitesse du poisson et angles de rotation) sont définis de manière conditionnelle en fonction des états comportementaux et d'un modèle physique. Le couplage du modèle CFD et d'un modèle de mouvement des smolts est un outil utile pour l'ingénierie écologique. Il augmentera l'attractivité des FPS en testant plusieurs configurations en amont des barrages.

Mots clés : *Dévalaison ; Salmo salar ; Comportement des poissons ; Dynamique des fluides computationnelle ; Solutions de franchissement des poissons ; Modélisation bayésienne.*

Abstract

Modeling Atlantic juvenile salmon behavior approaching downstream migration passage facility

Ecosystem fragmentation is a major threat to biodiversity and one of the main challenges for the conservation and restoration of aquatic environments. In aquatic ecosystems, human-induced longitudinal barriers, such as dams, are partly responsible for the decline in fish populations. The impact is even greater on diadromous species with life cycles spanning marine and freshwater ecosystems. One of the most common means of restoring the continuity of watercourses is fish passage solutions (FPS), with variable effectiveness. The development of effective fish passage depends on understanding the behavioral response to hydraulic conditions that may attract or repel fishes. While much attention has been paid to upstream passage solutions, knowledge is still lacking, especially for downstream passage. Most studies have focused on large dam structures with high powerhouse discharge. Yet, less studies have been conducted on dams with large reservoirs and low powerhouse discharges, despite these sites' higher prevalence for relatively quiescent flows known to disorient fish.

In this thesis, based on scientific knowledge and our results, we propose a new numerical tool for modeling the behavior of juvenile Atlantic salmon (known as smolt) during their downstream migration upstream of the Poutès dam (Allier, France). This tool aims at providing a new framework for the design of FPS.

We first develop a three-dimensional computational fluid dynamic (CFD) model of the reservoir upstream of Poutès dam to better understand the flow field conditions that affect smolts downstream migration, where hydraulic conditions are particularly very low. From CFD model and telemetry data, we then analyze the effect of hydraulic conditions on smolt behavior in a large reservoir upstream of the hydropower plant. Measured fish positions and CFD simulations were used to characterize smolt's swimming behavior using fish thrust force, swimming orientation and direction. Thrust force was estimated by solving Newton's second law. The study of fish displacements in relation to flow conditions provided new insights with the use of thrust force, swimming orientation and direction as means to characterize smolt behavior, which can help in the design of downstream migration passage facilities. Our results showed that despite very low hydraulic conditions intensities in the reservoir that cause fish disorientation, a minimal time-average flow velocity of about 20 cm/s in the reservoir was needed to guide smolts to the FPS. These results can be used to assess the impact of operational and/or structural modifications on fish attraction or dissuasion. In the last part of the thesis, based on the CFD model and smolt's behavior analysis, we develop a stochastic model to predict smolt displacement approaching a bypass in relation to hydraulic conditions. We propose a Bayesian state-space approach. The dynamic of smolt is known to be partially explained

by fish swimming behavior state (e.g. passive, endurance, burst). To model fish swimming behavioral state, we used a Bezier regression model with flow velocity intensity as covariates. The parameters of the movement process (fish speed and turning angles) are defined conditionally upon the behavioral states and a physical model. The coupling of CFD model and a smolt movement model is a useful tool for ecological engineering. It will increase the attractivity of FPS by testing several configurations upstream of dams.

Keywords : *Downstream migration ; Salmo salar ; Fish behavior ; Computational fluid dynamics ; fish passage solutions ; Bayesian modelling.*

Table des matières

1	Introduction générale	19
1.1	Problématique de l'étude et enjeux opérationnels	19
1.2	Dévalaison : comportement de nage des smolts en milieu naturel et facteurs déclencheurs	20
1.3	Obstacles et conséquences sur la dévalaison	21
1.4	Restauration de la continuité écologique	22
1.5	Ecologie du mouvement : outil de compréhension des mécanismes de la dévalaison . .	23
1.6	Comportement de dévalaison des smolts en amont d'un ouvrage anthropique	24
1.7	Méthodes d'études	25
1.7.1	Couplage télémétrie et modèles hydrauliques	25
1.7.2	Modélisation du comportement de nage	27
1.8	Objectifs et structure de la thèse	28
2	Matériel et développement méthodologique	31
2.1	Site d'étude : l'aménagement hydroélectrique de Poutès-Monistrol	32
2.2	Données de télémétrie acoustique	36
2.3	Conditions hydrologiques pendant les suivis	38
2.4	Modèle hydraulique tridimensionnel (CFD)	39
2.5	Couplage entre le modèle CFD et la télémétrie	42
2.5.1	Méthode physique : loi de la dynamique de Newton	42

2.5.2	Méthodes statistiques	44
2.6	Modélisation du comportement de nage	45
3	Modélisation hydrodynamique 3D des écoulements à petite échelle pour la dévalaison des smolts dans une retenue de barrage (duplication directe du papier en préparation)	49
3.1	Préambule	50
3.2	Introduction	52
3.3	Mathematical model	53
3.4	Numerical model	54
3.4.1	Features of model domain	54
3.4.2	Description of computational mesh	55
3.4.3	Boundary conditions	56
3.4.4	Simulation conditions	57
3.4.5	Available field data for the validation of the model	57
3.5	Results and discussion	58
3.5.1	Validation of the model	58
3.5.2	Analyses of forebay hydrodynamics	60
3.6	Conclusion	63
4	Analyse exploratoire du comportement des saumons atlantiques juvéniles en fonction des conditions hydrauliques (duplication directe du papier Ben Jebria et al., 2021-Journal of Ecohydraulics)	65
4.1	Préambule	66
4.2	Introduction	68
4.3	Materials and methods	69
4.3.1	General approach	69
4.3.2	Study area	70

4.3.3	Fish telemetry	71
4.3.4	CFD modeling	71
4.3.5	Validation of simulated hydraulics	73
4.3.6	Fish navigation and propulsion force estimation	73
4.3.7	Influence of hydraulic conditions on fish behavior and corresponding navigation	74
4.3.8	Data analysis	75
4.4	Results	76
4.4.1	CFD simulations combined with smolt trajectories at Poutès	76
4.4.2	How do smolt behave depending on hydraulic conditions intensities?	77
4.4.3	How do hydraulic conditions influence smolt's behavior?	78
4.4.4	How do smolt orient themselves according to their swimming behavior?	78
4.5	Discussion	79
4.5.1	Influence of flow velocity, flow acceleration and TKE on smolt behavior	79
4.5.2	Limitations and perspectives	80
4.6	Conclusion	81
5	Modélisation bayésienne du comportement de nage des smolts dans une retenue de barrage (duplication directe du papier en préparation)	85
5.1	Préambule	86
5.2	Introduction	89
5.3	Material and Methods	91
5.3.1	A biomechanically-inspired model of true and observed fish positions	91
5.3.2	Statistical inference	98
5.4	Experiments	103
5.4.1	Motivating case study	103
5.4.2	Qualitative model prevalidation	104

5.4.3	Simulation-based study	110
5.4.4	Experiments on the real dataset	111
5.5	Discussion	117
5.6	Appendix	120
5.6.1	Managing boundary situations	120
5.6.2	On the use of logistic regression	121
5.6.3	The Fréchet distance between discretized trajectories	122
5.6.4	Measurement noise calibration	123
5.6.5	Calibrating the random features of swimming direction angle	125
6	Discussion générale	127
7	Conclusions générales	137
8	Perspectives scientifiques	139
	Bibliographie	141

Table des figures

1.1	Le cycle biologique du saumon atlantique avec les différents stades de développement (J.O. Penanen, Fédération du saumon atlantique).	20
1.2	Schéma de la ligne latérale. La ligne latérale est composée de neuromastes superficiels se trouvant à la surface de la peau et de canaux de neuromastes qui sont placés juste sous la peau. Les neuromastes superficiels permettent de déterminer la présence et l'ampleur de la déflexion causée par le mouvement dans l'eau environnante. Les neuromastes du canal permettent une mécanoréception plus sophistiquée, comme la détection des différences de pression. Lorsque le courant traverse les pores d'un canal, une différence de pression se crée sur les pores (Windsor and McHenry, 2009; Astreinidi Blandin et al., 2018).	24
2.1	Evolution des rivières à saumons en France du XVIIème siècle à nos jours. Source : notre-planète.info	32
2.2	Zone d'étude de la migration des smolts : (a) localisation de la rivière Allier en France, (b) localisation de la zone du barrage de Poutès sur la rivière Allier, (c) zoom sur le barrage et la zone de simulation. Les croix indiquent les emplacements des hydrophones en 2017 (Tétard et al., 2021).	33
2.3	Vue aérienne sur le barrage de Poutès (Tetard et al., 2016).	34
2.4	Passe à ralentisseurs à l'aval et structure de l'ascenseur vue de l'amont avec sa goulotte de transfert (Tetard et al., 2016).	34
2.5	Vue de côté, de face et aval sur l'exutoire de dévalaison de Poutès (Tetard et al., 2016).	35
2.6	Vue aval du barrage de Poutès : avant/après. Source : https://www.nouveau-poutes.fr/	36
2.7	Schéma du fonctionnement de la télémétrie acoustique 2D (Roy et al., 2014)	37
2.8	Installation des hydrophones sur leur ancrage béton. A droite, zoom sur l'hydrophone en place sur le mât en PVC (Tetard et al., 2016).	37
2.9	Schéma de la zone d'étude et du dispositif installé en 2017 (Tetard et al., 2016).	38

2.10	Vue amont de la prise d'eau, de l'exutoire de dévalaison (non fonctionnel) et de l'exutoire de dévalaison temporaire (Tétard et al., 2021).	39
2.11	Schéma synthétique des différentes étapes du développement du modèle CFD	41
2.12	Forces appliquées sur le smolt : force de poussée $\vec{F}_T$ et force de traînée $\vec{F}_D$. Et $\vec{V}_f$ indique la vitesse du fluide.	42
2.13	Schéma synthétique du calcul des composantes de la poussée du poisson à chaque position mesurée du smolt (inspiré d'Arenas et al. 2015).	43
2.14	Schéma conceptuel de l'approche utilisée dans la thèse.	47
3.1	Study area of smolt migration : (a) location of the Allier River in France, (b) location of Poutès dam zone on the Allier River, (c) zoom on the dam and simulation zone. And upstream view of Poutès intake zone with usual (non functional at the water level of this numerical study) and temporary bypasses.	54
3.2	a) Bathymetry in the model domain. The model domain from the face of the dam to the river side is approximately 200 m long. b) The computational mesh of the complete model domain.	56
3.3	View of Poutès dam and field measurement locations (with ADCP transects). . . .	57
3.4	Mean velocity field of the four transects upstream of the dam. On site measurements are on top and the numerical results of the non refined and refined meshes at the bottom. The colours represent the magnitude of the longitudinal velocity in cm/s. . .	59
3.5	Spatial variations of flow velocity at 10,77 m elevation, flow velocity with streamlines and flow velocity intensity at three vertical transverse cross-section : (a) transverse cross-section near the turbine intake, (b) transverse cross-section near the fish bypass, and (c) approximately 80m upstream of the dam.	61
3.6	Spatial variations of flow acceleration at 10,77 m elevation, and flow acceleration intensity at three vertical transverse cross-section : (a) transverse cross-section near the turbine intake, (b) transverse cross-section near the fish bypass, and (c) approximately 80m upstream of the dam.	62
3.7	Spatial variations of TKE at 10,77 m elevation, and TKE at three vertical transverse cross-section : (a) transverse cross-section near the turbine intake, (b) transverse cross-section near the fish bypass, and (c) approximately 80m upstream of the dam. . . .	62
4.1	Study area of smolt migration : (a) location of the Allier River in France, (b) location of Poutès dam zone on the Allier River, (c) zoom on the dam and simulation zone. The crosses indicate hydrophone locations in 2017 (Tétard et al. (2021)).	70

4.2	Smolt swim orientation and direction. Orientation is characterized by angle β between time-average flow velocity ($\vec{u}_f$) and fish thrust ($\vec{F}_T$) vectors. Direction is characterized by angle θ between time-average flow velocity ($\vec{u}_f$) and fish velocity with respect to the ground ($\vec{u}_g$). Relative direction is characterized by the angle γ between fish thrust ($\vec{F}_T$) and fish velocity with respect to the flow ($\vec{u}_s$).	75
4.3	Five numerical simulations (time-average velocity for a water depth of 11 m for numerical simulation 1, 2 and 3 and 15.7 m for numerical simulation 4 and 5) combined with smolt trajectories at Poutès. The succession of a fish position through time allows the reconstruction of trajectories. The different colors for the fish positions correspond to different smolt's trajectory. Model input values (water level and discharges) of each numerical simulation are listed in table 4.1.	77
4.4	Influence of hydraulic condition intensities on smolt swimming orientation β and thrust force (a), and influence of hydraulic condition intensities on swimming direction θ (b). In each figure, the smolt position corresponds to median orientation. The purple arrow corresponds to the intensity of the fish thrust force (scale : 0.94 cm $\leftrightarrow$ 10^{-3} N). Figures 4.4a and 4.4b represents how very low (1), low (2), medium(3) and high (4) hydraulic condition intensities influenced swimming orientation, direction and thrust force.	83
4.5	Influence of hydraulic condition intensities on relative swimming direction γ . The purple arrow corresponds to the intensity of the fish thrust force (scale : 0.94 cm $\leftrightarrow$ 10^{-3} N). The red arrow corresponds to the intensity of the fish velocity with respect to the flow (scale : 0.94 cm $\leftrightarrow$ 10^{-1} m/s).	84
4.6	Smolt swimming orientation β (left) and direction θ (right) according to behavioral state and hydraulic condition intensity. Fish swimming orientation in relation to flow direction enabled to know if smolt had their head oriented upstream or downstream. And, fish swimming direction determined how far fish followed the direction of the flow.	84
5.1	Configuration of meshed Poutès dam, according to a system of coordinates (this coordinate system is based on the Universal Transverse Mercator (UTM) projection, on the UTM31 North zone). Fish enter the domain of study from the upstream section inlet (bottom, blue curve) and their moves are limited by banks (black curves). It leaves the domain of study by the intake or the bypass (top, blue curves), or possibly by the inlet (turning back).	92
5.2	Prior guesses obtained from Ben Jebria et al. 2021; Arenas et al. 2015 about the probability of smolt's behavioral state in relation to fluid velocity intensity ($\ V_f\ $ in m/s), in the case of Poutès study.	96
5.3	Two illustrations of Bézier regression for the three latent state probabilities, for several random parameters β . The control points for the probabilities related to states C_1 and C_3 are plotted in solid triangles and rectangles, respectively. They define a convex hull for the probability curves.	97
5.4	Illustration of the need for a "bias-path length" trade-off similar to a "bias-variance" trade-off.	101

5.5	Smolt observed trajectories at Poutès. The succession of a fish position through time allows the reconstruction of trajectories. The different colors for the fish positions correspond to different smolt's trajectories.	104
5.6	Prior ranges of variation for the probability curves of being in state C_1 (black), C_2 (blue) and C_3 (red) in function of the water velocity.	106
5.7	Some examples of truly observed (solid arrows) and simulated trajectories from random input parameters following the prior distribution.	107
5.8	Simulation of 2D fish displacements within a channel submitted to high to moderate values of flow velocity (uniform on the $-$ axis, values provided in m/s on level lines). Numbers indicate the most probable swimming states.	109
5.9	Simulation of 2D fish displacements within a channel submitted to moderate to small values of flow velocity (uniform on the $-$ axis). Numbers indicate the most probable swimming states. The total simulation time is the same than for the example plotted on Figure 5.8.	109
5.10	Simulation of 2D fish displacements within a channel submitted to very small values of water velocity (uniform on the $-$ axis, values provided in m/s on level lines). Numbers indicate the most probable swimming states. The total simulation time is the same than for the example plotted on Figures 5.8 and 5.8.	109
5.11	Distribution per simulated fish of the distribution of the Fréchet distance due to the effect of measurement noise.	110
5.12	Observed (green arrows) and randomly simulated trajectories (colored points) for fish # 11.	111
5.13	Simulated distribution of discrepancy (5.12) after six steps of kernel-based resampling. The limit value $\varepsilon = 201.5$ for the discrepancy is plotted as a dotted red line.	112
5.14	Approximate posterior trajectories of state probabilities.	112
5.15	Approximate posterior probability $P(\text{State } C_2 > \text{State } C_3)$ (regime shift) for low flow velocities (plotted with 95% credibility area).	113
5.16	Prior and approximate posterior densities for the uncertain parameters (1/3).	114
5.17	Prior and approximate posterior densities for the uncertain parameters (2/3).	115
5.18	Prior and approximate posterior densities for the uncertain parameters (3/3).	116
5.20	Illustration of the swimming behavior of smolts near the banks of the Poutès reservoir.	120

5.19	Illustration of a simulated fish hitting a bank. We draw the collision line (dotdashed red line), then we generate the "bounce" line (solid blue line) that we shift to the current position. The new proposed position is located on this line, indicated by a square.	121
5.21	Illustration of the Fréchet distance between two polygonal trajectories (Took from (Guo et al., 2017)).	122
5.22	Representation of the real position of the transmitter in red and the measured positions in black to evaluate the noise of the telemetry measurements at Poutès reservoir.	123
5.23	Histogram of the distribution of the positioning error.	124
5.24	Distribution per observed fish of the distribution of the Fréchet distance due to the effect of measurement noise.	124
5.25	Smolt swimming orientation according to behavioral state and hydraulic condition intensity (Ben Jebria et al., 2021).	125

Liste des tableaux

2.1	Simulations numériques estimant les conditions hydrauliques rencontrées par les smolts et le nombre de smolts et de positions de smolts observés.	41
3.1	Operational conditions used for the validation case.	57
3.2	Data summary and results used to assess the level of agreement between simulated mean flow velocity for the no refined mesh and the refined (Code_Saturne) with the measures mean flow velocity from ADCP. n -number of observations; r -correlation coefficient; $BIAS$ -Average bias; $RMSE$ -Root mean square error.	59
4.1	Numerical simulations estimating hydraulic conditions encountered by smolts, and the number of smolts and smolt's positions observed	72
4.2	Ranges of hydraulic conditions intensities obtained by hierarchical clustering on principal components.	76
4.3	Proportion of the three swimming behaviors at Poutès dam for the different hydraulic conditions intensities (χ^2 test, $\chi^2 = 88.171$, p-value < 0.001).	77
5.1	Table of known parameters. FTF means <i>Fish thrust force</i>	92
5.2	Notations and meanings for the fish swimming behaviors.	94
5.3	Distribution of mean μ_t and scale parameter ρ_t of fish swimming orientation angle in relation with the fish behaviorale state.	95
5.4	Prior distributions chosen for uncertain parameters for the Poutès case study. $\mathcal{U}$ means the uniform distribution and $\mathcal{D}_{ir}$ means the Dirichlet distribution. Five control points are used for defining the curve of the probabilities related to states C_1 and C_3 , respectively. Abcissas of limit Bézier control points are deterministic given the uncertain parameters ($v_{1,1} = v_{3,1} = 0$, $v_{1,5} = v_{3,5} = v_{\text{sup}}$ and $p_{1,5} = 0$ and $p_{3,5} = 1$). Note that $p_{2,1} = 1 - p_{1,1} - p_{3,1}$ is useless and not used in the prior sampling task, the Dirichlet sampling being only used to ensure the correct summation of these initial prior probabilities.	105

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Problématique de l'étude et enjeux opérationnels

La fragmentation des écosystèmes constitue une menace majeure pour la biodiversité; et les mesures d'évitement et/ou de réduction représentent l'un des principaux défis pour la conservation et la restauration des écosystèmes aquatiques (Malmqvist and Rundle, 2002; Strayer and Dudgeon, 2010; Neeson et al., 2015). La construction de seuils et de barrages dans les cours d'eau est une des causes du déclin des populations de poissons migrateurs (Ransom et al., 1996; Limburg and Waldman, 2009), aboutissant à la forte diminution de certains stocks ou au confinement de populations à des zones restreintes, potentiellement sous-optimales, des bassins-versants (Porcher and Travade, 1992; Kondolf, 1997; Coutant and Whitney, 2000; Larinier, 2001; Fukushima et al., 2007). L'impact est encore plus important sur les espèces diadromes qui partagent leur cycle de vie entre les écosystèmes marins et d'eau douce (MacCrimmon and Gots, 1979; Baglinière et al., 1990; Larinier, 2001; Steinbach, 2001). Jusqu'à présent la plupart des études traitant cette problématique se sont intéressées essentiellement à la montaison des poissons migrateurs (Webb et al., 1984; Roscoe et al., 2011; Noonan et al., 2012), alors que la dévalaison reste peu abordée (Silva et al., 2018).

La plupart des poissons diadromes sont considérés comme des espèces menacées ou proches d'extinction (Baglinière et al., 2003; Lackey, 2009; Limburg and Waldman, 2009). Face à cette menace, de nombreuses mesures de protection ont été prises à l'échelle nationale et internationale. Les législations européenne (la Directive Cadre sur l'Eau (DCE)), nationale (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques, LEMA de 2006), la loi Grenelle 2 (2009) et le Code de l'Environnement (Article L214-17, 2006), imposent la libre circulation des espèces dans les milieux aquatiques et le rétablissement de la continuité écologique. Pour EDF, principal exploitant de centrales hydroélectriques à travers toute la France, la continuité écologique des milieux aquatiques constitue un enjeu majeur dans ces engagements vis-à-vis de la biodiversité et de la restauration écologique des milieux. En effet, depuis des décennies, EDF œuvre au développement de méthodes d'atténuation des impacts de ses installations pour restaurer au mieux la libre circulation des poissons et assurer de nouveau la continuité écologique. Aujourd'hui EDF gère un grand nombre d'ouvrages de franchissement sur l'ensemble de son parc de production et plusieurs autres (nouveaux projet et modifications des structures existantes) sont prévues dans les prochaines années.

1.2 Dévalaison : comportement de nage des smolts en milieu naturel et facteurs déclencheurs

A l'image des poissons amphihalins, les stocks du saumon atlantique ont subi un déclin de ses populations depuis le milieu des années 1930 (Mills, 1991; Cohendet, 1993; Ransom et al., 1996; Limburg and Waldman, 2009). Le saumon atlantique (*Salmo salar* L.) est une espèce migratrice diadrome anadrome, qui réalise des migrations entre les eaux douces et le milieu marin au cours de sa vie. Les stades juvéniles s'effectuent en eau douce et les stades adultes se déroulent principalement en mer, les adultes revenant en eau douce pour frayer (Figure 1.1 ; Bardonnnet and Baglinière 2000).

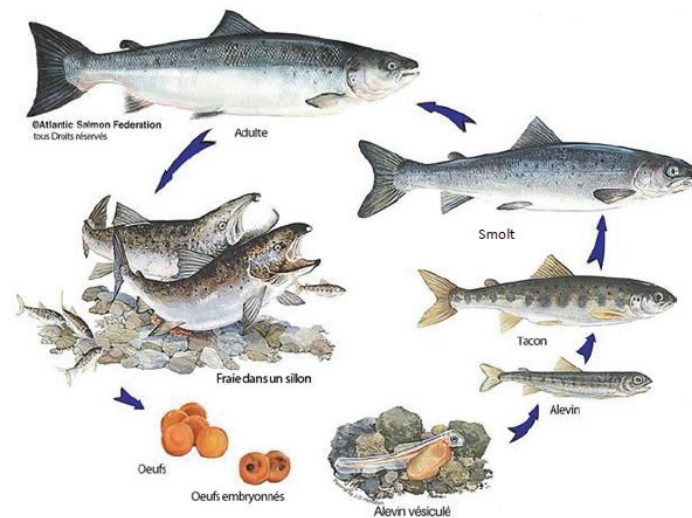


FIGURE 1.1 – Le cycle biologique du saumon atlantique avec les différents stades de développement (J.O. Penanen, Fédération du saumon atlantique).

La migration des saumons juvéniles des eaux douces vers la mer est appelée dévalaison. Suivant la latitude, la dévalaison vers la mer débute à des périodes différentes de l'année (Martin et al., 2012; Jonsson and Jonsson, 2014). Celle-ci s'initie vers mars-avril en France (Boeuf, 1993). Plusieurs déclencheurs environnementaux de la dévalaison des smolts ont été identifiés dans la littérature, notamment la photopériode, la température et le débit (Fry, 1971; Jonsson and Ruud-Hansen, 1985; McCormick, 1998; Thorstad et al., 2012).

Au cours de la dévalaison, le taux de survie dépend essentiellement de deux fenêtres temporelles qui doivent être synchrones pour que l'acclimatation des smolts se déroule avec succès (McCormick, 1998). On distingue une fenêtre physiologique correspondant à une période limitée à quelques semaines (McCormick, 1998) où les smolts sont en bonne condition physiologique pour changer de milieu de vie et entrer dans l'océan avec succès. Une deuxième fenêtre environnementale correspond à une période où les conditions environnementales sont les plus favorables à l'entrée des smolts en mer (température, oxygène dissous, prédation, pollution...).

Pendant la migration printanière des smolts (de mars à juin), les poissons subissent d'importants changements comportementaux, morphologiques et physiologiques pour s'adapter aux conditions marines (McCormick, 1998). Les smolts s'agrègent progressivement en bancs et s'orientent en rhéotaxie négative avant de commencer leur migration vers l'aval (Davidsen et al., 2005; Martin et al.,

2012). En début de saison, la migration a majoritairement lieu au crépuscule et la nuit (Scruton et al., 2007, 2008; Fjeldstad et al., 2012; Riley et al., 2012; Ovidio et al., 2017). Mais en fin de saison, avec l'augmentation de l'activité migratoire, la réactivité à la lumière change, les smolts ont tendance à migrer aussi bien le jour que la nuit (Moore et al., 1995; Ibbotson et al., 2006; Tétard et al., 2019). Il apparaît que la dévalaison est généralement active (Davidsen et al., 2005; Thorstad et al., 2012; Martin et al., 2012), éventuellement en combinaison avec une nage plus passive lorsque le débit est élevé (Tytler et al., 1978; Thorstad et al., 2012). Les smolts suivent en général la veine principale du courant (Scruton et al., 2007; Brevé et al., 2014) et ont tendance à nager à la surface de l'eau (Coutant and Whitney, 2000; Scruton et al., 2002; Gao et al., 2016).

1.3 Obstacles et conséquences sur la dévalaison

L'un des obstacles majeurs à la dévalaison de smolts est la construction de centrales hydroélectriques dans la majorité de l'aire de répartition et de reproduction de l'espèce (Petts, 1984; Jager et al., 2001; Limburg et al., 2003; Brown et al., 2013). Il est admis que l'effet d'une centrale hydroélectrique isolée peut ne pas avoir d'impact significatif sur la dévalaison du smolt (Coutant and Whitney, 2000; Scruton et al., 2008). Cependant, c'est l'impact cumulé de l'ensemble des obstacles rencontrés qui peut induire un retard considérable de la dévalaison avec un décalage de la fenêtre de migration (Marschall et al., 2011), ainsi que la création de retenues à l'amont des barrages (McCormick, 1998; Marschall et al., 2011; Tétard et al., 2021; Ben Jebria et al., 2021). La conséquence est une "démoltification" précoce avec la perte des capacités d'adaptation physiologique au passage en eau de mer (McCormick and Saunders, 1987; McCormick, 1998; Coutant and Whitney, 2000; Steinbach, 2001; Monnerjahn, 2011; Nyqvist et al., 2017a).

En effet, l'aménagement de tels obstacles modifie considérablement le milieu, aboutissant à la création de grandes retenues et le passage des smolts dans les déversoirs ou les turbines. La création de grandes retenues affecte le débit des cours d'eau, engendrant très peu de variations spatiales des conditions hydrauliques à l'amont des barrages (Coutant and Whitney, 2000; Ben Jebria et al., 2021; Tétard et al., 2021). Cela induit une désorientation des poissons (Ovidio et al., 2016, 2017), amenant à des retards dans la migration (McCormick, 1998; Marschall et al., 2011) voire à une augmentation de la prédation par les oiseaux ou les poissons carnassiers (Larinier, 2001).

Par ailleurs, en amont d'un barrage, le smolt va rechercher une voie de passage afin de poursuivre sa dévalaison. Or plusieurs voies de passage s'offrent à lui : les turbines, les déversoirs ou l'exutoire de dévalaison. Le passage dans les turbines ou les déversoirs peut causer des blessures directes ou indirectes et la mortalité des poissons (Larinier, 2001; Baras and Lucas, 2001; Thorstad et al., 2008; Limburg and Waldman, 2009; Bunt et al., 2012). Lors du franchissement d'un déversoir, la survie du smolt varie en fonction de la hauteur de la chute et de l'intensité de la turbulence au pied des déversoirs (Larinier, 2001; Larinier and Travade, 2002; Brevé et al., 2014). Selon le type de turbines hydrauliques, des accélérations et décélérations brutales de l'écoulement et de la pression peuvent se produire engendrant ainsi des risques de chocs et de blessures pour les smolts (i.e. : barotraumatisme, exophtalmie, hémorragie, embolie... ; Travade et al. 1998; Larinier 2001; Larinier and Travade 2002; Larinier and Couret 2008; Fu et al. 2016). Ainsi, après le passage par les turbines, les smolts sont soit morts, blessés, stressés ou désorientés et donc vulnérables à la prédation (Järvi, 1989; Haro et al., 1998; McCormick, 1998; Coutant and Whitney, 2000; Larinier, 2001; Stich et al., 2014).

1.4 Restauration de la continuité écologique

La restauration de la continuité des cours d'eau passe bien souvent par la construction de dispositifs visant à faciliter le franchissement de ces obstacles par les poissons migrateurs. Il existe donc une mise en place de voies alternatives avec la conception d'exutoires de dévalaison et de systèmes de guidage tels que les barrières physiques et comportementales afin de guider et d'améliorer le franchissement des ouvrages (Coutant and Whitney, 2000; Larinier and Couret, 2008; Svendsen et al., 2011).

Afin d'empêcher l'entraînement des poissons vers les turbines, l'installation de grilles inclinées suffisamment fines par rapport à la taille du poisson (espacement entre les grilles inférieur à 3 cm pour les smolts), positionnées en amont des turbines et à proximité d'un exutoire de dévalaison constitue une des barrières physiques les plus fréquentes. D'autre part, la vitesse du fluide devant les grilles doit être suffisamment faible pour éviter un placage contre les grilles et permettre au smolt de nager vers l'exutoire de dévalaison (vitesse du fluide inférieure à 30 cm/s pour les smolts; Larinier et al. 1994; Larinier and Couret 2008; Katopodis and Williams 2012; Tomanova et al. 2017).

Ces barrières physiques peuvent être associées à des barrières comportementales afin d'attirer ou repousser le smolt vers une voie alternative en agissant sur les stimuli influençant son comportement de nage. Il existe diverses barrières comme les écrans à bulles, de lumière, de sons, électriques ou hydrodynamiques (« floating louver »). Contrairement aux barrières physiques, elles sont peu efficaces seules (Travade and Larinier, 1992; Travade et al., 1998). Les écrans lumineux et hydrodynamiques ont montré une certaine efficacité pour attirer (Tétard et al., 2019), guider ou repousser les smolts vers l'exutoire de dévalaison (Hocutt and Edinger, 1980; Scruton et al., 2002). Afin d'assurer la dévalaison des smolts, il est nécessaire de disposer d'un ou de plusieurs exutoires de dévalaison. Pour le smolt, un exutoire de dévalaison est plus efficace la nuit (Scruton et al., 2002; Fjeldstad et al., 2014) et lorsqu'il présente un débit de fonctionnement élevé (débit minimal de 0.5 m³/s) et doit correspondre à 5 à 10 % du débit turbiné (Larinier, 2001; Scruton et al., 2008; Fjeldstad et al., 2012; Nyqvist et al., 2017b; Thorstad et al., 2017), une absence de turbulence, une vitesse de courant supérieure à la vitesse de nage des smolts et une accélération du fluide progressive avec une vitesse dans l'exutoire 1,4 fois supérieure à la vitesse d'approche (Travade and Larinier, 1992). De plus, la présence d'une lampe à mercure à l'entrée de l'exutoire pendant la nuit (Fjeldstad et al., 2012; Ovidio et al., 2017; Tétard et al., 2019) et d'un floating louver (Hocutt and Edinger, 1980; Ruggles et al., 1993) améliore son attractivité. Par ailleurs, la mise en place de turbines ichtyocompatibles comme les turbines Alden ou VLH permet d'éviter de blesser ou tuer les poissons; cela, grâce à l'espace plus important entre les pales, leur faible vitesse de rotation et l'absence de variations brutales de pression et de vitesse (Coutant and Whitney, 2000; Larinier and Travade, 2002).

Bien qu'il y ait des avancées sur ces moyens mis en œuvre pour faciliter la dévalaison des poissons, la faible efficacité des installations de passage (68,5 % d'efficacité; Noonan et al. 2012) indique que la plupart d'entre elles doivent être améliorées pour atténuer la fragmentation de l'habitat des poissons (Roscoe et al., 2011; Noonan et al., 2012; Silva et al., 2018).

L'efficacité de ces dispositifs de franchissement est dépendant de la configuration générale et de l'hydrodynamique de chaque site (Larinier, 2001; Silva et al., 2018). Afin d'améliorer ces dispositifs, il convient de les optimiser pour les rendre plus attractifs pour les espèces ciblées. Ainsi, il est primordial de comprendre le mécanisme d'orientation et la capacité de nage des poissons ciblés dans des champs hydrauliques complexes tels qu'on en trouve à l'approche des ouvrages de franchissement (Larinier, 2001; Enders et al., 2003; Katopodis and Aadland, 2006; Nathan et al., 2008).

1.5 Ecologie du mouvement : outil de compréhension des mécanismes de la dévalaison

Le cadre de l'écologie du mouvement semble être un moyen approprié d'étudier l'impact des obstacles sur la migration (Nathan et al., 2008). L'écologie du mouvement est un champ de l'écologie comportementale qui vise à comprendre le déplacement des animaux, en cherchant à explorer comment celui-ci résulte de l'interaction entre les capacités de mouvement, les capacités d'orientation, l'état interne des individus et les conditions environnementales (Nathan et al., 2008).

La capacité de mouvement d'un individu découle des propriétés biomécaniques permettant aux poissons de nager (Nathan et al., 2008). Les vitesses de nage des poissons sont classées en trois catégories comportementales : sprint, soutenue ou passive. Le comportement de nage en sprint correspond aux vitesses les plus élevées que les poissons peuvent atteindre sur de très courtes périodes (inférieures à 20 s) et engagent les fibres musculaires anaérobies (Beamish, 1978; Webb and Weihs, 1983; Katopodis and Aadland, 2006; Mu et al., 2019). Les poissons se trouvent en comportement de nage de sprint pour capturer des proies, éviter les prédateurs, ou négocier des vitesses d'eau élevées (Mu et al., 2019). Le comportement de nage soutenue correspond à des vitesses faibles que les poissons peuvent maintenir pendant une longue période sans fatigue (temps supérieurs à 200 min), et qui utilisent principalement des fibres musculaires aérobies. Ce processus aérobie se traduit par une faible production d'énergie pour la nage de longue endurance (Beamish, 1978; Webb and Weihs, 1983; Mu et al., 2019). Les poissons ont un comportement de nage soutenue pour les activités de routine, la recherche de nourriture, le maintien et la formation de bancs (Katopodis and Aadland, 2006; Mu et al., 2019). Le comportement de nage passive correspond à une vitesse presque nulle de déplacement du poisson par rapport au fluide, où les poissons se déplacent passivement avec le courant (Tang and Wardle, 1992; Sonny et al., 2006; Arenas et al., 2015).

Il est important de comprendre la capacité de navigation, c'est-à-dire la direction et l'orientation de nage des smolts se déplaçant dans diverses conditions hydrauliques et leurs réponses aux obstacles et à divers stimuli artificiels ou naturels (Katopodis and Aadland, 2006; Nathan et al., 2008; Castro-Santos and Haro, 2005; Kemp, 2012; Williams et al., 2012). La capacité de navigation (« où se déplacer ? » (direction de nage) et « comment se positionner ? » (orientation de nage)) rend compte de la capacité à s'orienter dans l'espace, en choisissant où se déplacer (Nathan et al., 2008). Il est ainsi nécessaire de connaître quelles intensités des variables hydrauliques le poisson est capable de percevoir afin de donner des recommandations précises pour le guidage hydraulique des poissons (Larinier, 2001).

Leurs réactions d'évitement et de détection sont basées sur la capacité de nage et également sur leurs mécanismes sensoriels tels que l'ouïe, la vision ou d'autres organes sensoriels comme la ligne latérale (Figure 1.2). La ligne latérale est particulièrement utile aux poissons pour analyser les variations de pression du milieu et donc les sons, la vitesse de déplacement et les mouvements alentours, ainsi que pour compléter d'autres sens (par exemple la vision) dans l'identification et la localisation d'objets fixes ou en mouvement. L'oreille interne aide les poissons à percevoir le taux de changement de mouvement, ce qui est essentiel lorsque l'eau accélère ou décélère (Dijkgraaf, 1963; Kalmijn, 1989; Montgomery et al., 1997; Braun and Coombs, 2000; Coutant and Whitney, 2000; Montgomery et al., 2001; Bleckmann and Zelik, 2009; Mogdans, 2019).

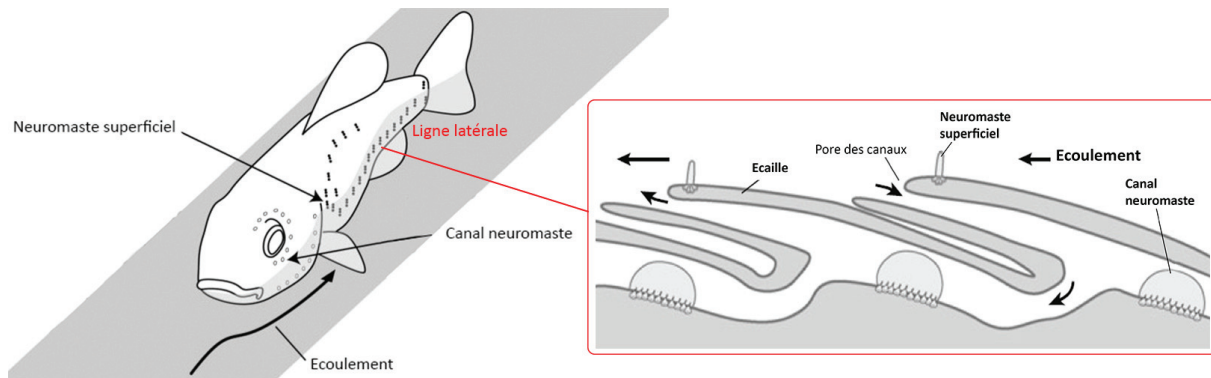


FIGURE 1.2 – Schéma de la ligne latérale. La ligne latérale est composée de neuromastes superficiels se trouvant à la surface de la peau et de canaux de neuromastes qui sont placés juste sous la peau. Les neuromastes superficiels permettent de déterminer la présence et l’ampleur de la déflexion causée par le mouvement dans l’eau environnante. Les neuromastes du canal permettent une mécanoréception plus sophistiquée, comme la détection des différences de pression. Lorsque le courant traverse les pores d’un canal, une différence de pression se crée sur les pores (Windsor and McHenry, 2009; Astreinidi Blandin et al., 2018).

1.6 Comportement de dévalaison des smolts en amont d’un ouvrage anthropique

Même si les études menées jusqu’à présent sur les poissons migrateurs tendaient en majorité à s’intéresser à la montaison, une grande partie de la compréhension du comportement des poissons a été générée par des études sur les poissons en dévalaison, en particulier les salmonidés, dans les installations hydroélectriques (Coutant and Whitney, 2000; Baras and Lucas, 2001; Marmulla, 2001). Au niveau de ces infrastructures, les facteurs hydrauliques sont souvent identifiés comme les paramètres dominants qui guident la navigation des espèces en dévalaison (Nestler et al., 2008; Goodwin et al., 2014). Pour les smolts qui entreprennent leur migration vers la mer, les changements des conditions hydrauliques, telles que la vitesse de l’eau, la turbulence et l’accélération, constituent les principaux facteurs de recherche de la voie de migration (Haro et al., 1998; Liao et al., 2003; Liao, 2007; Kemp et al., 2008; Tarrade et al., 2008; Enders et al., 2009; Johnson et al., 2009; Silva et al., 2011, 2012; Gao et al., 2016). Pour autant, connaître précisément les effets de ces différents facteurs sur le comportement de nage des smolts s’avère complexe, et en particulier en retenue où les conditions hydrauliques sont peu marquées.

Les études montrent que les smolts recherchent des conditions qui indiquent que leur parcours migratoire les maintiendra dans le courant principal d’une rivière, sans quoi ils risqueraient de se retrouver continuellement dans des zones défavorables et ainsi manquer la fenêtre optimale pour la migration (Faber et al., 2001; Liao, 2007; Evans et al., 2008; Williams et al., 2012). Ainsi, la voie naturelle pour eux suit généralement l’écoulement principal, qui les fait passer à travers les turbines, à moins que des écrans n’interceptent ce flux ou que d’autres voies d’écoulement puissent les attirer et assurer leur franchissement en évitant les turbines (Johnson et al., 2000; Johnson and Dauble, 2006; Williams et al., 2012). De plus, les smolts ont tendance à éviter les gradients de vitesse élevés (supérieurs à $2 \text{ m.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) et sont attirés vers un écoulement avec moins de turbulence et

une accélération plus faible (Haro et al., 1998; Kemp et al., 2005, 2008; Enders et al., 2009). Des recherches récentes ont démontré que les smolts nagent majoritairement de façon active afin d'éviter les conditions qu'ils considèrent inappropriées (Peake and McKinley, 1998; Castro-Santos and Haro, 2005; Kraabøl et al., 2008; Pedersen et al., 2008). Pour les smolts nageant dans le réservoir proche des turbines et des exutoires de dévalaison, où les vitesses d'écoulement et les intensités de turbulence sont plus élevées, les poissons peuvent être désorientés. Par conséquent, ils nagent plus rapidement pour s'écarter du courant et présentent une rhéotaxie positive (Haro et al., 1998; Johnson et al., 2000; Enders et al., 2003, 2009; Kemp et al., 2005, 2008; Silva et al., 2020). Si le smolt nage lentement dans le courant tout en se déplaçant vers l'aval, il peut augmenter la vitesse du battement de sa nageoire caudale pour ralentir son déplacement vers l'aval et éventuellement se déplacer vers l'amont pour éviter les zones de changement de vitesse (Coutant and Whitney, 2000, 2005). Par ailleurs, des recherches expérimentales en laboratoire ont montré qu'une vitesse chaotique avec de grandes fluctuations peut repousser les poissons, alors que les débits ayant une composante de prévisibilité peuvent attirer les poissons (Liao, 2007).

1.7 Méthodes d'études

1.7.1 Couplage télémétrie et modèles hydrauliques

L'écologie du mouvement a été révolutionnée par le développement de nouvelles méthodes de suivis individuels à haute résolution spatiale et temporelle telle que la télémétrie acoustique (Jonsen et al., 2003) et fournit des connaissances clés pour la conservation de la biodiversité (Nathan et al., 2008; Barton et al., 2015).

Les développements récents de la télémétrie et en particulier le suivi des trajectoires des poissons ont fourni des informations précieuses sur les voies de migration des poissons pendant la dévalaison et ont amélioré notre compréhension du comportement des poissons migrateurs à proximité des barrages (Baras and Lucas, 2001; Jansen et al., 2007; Katopodis and Aadland, 2006; Williams, 2008; Calles et al., 2010; Travade et al., 2010; Pedersen et al., 2012; Thorstad et al., 2012, 2017; Nyqvist et al., 2017b; Li et al., 2018).

La télémétrie a été utilisée pour évaluer et ajuster l'efficacité du guidage des poissons (Scruton et al., 2002; Calles et al., 2013; Havn et al., 2017). En effet, cet outil a permis de réaliser des études sur l'impact des centrales hydroélectriques sur la dévalaison des smolts (Jepsen et al., 1998; Aarestrup et al., 1999; Aarestrup and Koed, 2003; Brevé et al., 2014; Stich et al., 2014) et de tester l'efficacité de voies de passage alternatives mises en place (Scruton et al., 2008; Fjeldstad et al., 2014; Thorstad et al., 2017; Tomanova et al., 2017; Havn et al., 2017). Grâce à la télémétrie, il est ainsi possible de déterminer les taux de passage au niveau des ouvrages de franchissement, le comportement et la survie après le barrage, car l'identification individuelle à distance est possible à plusieurs endroits, avec une fine résolution temporelle (Castro-Santos et al., 2009; Cooke et al., 2012).

La combinaison de données de migration plus détaillées provenant d'études de télémétrie et de la modélisation numérique du champ d'écoulement à l'amont d'un barrage permettrait d'améliorer l'efficacité de la conception d'ouvrages de franchissement (Aarestrup et al., 1999; Moser et al., 2005; Johnson and Dauble, 2006; Burke and Jepsen, 2006; Keefer et al., 2008). En effet, l'élaboration de mesures d'atténuation et de protection efficaces dépend de la connaissance de l'influence des variables environnementales sur le comportement spatio-temporel des poissons (Béguier-Pon et al.,

2012; Caudill et al., 2013; Burnett et al., 2014; Thiem et al., 2016; Silva et al., 2018).

Grâce aux avancées des méthodes et de puissance de calcul, les modèles hydrauliques sont de plus en plus utilisés comme outils de modélisation de l'écoulement pour évaluer le champ d'écoulement en amont des barrages hydroélectriques. Cependant, il existe encore très peu de modèles hydrauliques développés pour analyser les écoulements en amont des barrages en raison de la complexité des géométries bathymétriques et des faibles conditions hydrauliques rencontrées dans les retenues (Khan et al., 2008; Ferrari et al., 2009). Le développement de ces modèles hydrauliques tridimensionnels a permis d'estimer les caractéristiques hydrauliques dans les réservoirs à l'amont des barrages et au niveau des ouvrages de franchissement (Meselhe and Odgaard, 1998; Meselhe et al., 2000; Khan et al., 2008; Ferrari et al., 2009). Ces modèles ont été également utilisés pour explorer les conditions hydrauliques pertinentes pour les espèces cibles dans un ouvrage de franchissement (Fuentes-Pérez et al., 2018) et pour évaluer le débit d'attraction d'une centrale hydroélectrique (Gisen et al., 2017).

Pour les ouvrages de franchissement, le couplage entre la télémétrie et des modèles hydrauliques concerne essentiellement des ouvrages de grandes dimensions, comme les usines hydroélectriques de la rivière Columbia aux États-Unis (Meselhe and Odgaard, 1998; Meselhe et al., 2000; Blank and Weber, 2000; Li et al., 2006; Khan et al., 2008; Ferrari et al., 2009). Ces études ont permis de caractériser le comportement de nage et d'orientation des smolts vis-à-vis des conditions hydrauliques à l'approche des ouvrages de franchissement (Haefner and Bowen, 2002; Scheibe and Richmond, 2002; Good, 2005; Goodwin et al., 2006; Lemasson et al., 2008; Nestler et al., 2008; Arenas et al., 2015). Ces études ont également permis de comprendre comment les variables hydrauliques influencent la navigation des smolts dans le réservoir du barrage (Johnson et al., 2000; Faber et al., 2001; Johnson and Dauble, 2006; Timko et al., 2007; Evans et al., 2008; Johnson et al., 2009; Steig and Johnston, 2010; Khan et al., 2012; Arenas et al., 2015; Silva et al., 2020).

Les résultats montrent que lorsque l'accélération du fluide et la vitesse du fluide augmentent, les smolts du Pacifique, les truites (Johnson et al., 2000, 2009; Faber et al., 2001; Evans et al., 2008; Enders et al., 2009; Vowles et al., 2014; Arenas et al., 2015)) et les smolts de l'Atlantique (Szabo-Meszaros et al., 2019; Silva et al., 2020) ont tendance à nager activement au lieu de dériver, à s'orienter contre le courant et à remonter le courant. De plus, l'effort fourni par les poissons pour résister à l'écoulement augmente. Cependant, au-delà d'un seuil donné (vitesse du fluide supérieure à 2 m/s et accélération du fluide d'environ 0.3 m/s^2) la tendance des poissons à nager à contre-courant diminue (Johnson et al., 2000, 2009). Pour des vitesses inférieures à 0.9 m/s, les smolts ne présentent pas d'orientation ni de direction de nage privilégiée (Faber et al., 2001; Evans et al., 2008). Pour de faibles intensités de l'énergie cinétique turbulente ($< 0.03 \text{ m}^2/\text{s}^2$), les smolts sont capables de maintenir leur stabilité et leur capacité de nage (Odeh et al., 2002; Silva et al., 2020).

Cependant, le couplage entre la télémétrie et la modélisation hydraulique tridimensionnelle pour obtenir des solutions efficaces de dévalaison reste encore peu exploré. La plupart de ces études se sont concentrées sur de grandes structures de barrage avec un fort débit, comme les centrales hydroélectriques du fleuve Columbia aux États-Unis (Haefner and Bowen, 2002; Scheibe and Richmond, 2002; Goodwin et al., 2006, 2014). En revanche, moins d'études ont été menées sur les barrages dotés de grands réservoirs et de faibles débits, malgré la prévalence plus élevée de ces sites avec des débits relativement faibles connus pour désorienter les poissons (Coutant and Whitney, 2000).

1.7.2 Modélisation du comportement de nage

L'analyse et la gestion de l'impact de la fragmentation des cours d'eau, ainsi que la planification de la restauration aquatique, nécessitent la disponibilité d'outils d'ingénierie simulant les mouvements complexes des poissons migrateurs (Goodwin et al., 2006; Scheibe and Richmond, 2002). Cependant, il existe peu d'outils capables de relier l'impact des champs hydrauliques à l'amont d'un barrage au comportement de mouvement des poissons (Tischendorf, 1997; Goodwin et al., 2014; Whoriskey et al., 2022). Les modèles mathématiques permettant de simuler les comportements de mouvement de poissons en dévalaison, en reliant les trajectoires des poissons aux modèles hydrauliques en termes d'éléments sensoriels et comportementaux des poissons restent un défi (Steel et al., 2001).

Récemment, une attention accrue a été accordée à la création de couplages entre les modèles hydrauliques et les modèles de comportement individuel des poissons, dans l'environnement océanique (Hinckley et al., 1996; Bourque et al., 1999) ainsi que dans l'environnement fluvial (Railsback et al., 1999; Anderson, 2000). Au cours des vingt dernières années, des outils permettant d'étudier, à une échelle spatio-temporelle fine, le comportement de certaines espèces de poissons migrateurs, comme la télémétrie (radio-pistage, télémétrie acoustique) ou l'imagerie acoustique (Vermard et al., 2010; Bez et al., 2011; Bergé et al., 2012; Joo et al., 2013), ont révolutionné l'écologie du comportement et du mouvement (Jonsen et al., 2003; Cagnacci et al., 2010).

Il est donc possible de construire des modèles de comportement pour certaines espèces, en particulier le saumon, à partir de suivis in situ. Par exemple, les modèles individuels ou à base d'agents (IBM ou ABM) ont été utilisés pour prédire les trajectoires individuelles à l'approche d'obstacles (Haefner and Bowen, 2002; Scheibe and Richmond, 2002; Goodwin et al., 2006, 2014). Les IBM développés pour simuler les mouvements des smolts à l'échelle de la rivière sont basés sur une combinaison de paramètres déterministes et stochastiques (Scheibe and Richmond, 2002; Goodwin et al., 2006). En particulier, Goodwin et al. 2006, 2014 ont développé une théorie de la perception et de la réaction des poissons au champ d'écoulement environnant. Ce type de modèle a permis une meilleure compréhension du comportement du poisson vis-à-vis de l'hydraulique et a contribué au développement de nouveaux modèles mathématiques de comportement de nage. Ce sont des outils importants pour la compréhension et la prédiction du comportement de nage des poissons, et pour le développement de mesures d'atténuation. Ces modèles, implémentés dans un cadre IBM, peuvent être utilisés pour améliorer les modèles existants afin d'évaluer l'efficacité des différents ouvrages de franchissement. Des modèles statistiques ont également été développés pour analyser les données de suivis télémétriques dans le but de déduire le comportement (Vermard et al., 2010) ou d'estimer l'influence de l'environnement sur les mouvements individuels (Patterson et al., 2007; Bestley et al., 2013; Drouineau et al., 2017). Parmi ces modèles statistiques, on trouve les modèles à espace d'état (SSM) qui sont utiles pour prédire les emplacements réels à partir de données de mouvement bruitées (Jonsen et al., 2005; Patterson et al., 2007; Johnson et al., 2009; Pedersen et al., 2008; McClintock et al., 2012; Jonsen et al., 2013; Auger-Méthé et al., 2021). Les modèles de Markov cachés (HMM; Joo et al. 2013; McClintock et al. 2020; Auger-Méthé et al. 2021) ont également connu un développement parallèle important, car ils peuvent classer de multiples états discrets influençant le processus de mouvement, et ceux-ci peuvent être déduits pour refléter le comportement animal. Ces derniers sont basés sur deux sous-modèles distincts. Le modèle d'états SSM décrit l'évolution des états des animaux à travers différents pas de temps (généralement discrets). Le modèle d'observations HMM décrit le lien entre les états non observés et les observations. En écologie du mouvement, les états sont généralement une position et un type de comportement, tandis que les observations peuvent être une estimation de la position, de la vitesse ou de tout autre paramètre monitoré fournissant des informations sur le mouvement (Nathan et al., 2008; Jonsen et al., 2013; Nathan et al., 2022).

Dans leur synthèse, Patterson et al. 2007 détaillent les avantages des SSM en écologie du mouvement. Les SSM permettent l'inférence statistique, en tenant compte de divers types d'incertitude ; les probabilités d'état (localisation spatiale et durée de comportements spécifiques), les paramètres du modèle de processus pour chaque état/comportement, et les paramètres du modèle d'observations. De plus, la flexibilité des SSM permet de prendre en compte les effets des facteurs environnementaux sur la transition état/comportement. Par conséquent, les modèles stochastiques d'espace d'état sont des outils pertinents pour la modélisation des trajectoires animales, comme le soulignent Patterson et al. 2007.

Par ailleurs, d'autres méthodes stochastiques ont été développées, les modèles de mouvements d'animaux basés sur des hypothèses browniennes et estimés à partir de données de suivi (typiquement la télémétrie) présentent de fortes limitations revues par Michelot et al. 2019 (mouvements d'animaux irréalistes). Ces derniers auteurs, à l'inverse, ont proposé d'utiliser une diffusion de Langevin pour la distribution dite d'utilisation ("fonction de densité de probabilité qui donne la probabilité de trouver un animal à un endroit particulier", Anderson 1982), qui a été jugée plus pertinente que les approches historiques lorsqu'elle est appliquée aux mammifères marins. Cependant, ces modèles nécessitent d'avoir des covariables environnementales avec des intensités relativement élevées afin de déterminer la probabilité d'utilisation de l'espace par l'animal vis-à-vis des conditions environnementales rencontrées.

Le développement d'analyses statistiques sur le comportement des smolts vis-à-vis des conditions hydrauliques locales et d'outils de modélisation plus adaptés est nécessaire pour obtenir des conditions hydrauliques de conception et de fonctionnement biologiquement significatives pour les ouvrages de franchissement.

1.8 Objectifs et structure de la thèse

La conception ou la modification d'un ouvrage de franchissement efficace requiert la collaboration entre différentes disciplines scientifiques, notamment la biologie, l'hydraulique, le génie civil et les mathématiques. Ces dispositifs de franchissement sont le plus souvent de lourds investissements (plus de 15 millions d'euros pour la nouvelle passe à poisson de l'usine hydroélectrique de Strasbourg sur le Rhin) qui nécessitent d'importantes études préalables afin de modéliser l'hydraulique, de comprendre le comportement des poissons migrateurs à l'approche de l'ouvrage, de valider le design retenu, et pouvant aller jusqu'à la construction de modèles réduits. Bien que ces derniers constituent un moyen sécurisant pour valider une seule solution, ils ne permettent pas de tester plusieurs modifications dont chacune nécessiterait la modification voire la construction d'un nouveau modèle réduit. Le développement de la simulation numérique du comportement des smolts en dévalaison couplée à un modèle hydraulique tridimensionnel doit permettre de tester un grand nombre de solutions et de meilleures prédictions des trajectoires de dévalaison pour assurer le franchissement des poissons.

Un obstacle majeur au développement de systèmes de guidage alternatif est la connaissance insuffisante de la façon dont l'hydrodynamique de l'écoulement affecte les choix comportementaux des poissons migrateurs. En particulier, dans des retenues où les intensités des conditions hydrauliques sont particulièrement faibles et engendrent un retard conséquent dans la migration. De plus, en raison de limitations techniques, les liens entre l'hydraulique et le comportement des poissons à des échelles spatiales et temporelles fines restent peu explorés. Par ailleurs, l'efficacité des ouvrages de

franchissement dépend de la configuration générale et de l'hydrodynamique du site. Il est donc important de concevoir un outil prédictif sur le comportement de nage des smolts à l'amont d'ouvrages de franchissement pour tester plusieurs configurations et améliorer la compréhension du comportement de nage des poissons vis-à-vis de l'hydraulique du site. L'utilisation d'un cadre de modélisation pour analyser les mouvements individuels à des échelles fines reste peu courante.

Afin de restaurer et d'assurer la libre circulation des smolts, et ainsi d'améliorer les dispositifs de franchissement, nous proposons de caractériser et d'analyser le comportement de nage des smolts (direction et orientation de nage) dans les champs hydrauliques complexes rencontrés à l'amont d'un barrage. D'après les connaissances scientifiques et nos résultats, nous développons une nouvelle approche numérique pour modéliser le comportement biomécanique des smolts en dévalaison à l'approche du barrage de Poutès (Allier, France).

Le premier axe d'étude est centré sur le recensement des variables de l'écoulement susceptibles d'influencer le comportement des smolts à l'approche d'un ouvrage et sera présenté dans le chapitre 3 sous forme de publication (en préparation) en anglais. Afin de mieux simuler les conditions hydrauliques et d'habitat importantes pour les poissons en termes de mouvements et de comprendre la mécanique de l'écoulement à une échelle que les poissons perçoivent et à laquelle ils répondent, nous avons développé un modèle hydraulique tridimensionnel du réservoir en amont du barrage, où la géométrie bathymétrique est particulièrement complexe, sur chaque cas d'étude pour lequel nous disposons de données de télémétrie. Ceci nous a permis de mieux comprendre les conditions du champ d'écoulement à une échelle fine qui affectent la dévalaison des smolts, et où les intensités des conditions hydrauliques sont particulièrement faibles.

Dans la seconde partie de la thèse, nous avons réalisé une analyse statistique exploratoire afin d'identifier l'effet des conditions hydrauliques sur le comportement des smolts dans un grand réservoir en amont d'une centrale hydroélectrique, à partir des données de télémétrie et des variables provenant du modèle hydraulique construit. Cette partie sera présentée dans le chapitre 4 sous forme de publication scientifique (publiée) en anglais. Pour cela, nous avons caractérisé le comportement de nage des smolts de manière biomécanique pour bien souligner l'interaction entre le poisson et l'eau en utilisant la loi de la dynamique de Newton. En effet, le principal défi de l'application du cadre de l'écologie du mouvement d'un poisson consiste à identifier les principaux facteurs externes et les capacités de mouvement qui influencent le déplacement de l'espèce étudiée. Or, le mouvement des poissons est façonné par les lois physiques de la quantité de mouvement (deuxième loi du mouvement de Newton), qui régissent les interactions entre les poissons et l'eau. Ainsi, l'approche biomécanique fournit une compréhension détaillée sur la propulsion du poisson, son état comportemental de nage (passif, actif) et son orientation de nage vis-à-vis de l'écoulement. Cela permet également de comprendre comment les poissons se positionnent dans l'écoulement, se déplacent, manœuvrent et accélèrent dans leur milieu fluide, et comment ils maintiennent leur vitesse et leur endurance (Webb et al., 1984; Webb, 1976; Tang and Wardle, 1992; Katopodis and Aadland, 2006; Arenas et al., 2015; Ben Jebria et al., 2021).

Dans la dernière partie de la thèse, à l'aide des variables du modèle hydraulique (chapitre 3), de l'analyse du comportement des smolts (chapitre 4) et des connaissances scientifiques, nous avons développé un modèle stochastique pour prédire le déplacement des smolts à l'approche d'un exutoire de dévalaison en fonction des conditions hydrauliques. Cette partie sera présentée dans le chapitre 5 sous forme de publication scientifique (en préparation) en anglais. Nous avons adopté une approche bayésienne de l'espace d'état SSM. La dynamique des smolts est connue pour être partiellement expliquée par l'état du comportement de nage des smolts (passif, endurance, sprint). Pour modéliser

l'état comportemental de la nage des poissons, nous avons utilisé un modèle de régression de Bézier avec l'intensité de la vitesse d'écoulement comme variable hydraulique. Les paramètres du processus de mouvement (vitesse du poisson et angles d'orientation) sont définis conditionnellement aux états comportementaux et à un modèle biomécanique.

Le couplage du modèle hydraulique et d'un modèle de mouvement des smolts fournit un outil utile pour l'ingénierie écologique. Ces modèles sont des outils importants pour la compréhension et la prédiction du comportement natatoire des poissons, et pour le développement de mesures d'atténuation. Ils permettent d'améliorer les connaissances sur le déplacement des smolts et l'attractivité des ouvrages de franchissement en testant plusieurs configurations en amont des barrages.

Chapitre 2

Matériel et développement méthodologique

Contents

2.1	Site d'étude : l'aménagement hydroélectrique de Poutès-Monistrol . .	32
2.2	Données de télémétrie acoustique	36
2.3	Conditions hydrologiques pendant les suivis	38
2.4	Modèle hydraulique tridimensionnel (CFD)	39
2.5	Couplage entre le modèle CFD et la télémétrie	42
2.5.1	Méthode physique : loi de la dynamique de Newton	42
2.5.2	Méthodes statistiques	44
2.6	Modélisation du comportement de nage	45

2.1 Site d'étude : l'aménagement hydroélectrique de Poutès-Monistrol

Avec ses 1 012 km de long, la Loire est le plus long fleuve de France. L'Allier est son principal affluent (figure 2.2). L'Allier a une longueur de 425 km, un bassin versant de 14 310 km² et un module de 150 m³/s au niveau de sa confluence avec la Loire (Loire nature). L'Allier est le dernier cours d'eau disposant d'une population de saumons (CNSS, 2014).

L'axe Loire-Allier est un hydrosystème emblématique de la présence du saumon atlantique en France et également à l'échelle européenne, mais la population de cette espèce a dramatiquement diminué d'environ 80 % à la fin des années 1980 (Cuinat, 1988; Dauphin and Prévost, 2013) (Figure 2.1). Au début du XVII^{ème} siècle, il est estimé que 100 000 géniteurs se présentaient tous les ans à l'estuaire de la Loire (Cohendet, 1993). A partir de la fin du XIX^{ème} siècle, les captures n'ont cessé de chuter (Cohendet, 1993) et toute forme de pêche a été interdite sur le bassin de la Loire en 1994.

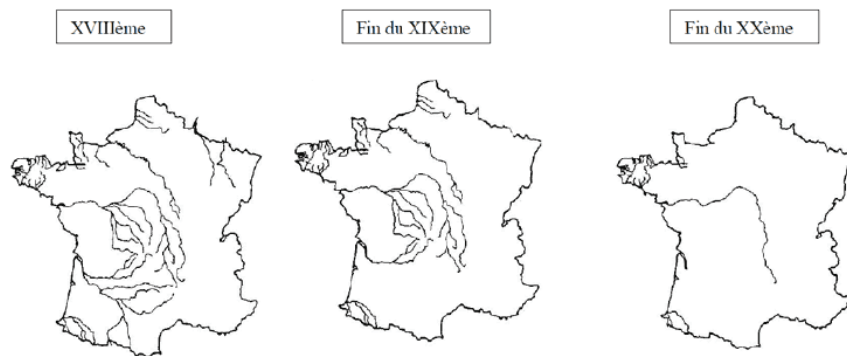


FIGURE 2.1 – Evolution des rivières à saumons en France du XVII^{ème} siècle à nos jours. Source : notre-planète.info

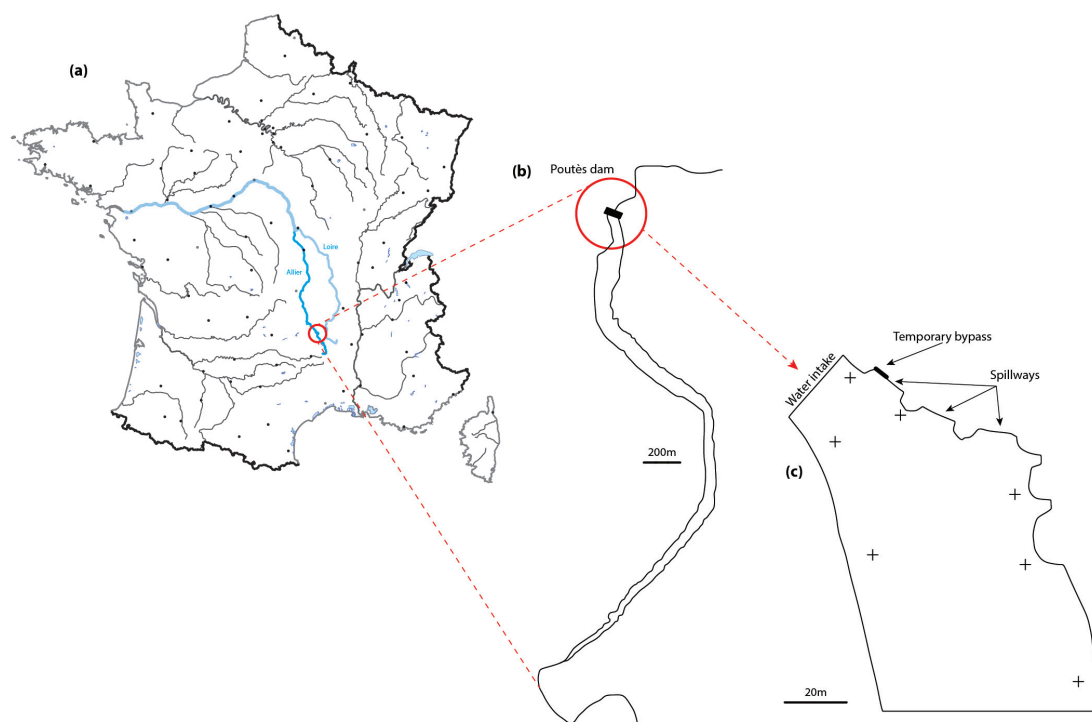


FIGURE 2.2 – Zone d'étude de la migration des smolts : (a) localisation de la rivière Allier en France, (b) localisation de la zone du barrage de Poutès sur la rivière Allier, (c) zoom sur le barrage et la zone de simulation. Les croix indiquent les emplacements des hydrophones en 2017 (Tétard et al., 2021).

L'aménagement hydroélectrique de Poutès-Monistrol se situe dans les gorges de l'Allier, à 890 km de l'estuaire de la Loire et à 70 km des sources de l'Allier (Imbert et al. 2013; Travade 2005; Figure 2.2). Il est estimé que les zones situées en amont du barrage de Poutès représentent environ un tiers du potentiel de production du bassin de l'Allier (Travade, 2005). Afin de réaliser leur cycle de vie, les saumons atlantiques de l'Allier migrent le long de l'axe Loire-Allier au moins deux fois au cours de leur vie (migrations de dévalaison à l'état de smolt et de montaison à l'état adulte) et parcourent une distance d'au plus 900 km pour les smolts partant de l'amont du barrage de Poutès (Imbert et al., 2013). De plus, les poissons rencontrent quatorze obstacles au cours de leur dévalaison, à l'aval de Poutès (seuils et barrages) (EDF, 2013). Ces obstacles sont tous équipés de dispositifs de franchissement plus ou moins efficaces (EDF, 2013).

Le barrage de Poutès a été construit en 1941, c'est un barrage-poids qui court-circuite un tronçon de 10 km de l'Allier (Travade 2005; Figure 2.2). Le barrage, à l'époque de l'étude en 2017, de 85 m de long et de 18 m de hauteur (Travade, 2005), est composé de trois évacuateurs de crues de 14 m de long chacun (EDF, 2013). Une prise d'eau en rive gauche (Figure 2.10), située entre 7 et 13 m sous la surface en conditions normales d'exploitation (profondeur d'eau de 15,7 m). Cette prise d'eau, de 24 m de long et 5,7 m de hauteur, est équipée d'une grille de protection de 3 cm d'espacement inter-barreaux, pour empêcher le passage des smolts (Travade 2005; Figure 2.3). Elle alimente trois turbines Francis (#1/2 : 16 m³/s; #3 : 3 m³/s) par l'intermédiaire d'une galerie souterraine de 3,2 km de longueur suivie d'une conduite forcée de 90 m de long, et délivre un débit maximal de 30 m³/s vers l'usine de Monistrol. Le débit turbiné est ensuite rejeté en rive gauche de l'Allier dans un

canal de fuite qui conflue avec le tronçon court-circuité du Vieil Allier (Travade, 2005). La retenue à l'amont du barrage s'étend sur 3.5 km de long.

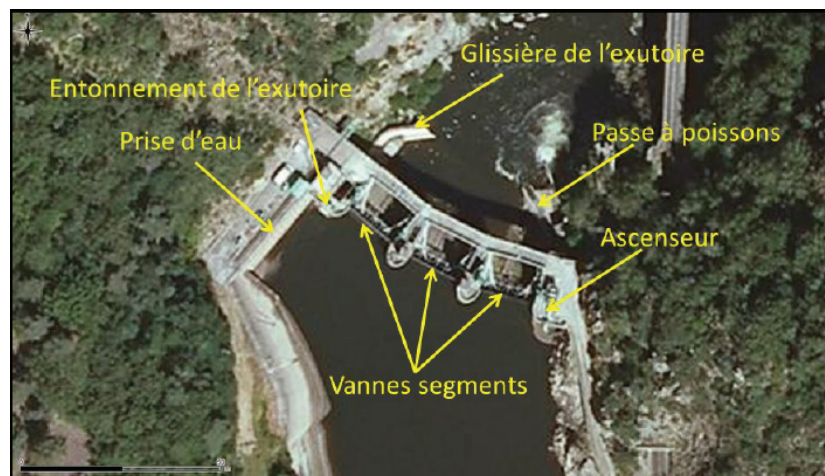


FIGURE 2.3 – Vue aérienne sur le barrage de Poutès (Tetard et al., 2016).

L'importance du franchissement à Poutès pour la dynamique de la population naturelle de saumon de l'axe Loire-Allier a entraîné l'installation de dispositifs. Pour la montaison, une passe à ralentisseurs a été construite en 1941 en rive droite qui n'a jamais été fonctionnelle à la suite de la réhausse du barrage pendant les travaux de construction. En 1986, l'installation d'un ascenseur relié à une passe à bassins (EDF, 2013) a permis la montaison des saumons adultes. Cet ascenseur est formé d'une cage de capture équipée d'une nasse anti-retour et fonctionne toute l'année sauf en cas de panne ou lors de l'entretien du barrage (EDF, 2013). Toutes les deux heures, la cage est remontée et vidée mécaniquement à l'amont du barrage par un toboggan hélicoïdal (Figure 2.4).



FIGURE 2.4 – Passe à ralentisseurs à l'aval et structure de l'ascenseur vue de l'amont avec sa goulotte de transfert (Tetard et al., 2016).

Pour faciliter la dévalaison, un exutoire de dévalaison est situé en amont de la prise d'eau sur la rive gauche (Figure 2.5). Il fonctionne pendant la période de migration des smolts de mars à juin. Il est monté sur une vanne asservie au niveau de la retenue, afin d'assurer un débit continu de $2 \text{ m}^3/\text{s}$,

représentant 7,1 % de la prise d'eau maximale de la turbine (Tétard et al., 2021). Ce dispositif est formé d'un entonnement en amont et d'une glissière à forte pente qui conduit les smolts au pied du barrage (Travade, 2005). Le revêtement de l'exutoire est en résine, lisse, afin d'éviter les blessures par abrasion des poissons lors de leur passage. Le débit appliqué dans l'exutoire est de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$. La zone de l'entonnement est éclairée toutes les nuits de mars à juin par une lampe à vapeur de mercure de faible puissance (50 W) positionnée à 3 m au-dessus de l'entrée et créant un halo de lumière d'environ 3 m de diamètre (Tétard et al., 2021), dans le but d'en améliorer l'efficacité d'attraction (Bach et al., 2000; Larinier and Boyer-Bernard, 1991).

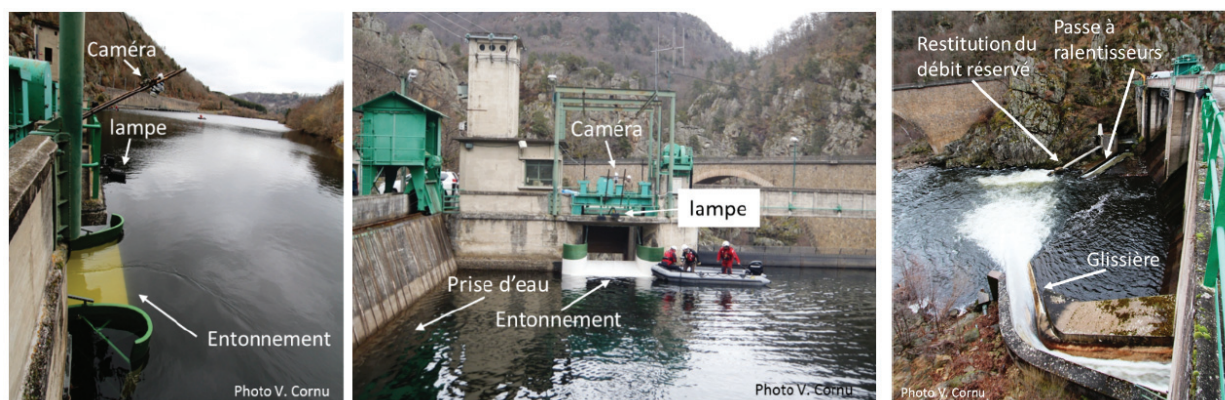


FIGURE 2.5 – Vue de côté, de face et aval sur l'exutoire de dévalaison de Poutès (Tetard et al., 2016).

Malgré ces dispositifs, les études menées au barrage de Poutès ont montré qu'il subsiste des problèmes de franchissement à la dévalaison (Tetard et al., 2016; Tétard et al., 2019, 2021). Les études ont montré qu'il existe des retards de migration importants dans la retenue dus à une désorientation des smolts. Le temps de résidence médian dans la retenue de Poutès atteint 9.3 jours en moyenne (Tetard et al., 2016; Tétard et al., 2021). Outre son effet sur la capacité des smolts à arriver à temps en mer, le retard pris par les poissons entraîne un risque de désorientation, ainsi que de prédation accru dans la retenue. Les tentatives de prédation sont régulièrement observées autour de l'exutoire de dévalaison, par les truites en particulier (Bach et al., 2015). De plus, l'efficacité des voies de passage à la dévalaison à l'amont du barrage a pu être évaluée à 66 % (l'efficacité est définie ici comme le pourcentage de poissons qui pénètrent dans le dispositif par rapport au nombre de poissons qui se présentent à l'aval immédiat de l'obstacle (Groux et al., 2017; Tetard et al., 2016; Tétard et al., 2019, 2021). Pour augmenter l'efficacité, Tetard et al., 2019 ont mis en évidence la nécessité de guider les smolts jusqu'à l'exutoire. Ainsi, lorsque les smolts arrivent à proximité de l'exutoire de dévalaison, le taux de passage¹ des smolts radiopistés a été en moyenne d'environ 90 % (Bach et al., 2000). Toutefois, les smolts doivent parvenir à atteindre la zone proche de l'exutoire.

¹. Ce taux est calculé en faisant le rapport du nombre de smolts ayant franchi l'ouvrage par les vannes et par l'exutoire de dévalaison sur le nombre total de smolts ayant franchi l'ouvrage. Il ne s'agit pas d'une efficacité de passage qui doit intégrer les smolts ayant prospecté au niveau du barrage.

Ce barrage a été reconfiguré en 2021 pour respecter les exigences de la DCE et de la LEMA (EDF, 2013). La reconfiguration du barrage a consisté en un abaissement jusqu'à 10 m tout en conservant une grande partie de la structure déjà existante (EDF, 2013; <https://www.nouveau-poutes.fr/>; Figure 2.6). La diminution de la hauteur du barrage permettra d'avoir des dispositifs de franchissement plus performants, notamment pour la montaison : une passe à bassin de 13 bassins remplacera l'enchaînement des trois dispositifs présents actuellement (EDF, 2013). Le dispositif de dévalaison sera constitué d'une goulotte dans le prolongement de la future prise d'eau avec un débit minimum transitant de $3 \text{ m}^3/\text{s}$ en période de dévalaison (EDF, 2013).

En attendant le début de la "reconfiguration du barrage", des mesures d'exploitation temporaires pendant la migration des smolts ont été proposées dès 2017. Le niveau du réservoir a été abaissé afin de diminuer le retard migratoire, entraînant une diminution de la longueur de 3,5 km à environ 1 km. Pour augmenter l'efficacité du passage, il a été proposé de moduler le fonctionnement des turbines pendant 20 nuits.



FIGURE 2.6 – Vue aval du barrage de Poutès : avant/après. Source : <https://www.nouveau-poutes.fr/>

2.2 Données de télémétrie acoustique

Afin de pouvoir étudier finement les trajectoires des smolts à l'approche du barrage de Poutès, le suivi de la dévalaison des smolts a été réalisé par télémétrie acoustique en utilisant la technologie JSAT (Juvenile Salmon Acoustic Telemetry). Ce choix de matériel permet de suivre des smolts de petites tailles (entre 100 et 150 mm) sur une distance d'une dizaine de mètres avec une durée de message des émetteurs inférieure à la milliseconde (faible taux de collision des signaux et relativement longue durée de vie des émetteurs) et un positionnement bidimensionnel (possible avec le logiciel U-Map).

La télémétrie acoustique bidimensionnelle nécessite un émetteur et un récepteur. L'émetteur émet une onde sonore sous forme d'impulsion avec un identifiant unique. L'onde est représentée sous forme de cercles concentriques et doit être réceptionnée à l'aide de trois récepteurs au minimum (Figure

2.7). La vitesse de propagation du son dans l'eau et la position des récepteurs permet de calculer la position de l'émetteur par triangulation des données des récepteurs.

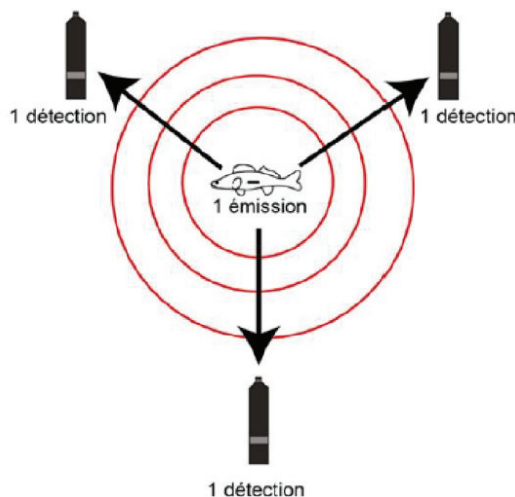


FIGURE 2.7 – Schéma du fonctionnement de la télémétrie acoustique 2D (Roy et al., 2014)

Les récepteurs utilisés correspondent à des hydrophones enregistreurs submersibles de type WHS 4000 (Lotek) ayant une autonomie de 100 jours. Ils sont montés sur des tubes en PVC de 1 m ancrés sur des socles en béton de 25 kg et attachés à la berge par des cordes (Figure 2.8). La localisation GPS précise (précision à 0,3 m près) des hydrophones a été récupérée avec un GPS différentiel (Leica®).

Des émetteurs JSAT L-AMT-1.421 (10,5×5,2 mm de large ; Lotek Wireless Inc.®) ont été utilisées, pesant 0,32 g dans l'air, ce qui représente moins de 2 % de la masse corporelle des poissons, comme le recommande Winter 1996. Les émetteurs envoient un signal acoustique codé unique et reconnaissable individuellement toutes les 5 secondes, ce qui donne une durée de vie de la batterie d'environ 40 jours. Ce délai d'émission a été choisi afin d'avoir un compromis entre un positionnement le plus précis possible et une autonomie suffisante pour couvrir la période de dévalaison.



FIGURE 2.8 – Installation des hydrophones sur leur ancrage béton. À droite, zoom sur l'hydrophone en place sur le mât en PVC (Tetard et al., 2016).

Pour étudier le mouvement de dévalaison des smolts à l'amont du barrage de Poutès, onze hydrophones ont été positionnés près du barrage : sept dans le réservoir à 80 m en amont du barrage (Figure 2.9), quatre dans le tronçon de dérivation à 300 m en aval pour confirmer le passage dans le tronçon court-circuité. Le système a suivi les smolts en deux dimensions avec une précision médiane de 1,1 m (Tétard et al., 2021). L'étude est réalisée à une température d'eau de 6 à 10,9 °C (Tétard et al., 2019).

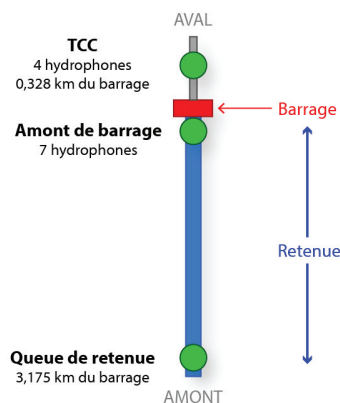


FIGURE 2.9 – Schéma de la zone d'étude et du dispositif installé en 2017 (Tétard et al., 2016).

Afin de pouvoir étudier le comportement de nage des smolts, deux pièges rotatifs à vis ont été utilisés pour capturer les poissons migrateurs sauvages, comme décrit dans Tétard et al. 2021. Cependant, le nombre de poissons piégés étant insuffisant, certains smolts provenant de la pisciculture du Conservatoire national du saumon sauvage (CNSS) ont été utilisés afin de s'assurer qu'un nombre important de poissons soient marqués.

Avant le marquage, les poissons ont été anesthésiés dans une solution de phénoxyéthanol à 0,3 mL/L, puis mesurés (longueur totale), pesés et marqués (Tétard et al., 2021). Les émetteurs acoustiques ont été soigneusement insérés dans la cavité corporelle par une incision latérale. La fermeture a été réalisée à l'aide de colle chirurgicale. Après s'être remis de l'anesthésie, les poissons ont été relâchés à 3 km en amont du réservoir (Tétard et al., 2021).

La télémétrie nous permet d'acquérir des trajectoires des smolts à l'approche du barrage de Poutès. Un des objectifs de la thèse est d'analyser le comportement de nage des smolts vis-à-vis des conditions hydrauliques rencontrées. Pour cela, nous avons besoin de connaître les conditions hydrologiques du barrage de Poutès pendant les mesures des positions des smolts grâce à la télémétrie acoustique.

2.3 Conditions hydrologiques pendant les suivis

Les mesures d'exploitation du barrage de Poutès entreprises avant construction permettent différentes configurations de débits et le choix entre deux niveaux de hauteur d'eau et donc deux longueurs de retenue. Ces mesures sont particulièrement intéressantes pour étudier les trajectoires des smolts dans différentes conditions environnementales dans la retenue pendant la période (mars à juin) du suivi des smolts par télémétrie acoustique en 2017.

Conformément aux mesures d'exploitation temporaires de 2017, la retenue de niveau du réservoir a été abaissée de 11 m le 1^{er} mars pour atteindre 644,7 m NGF. D'après les analyses du comportement des smolts en 2015 et 2016 à l'amont de Poutès, l'abaissement du niveau d'eau dans le réservoir a été proposé comme un moyen de réduire le retard dans la migration des smolts (Tétard et al., 2016). Pour tester cette solution, les trajectoires des smolts ont été suivies par télémétrie acoustique à deux hauteurs d'eau différentes (15.7 et 11 m) en 2017. Un nouvel exutoire de dévalaison temporaire a dû être conçu pour la configuration de bas niveau d'eau car l'ancien dispositif de franchissement (utilisé dans la configuration de haut niveau d'eau) devient inaccessible (Figure 2.10). Une extension de montants métalliques et de pièces en bois d'environ 1 m a été façonnée pour obstruer partiellement la crête du déversoir et créer une échancrure de 4,5 m de large qui délivre un débit de 5 m³/s avec une hauteur de chute hydraulique supérieure à 70 cm sur la crête du déversoir. Contrairement aux conditions normales d'exploitation et pour des raisons pratiques, l'exutoire de dévalaison temporaire n'est pas éclairé. Pour éviter les blessures par abrasion, le parement du déversoir devant l'entrée de l'exutoire a été adouci (Tétard et al., 2019, 2021).

Les données hydrologiques mesurées au barrage de Poutès en 2017 nous informent sur la variation des débits entrant dans la retenue, turbiné et déversé au niveau des vannes ainsi que sur la hauteur d'eau. Ces données sont cruciales pour l'élaboration des conditions à simuler à l'aide d'un modèle de mécanique des fluides numérique.

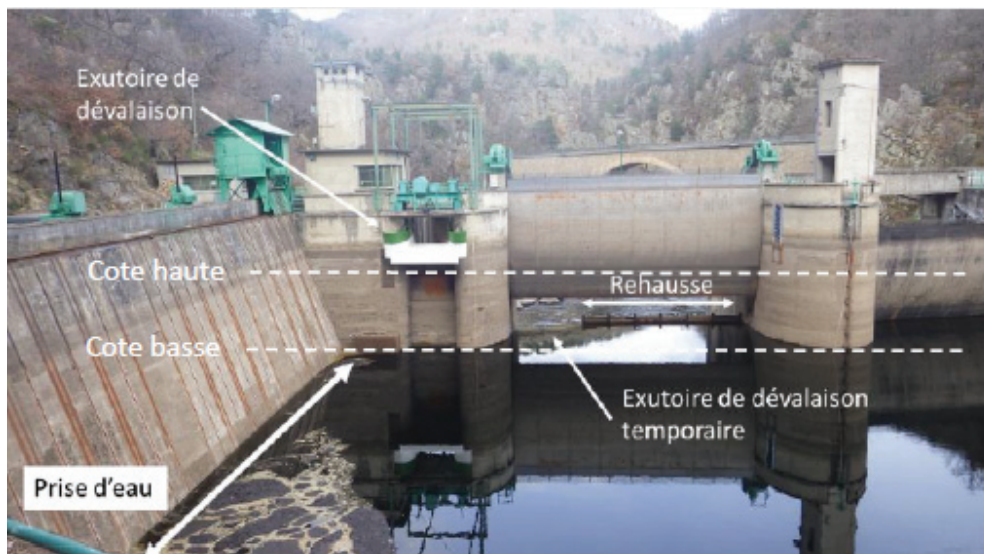


FIGURE 2.10 – Vue amont de la prise d'eau, de l'exutoire de dévalaison (non fonctionnel) et de l'exutoire de dévalaison temporaire (Tétard et al., 2021).

2.4 Modèle hydraulique tridimensionnel (CFD)

Afin de connaître les conditions hydrauliques rencontrées par les smolts au barrage de Poutès, il est nécessaire de réaliser une modélisation numérique tridimensionnelle (3D) des écoulements dans la retenue à l'amont du barrage (voir partie 1 du schéma synthétique de la thèse et chapitre article 1). Les développements récents de l'informatique et de l'analyse numérique permettent aujourd'hui d'aborder ce travail afin d'obtenir une simulation plus réaliste du phénomène. Ainsi, la mécanique

des fluides numérique (Computational Fluid Dynamics CFD) est en passe de devenir un outil de mise au point aussi important que les essais expérimentaux : plus souple, plus facile à réaliser, et surtout plus économique, elle permet d'aborder des expériences compliquées, parfois impossible à reproduire en laboratoire ou sur modèle physique.

Les modèles CFD permettent de modéliser et d'étudier les mouvements d'un fluide, par la résolution numérique des équations régissant ce fluide. Dans le cas des écoulements à l'amont du barrage qui peuvent être turbulents, on utilise le moyennage temporel des équations de Navier-Stokes (RANS ; Reynolds 1895), afin de modéliser et simuler les écoulements turbulents.

De manière générale, la réalisation d'un problème de type CFD passe par plusieurs étapes. Tout d'abord, nous préparons le problème en définissant et créant une géométrie, un maillage discrétisant le domaine de calcul, et en choisissant les modèles et méthodes numériques employées et les conditions aux limites du domaine de calcul. Dans un second temps, nous résolvons numériquement le problème en utilisant un logiciel de simulation numériques des écoulements à l'aide de grandes ressources de calcul. Et enfin, nous terminons par l'exploitation des résultats, par une vérification de la cohérence des résultats obtenus.

Le site du barrage de Poutès a présenté plusieurs défis pour la création de la géométrie, la génération de maillage, incluant un grand domaine à modéliser et une bathymétrie complexe.

Dans le cas de la modélisation des écoulements dans la retenue du barrage de Poutès, la géométrie a été créée à l'aide du logiciel source libre Blender (The Blender Foundation, "Blender.org." <https://www.blender.org/>. Accessed 2019-02-24.) à partir des plans fournis par EDF. Le logiciel Blender permet la modélisation tridimensionnelle (3D) de géométries complexes.

L'étape de la réalisation du maillage est très importante pour le développement du modèle CFD afin d'obtenir des conditions hydrauliques à une échelle suffisamment fine pour être perceptibles par les smolts. Pour obtenir une finesse des résultats, il faut considérer certains paramètres lors de la création du maillage (ensemble des éléments de volumes unitaires (cellules) utilisés pour discrétiser le domaine de calcul). En effet, il faut s'assurer que les quantités créées par l'écoulement sont bien représentées et résolues lors des simulations numériques. C'est pourquoi il est recommandé de créer un modèle au maillage suffisamment fin dans les domaines où le mouvement moyen de l'écoulement change brusquement, en particulier près des parois. Dans notre étude, la taille des mailles est assez fine et varie de 2 m au centre du réservoir à 20 cm proche des parois, de la prise d'eau et de l'exutoire de dévalaison (cela est plus amplement détaillé dans la partie 3.4.2 de la thèse).

Le maillage a été développé à l'aide des logiciels Meshlab (Cignoni et al., 2008) et Salome (version 8.3.0). Le logiciel libre Meshlab permet de traiter les maillages 3D, il a été utilisé afin de faire un premier nettoyage du maillage en effectuant une reconstruction des surfaces avant de passer au logiciel Salome qui a permis la génération finale du maillage 3D (Figure 2.11).

La simulation numérique des écoulements a été réalisée à l'aide du logiciel libre Code_Saturne (version 6.0, R&D 2015) développé par EDF qui permet de simuler des écoulements 3D. Ce logiciel utilise la méthode des volumes finis (Eymard et al., 2000) pour résoudre les équations tridimensionnelles RANS avec un modèle $k-\varepsilon$ pour modéliser la turbulence.

FIGURE 2.11 – Schéma synthétique des différentes étapes du développement du modèle CFD

Afin de s'assurer que le modèle numérique 3D CFD de Poutès développé soit valide, nous avons comparé les mesures de courantométrie ADCP mesurées sur le terrain avec les résultats simulés par le modèle. Les profileurs acoustiques de vitesse par effet Doppler (ADCP, pour *acoustic Doppler current profiler*) permettent de mesurer les profils verticaux de la vitesse du fluide. Ainsi, afin de valider le modèle CFD, les tests de corrélation de Pearson ont été utilisés pour comparer la vitesse d'écoulement résultante prédite à partir du modèle CFD avec la vitesse d'écoulement résultante mesurée par ADCP sur le terrain.

A partir des différentes conditions hydrologiques au barrage de Poutès, nous avons défini les différentes simulations numériques permettant d'estimer les conditions hydrauliques rencontrées par les smolts à Poutès lors de la mesure par télémétrie en 2017. Ces différentes simulations sont listées dans le Tableau 2.1.

Par souci de simplification, seules les mesures des smolts en conditions hydrauliques constantes dans le temps ont été analysées. Ainsi, dans cette thèse, 23 saumons atlantiques juvéniles ont été suivis : 8 d'entre eux sont des poissons sauvages et 15 proviennent de pisciculture. Au total, 1 618 positions ont été enregistrées (193 et 1 425 positions pour les poissons sauvages et de pisciculture, respectivement). La longueur totale moyenne ($\pm$ écart-type) des smolts est $L_{sm} = 152$ mm (152 ± 30 et $164 \pm 9,7$ mm pour les poissons sauvages et de pisciculture, respectivement) et la masse corporelle moyenne ($\pm$ écart-type) $m_{sm} = 30$ g (28 ± 16 et $40 \pm 7,4$ g pour les poissons sauvages et de pisciculture respectivement) (Tétard et al., 2021).

TABLE 2.1 – Simulations numériques estimant les conditions hydrauliques rencontrées par les smolts et le nombre de smolts et de positions de smolts observés.

Numéro de la simulation numérique	Hauteur d'eau (m)	Rivière		Turbiné		Déversoir		Nombre de smolts : total/sauvages	Nombre de positions de smolts : total/sauvages
		Débit (m^2/s)	Vitesse moyenne transversale (m/s)	Débit (m^2/s)	Vitesse moyenne transversale (m/s)	Débit (m^2/s)	Vitesse moyenne transversale (m/s)		
1	11	29	0.12	15	0.42	14	1.25	3/0	85/0
2	11	40	0.17	27	0.76	13	1.16	2/2	145/145
3	11	78	0.33	30	0.85	48	1.2	6/6	48/48
4	15.7	7	0.029	2	0.056	5	0.45	7/0	766/0
5	15.7	15	0.063	10	0.28	5	0.45	5/0	574/0

2.5 Couplage entre le modèle CFD et la télémétrie

Dans le chapitre 4, nous avons émis l'hypothèse que le guidage des smolts repose principalement sur les conditions hydrauliques dans la retenue (Goodwin et al., 2014; Williams et al., 2012). Nous avons fait le choix de concentrer notre analyse du comportement des smolts en réponse à la vitesse du fluide, l'accélération du fluide et l'énergie cinétique turbulente (TKE) à chaque position de poisson, car ces variables se sont avérées être des facteurs prépondérants affectant le comportement des poissons (Haro et al., 1998; Liao, 2007; Johnson et al., 2009; Gao et al., 2016). Enfin, nous avons couplé les données de télémétrie bidimensionnelles des positions des smolts avec les résultats de la simulation du modèle hydraulique tridimensionnel (3D CFD ; détaillé dans le chapitre 3) pour mieux comprendre comment les conditions hydrauliques affectent le mouvement des smolts.

En combinant le déplacement du poisson (vitesse et accélération) et les forces physiques agissant sur le poisson, l'intensité de la force de poussée et l'orientation de nage du poisson ont été déterminées en résolvant la deuxième loi de Newton à chaque position mesurée du poisson. Ceci a été utilisé pour explorer l'influence des conditions hydrauliques sur le comportement de nage des smolts, comme décrit dans le schéma synthétique 2.14 partie 2.

2.5.1 Méthode physique : loi de la dynamique de Newton

La dynamique d'un corps immergé dans un fluide est gouvernée par la deuxième loi de Newton. La deuxième loi de Newton énonce qu'une force résultante exercée sur un corps est égale au produit de la masse de ce corps par son accélération. De plus, l'accélération du corps et la force résultante ont la même orientation. Chaque force appliquée sur un corps entraîne ce dernier à accélérer dans la direction de la force appliquée. Lorsque plusieurs forces sont appliquées sur un corps, il faut déterminer la force résultante, qui correspond à la somme vectorielle de toutes les forces agissant sur ce corps.

Parmi les forces s'exerçant sur les smolts, on distingue la force de traînée et la force de poussée (Figure 2.12), qui sont des forces dans la direction de l'écoulement.

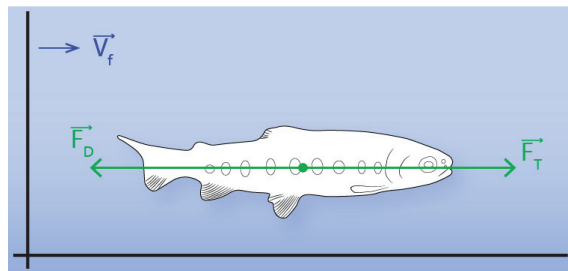


FIGURE 2.12 – Forces appliquées sur le smolt : force de poussée $\vec{F}_T$ et force de traînée $\vec{F}_D$. Et $\vec{V}_f$ indique la vitesse du fluide.

Les smolts nagent en exerçant une force contre l'eau environnante. Les forces vectorielles exercées sur l'eau par un tel mouvement s'annulent latéralement, mais génèrent une force nette vers l'arrière (force de traînée F_D) qui, à son tour, pousse le poisson vers l'avant dans l'eau (force de poussée F_T).

Nous avons utilisé la force de poussée du poisson pour caractériser les différents comportements de nage des smolts et pour déterminer l'orientation du poisson à chaque position. La force de poussée du poisson quantifie l'effort que le poisson exerce sur l'eau pour se déplacer d'un endroit mesuré à un autre. L'orientation de nage correspond à l'angle entre les vecteurs de la force de poussée du smolt et de la vitesse du fluide (cela est expliqué dans la partie 4.3.6 et sur la Figure 4.2).

La force de poussée et l'orientation décrivent plus précisément comment les poissons réagissent à ce qu'ils perçoivent. La force de poussée est évaluée en résolvant la deuxième loi de Newton. L'accélération du poisson est donnée par l'équation de la quantité de mouvement :

$$m_{sm} \frac{d\vec{u}_g}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_T$$

où m_{sm} (kg), $\vec{u}_g$ (m/s), $\vec{F}_D$ and $\vec{F}_T$ (N) sont la masse totale du smolt, la vitesse du smolt par rapport au sol, les forces de traînée et de poussée du smolt, respectivement. La vitesse de nage du poisson par rapport au sol, $\vec{u}_g$, et l'accélération de nage du poisson, $d\vec{u}_g/dt$ ont été calculés à partir des positions des poissons mesurées par télémétrie acoustique (Figure 2.13).

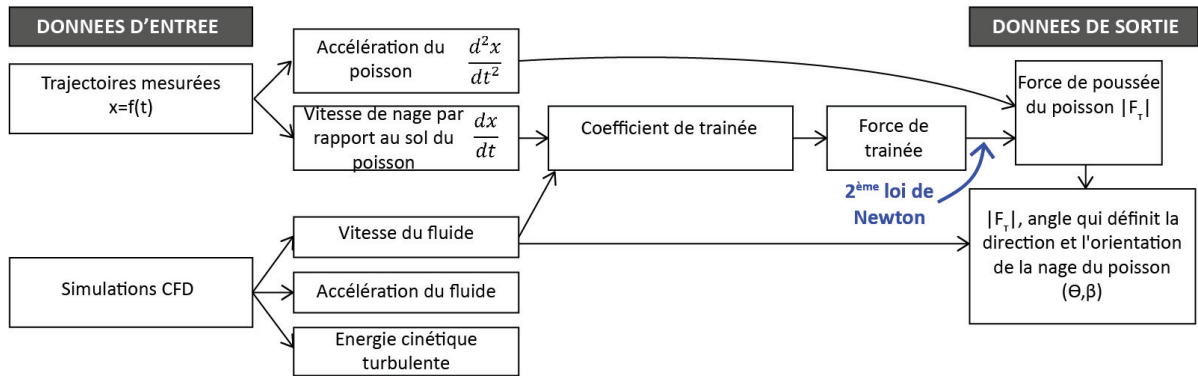


FIGURE 2.13 – Schéma synthétique du calcul des composantes de la poussée du poisson à chaque position mesurée du smolt (inspiré d'Arenas et al. 2015).

La traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans l'écoulement et agit comme une force de frottement. C'est une force orientée dans le sens opposé à la vitesse relative du corps par rapport au fluide. Cette force décrit les interactions de friction entre le poisson et le fluide l'environnant :

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2}\rho A_{sm} C_{d,sm} |\vec{u}_s| \vec{u}_s \quad (2.1)$$

où ρ (kg/m³) est la densité du fluide, A_{sm} (m²) la surface mouillée du poisson (calcul détaillé dans la partie 4.3.6, équation 4.3), $C_{d,sm}$ le coefficient de traînée et u_s la vitesse de nage du poisson par rapport au fluide. La vitesse de nage du poisson par rapport au fluide a été évaluée en utilisant la relation de composition de la vitesse : $\vec{u}_g = \vec{u}_s + \vec{u}_f$.

La force de traînée est proportionnelle à la densité du fluide et au carré de la vitesse de nage du smolt relativement au fluide. Le coefficient de traînée $C_{d,sm}$ est une quantité sans dimension qui correspond à la résistance du poisson dans l'eau. Ce coefficient n'est pas constant et varie en fonction de la nage

du poisson, de la vitesse de l'écoulement, de la direction de l'écoulement, de la taille de l'objet, de la densité du fluide et de la viscosité du fluide (cela est détaillé dans la partie 4.3.6, équation 4.4). La vitesse, la viscosité cinématique et une échelle de longueur caractéristique de l'objet sont incorporées dans une quantité sans dimension appelée nombre de Reynolds (Re). Le coefficient est donc fonction de Re (cf. équation 4.5).

La Figure 2.13 synthétise la méthode de couplage entre les paramètres hydrauliques (vitesse du fluide, accélération du fluide et énergie cinétique turbulente) provenant du modèle CFD et les positions de smolts mesurées par télémétrie acoustique. La connaissance de la vitesse du fluide et de la vitesse de nage du poisson par rapport au sol permet de calculer le coefficient de traînée et donc la force de traînée du smolt. Ainsi en résolvant la deuxième loi de Newton, nous sommes capables d'évaluer la force de poussée du smolt, ainsi que son orientation (angle entre les vecteurs force de poussée et vitesse du fluide) et sa direction de nage par rapport à l'écoulement à chaque position des smolts.

Le couplage entre le modèle CFD et la télémétrie nous permet de comprendre comment le smolt se déplace vis-à-vis des conditions hydrauliques qu'il rencontre. Il en résulte une analyse des déplacements des smolts en fonction des conditions hydrauliques. Des règles de comportement de nage du smolt sont établies à partir de cette analyse, elles seront nécessaires pour développer un modèle prédictif de comportement de nage.

2.5.2 Méthodes statistiques

Caractérisation d'une trajectoire

Pour chaque smolt, le temps moyen entre deux détections est de 5 secondes (Tétard et al., 2021). La succession des positions d'un poisson dans le temps permet de reconstruire des trajectoires. Cependant, le pas de temps entre deux positions n'est pas régulier ; il peut varier de 5 secondes à plusieurs jours. Cela apparaît notamment lorsque le smolt sort de la zone de détection des tags par les hydrophones. Lorsque le temps entre deux détections est supérieur à 37 secondes, nous avons considéré les deux positions comme indépendantes, conduisant à deux trajectoires distinctes. Ce délai correspond au seuil à partir duquel deux positions ne sont plus significativement autocorrélées. De plus, une technique de lissage a été appliquée aux positions mesurées des poissons par télémétrie acoustique afin de supprimer les valeurs de vitesse de nage du smolt par rapport au sol ($\vec{u}_g$) dépassant la capacité de nage. Videler (1993) a défini ce seuil comme :

$$||\vec{u}_{g,max}|| = 0,4 + 7,4L_t = 1,5 \text{ m/s}; \quad \text{où } L_t = 152 \text{ mm est la longueur totale du smolt.}$$

Les valeurs supérieures à $2||\vec{u}_{g,max}||$ ont été considérées comme valeurs aberrantes, supérieures à la capacité de nage des smolts.

Influence des conditions hydrauliques sur le comportement de nage des smolts

Différentes méthodes statistiques ont été utilisées afin d'analyser l'influence de la vitesse du fluide, de l'accélération du fluide et de l'énergie cinétique turbulente (TKE ; provenant du modèle 3D CFD) sur la force de poussée des smolts, l'orientation et la direction de la nage à chaque position mesurée des poissons (provenant de la télémétrie acoustique), avec les positions des poissons regroupées.

Les conditions hydrauliques sont fortement et positivement corrélées entre elles : ($r^2 = 0,918$) pour la vitesse du fluide et la TKE, ($r^2 = 0,863$) pour l'accélération du fluide et la vitesse du fluide et ($r^2 = 0,849$) pour l'accélération du fluide et la TKE. Il n'a donc pas été possible de démêler leurs effets relatifs. Ainsi une analyse en composante principale (ACP) des trois variables a été réalisée pour réduire la dimension du nombre de variables utilisées.

Une classification ascendante hiérarchique sur les composantes principales de l'ACP a été effectuée pour détecter les groupes de conditions hydrauliques similaires. Ceci nous a conduit à distinguer quatre clusters hydrauliques : intensité très faible, faible, moyenne ou élevée, comme décrit dans le tableau 4.2 du chapitre 4. Sur cette base, chaque position de poisson est associée à une intensité de condition hydraulique.

Enfin, pour évaluer l'effet des intensités des conditions hydrauliques sur le comportement des smolts, nous avons comparé leurs distributions associées à chaque état comportemental et à l'orientation et la direction de la nage des smolts par rapport au fluide. Des tests statistiques non paramétriques de Kruskal-Wallis ont été effectués pour détecter les différences entre les distributions. Il s'agit d'un test statistique permettant de déterminer si les différences entre les médianes sont significatives.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées sous R (R Core Team, 2021).

2.6 Modélisation du comportement de nage

L'objectif de cette partie est de concevoir un outil de simulation numérique des trajectoires des smolts pour optimiser la conception d'ouvrages de franchissement. Cette partie est expliquée dans le schéma de synthèse 2.14 et fait l'objet d'un article détaillé dans le chapitre 5.

L'évaluation et l'utilisation du modèle de simulation des trajectoires des smolts sont réalisées dans le cadre d'une approche statistique bayésienne. Le choix de l'approche bayésienne est renforcé par la connaissance a priori de certaines données qui permettront l'estimation des paramètres peu connus, comme les positions successives à prédire des smolts.

Le comportement de nage des poissons peut être décrit qualitativement comme un état catégorique C_t prenant des valeurs dans $\Omega = \{C_1 = \textit{passif}, C_2 = \textit{endurant}, C_3 = \textit{sprint}\}$.

A partir de la bibliographie (Williams et al., 2012; Ben Jebria et al., 2021) et de notre propre expérience, nous avons postulé qu'un facteur majeur expliquant le comportement de nage C_t est l'influence de la vitesse du fluide.

La variation au cours du temps de l'état comportemental de nage est modélisée par les courbes de Bézier (Sederberg and Farouki, 1992, détaillé au chapitre 5). Ce choix a été fait car cela permet de prendre en compte la variation de l'état comportemental de nage du poisson en fonction de la vitesse du fluide.

Cet état de comportement de nage est utilisé comme variable de conditionnement pour expliquer comment l'intensité de la force de poussée $\|F_T(t)\|$ et l'angle d'orientation de nage γ_t varient dans le temps.

La force de poussée du poisson $\vec{F}_T(t)$ résume le comportement de nage intrinsèque et stochastique d'un poisson placé dans un fluide. La force de poussée du poisson $\vec{F}_T(t)$ peut être écrite par la composition d'une rotation de l'orientation du poisson γ_t dans le système de coordonnées (x, y) – et

l'intensité d'un déplacement uni-dimensionnel, similaire au module de $\vec{F}_T(t)$:

$$\vec{F}_T(t) = \begin{pmatrix} \|F_T(t)\| \cos(\gamma_t) \\ \|F_T(t)\| \sin(\gamma_t) \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

où la variable γ_t correspond à l'angle entre la vitesse d'écoulement et la force de poussée des poissons, elle caractérise l'orientation des poissons par rapport à la direction de l'écoulement.

Dans cette définition de $\vec{F}_T(t)$, deux modèles pour $\|F_T(t)\|$ et γ_t sont nécessaires.

Conditionné par la valeur de $C(t) = C_i \in \Omega$ (pour $i \in \{1, 2, 3\}$), il a été montré dans des travaux antérieurs (Tang and Wardle, 1992; Arenas et al., 2015; Ben Jebria et al., 2021) que $\|F_T(t)\|$ varie dans un domaine compact (F_{i-1}, F_i) . Un modèle stochastique conditionnel pour $\|F_T(t)\|$ est donc choisi comme :

$$\|F_T(t)\| | C(t) = C_i \sim \mathcal{U}(F_{i-1}, F_i) \quad \forall i \in \{1, 2, 3\}.$$

Nous supposons ici que cet angle varie en fonction du comportement de nage C_{t-1} à la position précédente Z_{t-1} du poisson, toujours de manière stochastique. Nous avons utilisé un modèle aléatoire en deux étapes sur l'angle d'orientation de la nage du poisson pour estimer la moyenne et la variance de la loi wrapped cauchy modélisant la probabilité d'une loi circulaire.

Les principaux processus physiques qui sous-tendent le comportement de nage des poissons sont généralement expliqués par des équations de mécanique du point soumis à une force. Ainsi, afin de connaître la vitesse de déplacement de nage du poisson, nous avons intégré la deuxième loi de Newton, en ayant une connaissance a priori sur la force de traînée déterminée dans le chapitre 4 ; cela grâce à la connaissance de l'intensité de la force de poussée et de l'orientation de nage du poisson nous permettant de calculer le vecteur force de poussée.

Par conséquent, les positions successives simulées du poisson sont supposées être expliquées par le modèle d'espace d'état défini par la vitesse de déplacement du poisson et

$$\begin{cases} \vec{Z}_{t+\Delta t} = \vec{Z}_t + \vec{V}(t)\Delta t & (\text{équation structurelle}) \\ \vec{Z}_t^* = \vec{Z}_t + \varepsilon_t & (\text{équation d'observation}) \end{cases} \quad (2.3)$$

Nous avons choisi de prédire le déplacement des smolts à l'aide d'un modèle à espaces d'états car cela permet d'utiliser une approche probabiliste et de quantifier l'erreur de mesures télémétriques.

Pour estimer les paramètres inconnus permettant de générer des trajectoires plausibles, nous avons employé la méthode d'inférence ABC (*Approximate Bayesian Computation*, Csilléry et al. 2010) en utilisant la distance de Fréchet comme métrique qui est adaptée à la comparaison des trajectoires des poissons (Alt and Godau, 1995), expliqué en détail au chapitre 5.

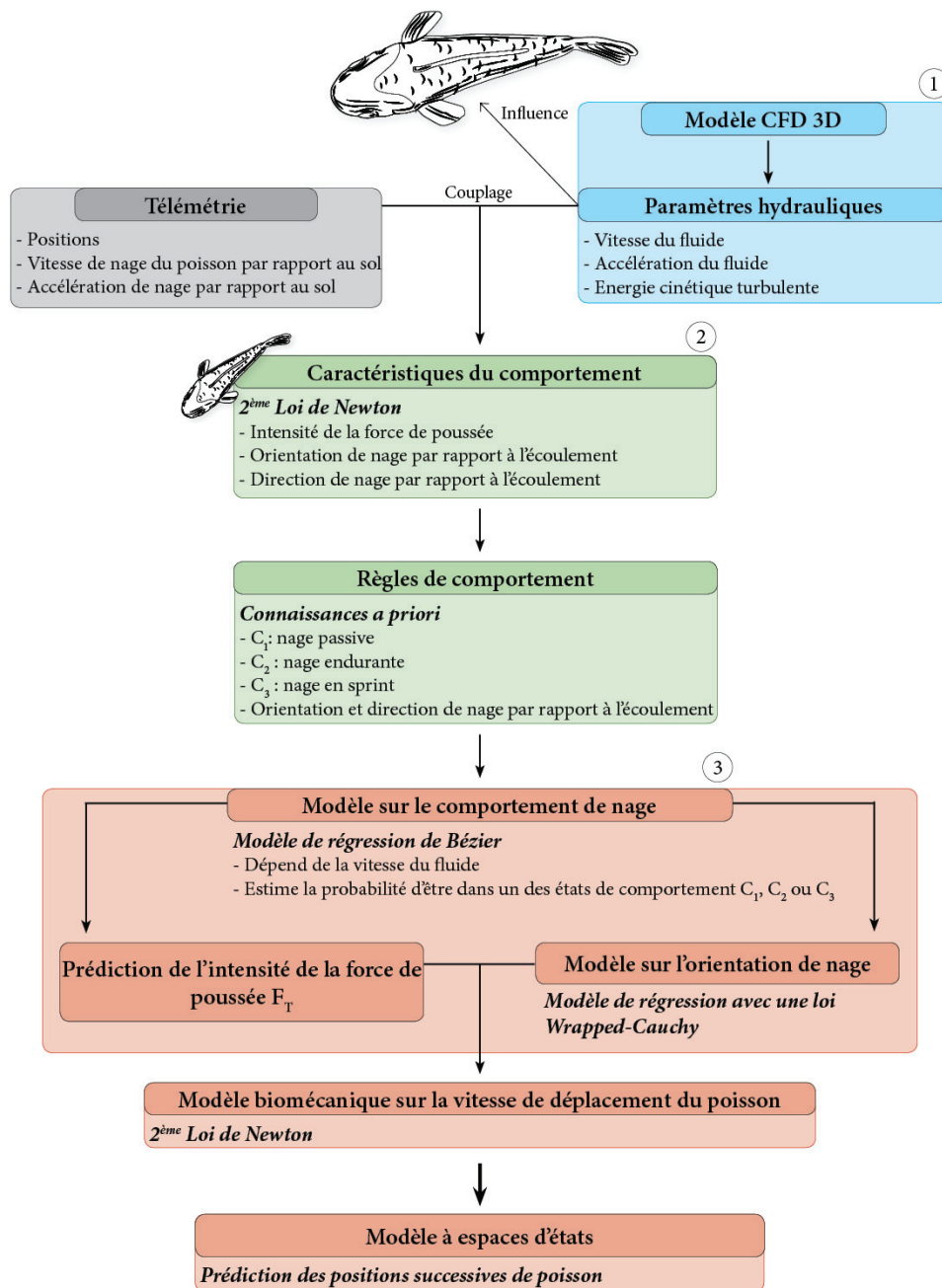


FIGURE 2.14 – Schéma conceptuel de l'approche utilisée dans la thèse.

Chapitre 3

Modélisation hydrodynamique 3D des écoulements à petite échelle pour la dévalaison des smolts dans une retenue de barrage (duplication directe du papier en préparation)

Contents

3.1	Préambule	50
3.2	Introduction	52
3.3	Mathematical model	53
3.4	Numerical model	54
3.4.1	Features of model domain	54
3.4.2	Description of computational mesh	55
3.4.3	Boundary conditions	56
3.4.4	Simulation conditions	57
3.4.5	Available field data for the validation of the model	57
3.5	Results and discussion	58
3.5.1	Validation of the model	58
3.5.2	Analyses of forebay hydrodynamics	60
3.6	Conclusion	63

3.1 Préambule

Ce chapitre décrit la modélisation hydraulique en trois dimensions utilisée pour décrire les conditions hydrauliques de la retenue de Poutès pendant les enregistrements du comportement des smolts en dévalaison.

De nombreuses études ont montré que les facteurs hydrauliques sont souvent identifiés comme les paramètres dominants qui guident la navigation des poissons lors de la dévalaison à l'amont des barrages (Nestler et al., 2008; Goodwin et al., 2014). De plus, pour les saumons atlantiques juvéniles, les changements des conditions hydrauliques, tels que reflétés par la vitesse de l'eau, la turbulence et l'accélération, constituent les principaux paramètres dans la recherche d'une route de migration. Il est donc important de décrire l'hydraulique à l'amont d'un barrage à travers la modélisation des conditions hydrauliques. Par ailleurs, les smolts nagent préférentiellement à une certaine profondeur ce qui implique de connaître l'hydraulique spécifiquement à cette profondeur. Ce qui nécessite une modélisation tridimensionnelle des écoulements.

Bien qu'il y ait des progrès dans la performance des calculateurs pour la simulation numérique, il existe peu de modèles numériques tridimensionnels (3D) décrivant les écoulements complexes rencontrés à l'amont d'un barrage. Cela est en partie dû à la complexité de modélisation de ces écoulements (Ferrari et al., 2009; Khan et al., 2008; Meselhe and Odgaard, 1998). De plus, la plupart des modèles numériques 3D sont développés sur des ouvrages de grande dimension avec des débits très élevés, à l'inverse de Poutès qui est un barrage de grande dimension avec des débits faibles. Ce qui induit des écoulements de faibles intensités.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un modèle numérique 3D de la dynamique des fluides (CFD) à l'amont du barrage hydroélectrique de Poutès à une échelle fine.

Cet article démontre l'utilité des modèles CFD dans l'étude d'un problème complexe d'ingénierie hydraulique, notamment en utilisant des simulations des conditions hydrauliques dans une retenue de barrage 1) pour le dimensionnement et le positionnement d'un exutoire de dévalaison efficace dans le barrage, 2) pour pouvoir étudier le comportement de nage des poissons vis-à-vis des conditions hydrauliques et 3) pour permettre une modélisation du comportement des smolts à l'amont du barrage de Poutès.

3D hydrodynamic model of fine-scale flows for downstream migration in a dam reservoir

BEN JEBRIA Noor¹, DE OLIVEIRA Eric¹, CARMIGNIANI Rémi²

¹EDF R&D, 6 quai watier 78400 Chatou, France;

²LHSV, Ecole des Ponts, CEREMA, EDF R&D, Chatou, France.

Abstract

A three-dimensional (3D) computational fluid dynamics (CFD) model is developed to better understand the complex flow field upstream of a hydropower plant, including a downstream fish bypass at Poutès Dam (River Allier, France). The Poutès dam utilizes fine trashracks at the turbine intakes and a fish bypass upstream of the turbine intakes to facilitate the downstream migration of anadromous juvenile fish. The objective was to investigate forebay hydrodynamics generated by operation of the powerhouse.

The numerical model is based on the Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations with a standard $k-\varepsilon$ turbulence model. The effect of the fish bypass and the turbine intakes flow rates on the flow field close to the downstream fish passage was investigated. Comparison between measured and simulated velocity fields near the bypass and upstream the dam is presented and discussed. The CFD model was validated with field data collected using ADCP during 2018. This validation helps to assess the robustness and reliability of the CFD model for the flow and operating conditions corresponding to the Poutès dam forebay. Quantitative and qualitative validation and visualization of the flow field characteristics indicate that CFD modeling may be a useful tool for fish passage design. After the validation, the model was applied to predict flow field corresponding to flow conditions during 2018. Model results were analyzed, in the forebay of the dam and near the downstream fish bypass, to investigate how hydrodynamic cues (such as flow velocity, flow acceleration and turbulent kinetic energy) are responsible for attracting juvenile fish to the fish bypass and how it could affect their behavior.

keywords : *computational fluid dynamics, model validation, juvenile fish passage facility, forebay hydrodynamics, downstream migration*

3.2 Introduction

Ecosystem fragmentation is a major threat to biodiversity and one of the main challenges for the conservation and restoration of aquatic environments (Malmqvist and Rundle, 2002; Strayer and Dudgeon, 2010; Neeson et al., 2015). By blocking migration, human-induced longitudinal barriers, such as dams and weirs, are partly responsible for the decline in fish populations (Porcher and Travade, 1992; Kondolf, 1997; Coutant and Whitney, 2000; Larinier, 2001; Fukushima et al., 2007). River fragmentation affects the safe passage of downstream migrating anadromous juvenile fish. Juvenile fish typically navigate hydroelectric dams by passing through turbines or over spillways (Baras and Lucas, 2001; Larinier, 2001; Thorstad et al., 2008; Limburg and Waldman, 2009; Bunt et al., 2012). Some large dams also disorient migratory fish by affecting stream flow (Ovidio et al., 2016; Schwinn et al., 2019) and potentially delaying migration (McCormick, 1998; Marschall et al., 2011).

One of the most common means of restoring the continuity of watercourses is fish passage solutions (FPS), such as the construction of fish bypasses and the design of diversion structures (Larinier and Travade, 2002). These systems must be attractive and accessible. Consequently, efforts are underway to make the dams and their appurtenances fish “friendly” by building facilities that can divert fish around the dams by the least hazardous route (Larinier, 2001; Odeh, 2000; Bergkamp et al., 2000). The objective is to reduce fish mortality as they migrate past the dams and guide them towards the fish bypass to allow them the safest passage.

An important concern in the design of FPS is a comprehensive understanding of the hydrodynamics upstream of the dam. Though fish experience many motivational forces that may influence their migration, hydrodynamic cues are frequently more important in the vicinity of dams (Popper and Carlson, 1998; Pavlov et al., 2002; Goodwin et al., 2006). Among all possible hydrodynamic variables provided by three-dimensional (3D) CFD simulations, the variables considered include time-average flow velocity, flow acceleration and turbulent kinetic energy (TKE) because those variables proved to be important factors affecting fish behavior (Haro et al., 1998; Liao, 2007; Johnson et al., 2009; Gao et al., 2016). Hence, the upstream flow patterns at the facilities can provide valuable information on explaining fish movement (Ben Jebria et al., 2021).

Due to the rapid advances in computational methods and computing facilities, CFD models are increasingly being used as a flow modeling tool to evaluate the flow field upstream of hydropower dams. However, there are still very few CFD models developed to analyze the hydrodynamics upstream of dams due to the complexity of bathymetric geometries (Ferrari et al., 2009; Khan et al., 2008). Most studies on the fish passages studies found in the literature are for the Columbia River Basin and pertain to Pacific salmon species (Meselhe and Odgaard, 1998; Meselhe et al., 2000; Blank and Weber, 2000; Li et al., 2006; Ferrari et al., 2009; Khan et al., 2008). These studies have focused on large dam structures with high powerhouse discharge. Yet, less studies have been conducted on dams with large reservoirs and low powerhouse discharges, despite these sites higher prevalence for relatively quiescent flows known to disorient fish (Coutant and Whitney, 2000). And most of these studies have been conducted to investigate flow fields in the intake and in a segment of the forebay outside the intake rather than the complete forebay (Meselhe and Odgaard, 1998; Meselhe et al., 2000; Muste et al., 2001; Lai et al., 2003).

The Poutès dam is located 900 km from the Atlantic Ocean, on the Allier River, the main left-bank tributary of the Loire River. The Allier is a major migration route for Atlantic salmon on a European scale. The downstream migration of Atlantic salmon in the Poutès dam is important to the Loire River ecosystem. Most studies concerning the improvement of juvenile fish downstream migration at Poutès dam consisted in studying the effects of FPS with the help of fish monitoring via telemetry studies (Tétard et al., 2021) and in the design of efficient downstream bypasses and diversion

structures such as trashracks on the turbine intakes (Larinier and Travade, 2002; Larinier, 2001). Yet, there has been no computational fluid dynamics (CFD) model developed to know precisely the hydraulic parameters that guide fish navigation and that help to optimise the design of the FPS.

The primary goal of this study is to develop a 3D CFD model of the reservoir upstream of Poutès dam to better understand the flow field conditions that affect fish downstream migration. The evaluation of hydraulic parameters is fundamental to provide the necessary understanding of juvenile fish swimming behavior in relation to their hydraulic environment, it will help to develop couplings between CFD models and telemetry (Ben Jebria et al., 2021; Goodwin et al., 2014; Silva et al., 2020; Arenas et al., 2015). This study attempts to expand the knowledge of the hydraulics at large dam facilities where flow field intensities are relatively low.

We first describe the mathematical model and numerical model that was developed to calculate the flow upstream of the Poutès dam. The model domain includes the Poutès dam forebay and extends from the forebay wall of approximately 200 m upstream. Then we present the validation of the CFD model with field data collected using ADCP during 2018. This validation helps to assess the robustness and reliability of the CFD model for the flow and operating conditions corresponding to Poutès Forebay. Finally, we describe and analyze the hydraulic parameters (flow velocity, flow acceleration and TKE) upstream of the dam, influencing juvenile fish swimming behavior. Such parameters are key factors in guiding fish navigation and in optimizing the design of FPS. The CFD model developed here is a tool to help in optimizing the design of effective fish bypass and to understand how hydraulic parameters affect fish swimming behavior Ben Jebria et al. (2021).

3.3 Mathematical model

The flow in the forebay of the dam is assumed to be an incompressible fluid. The governing equations for turbulent, incompressible fluid flow are the Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations closed with a suitable turbulence model. The numerical simulations were performed using a CFD open-source software Code_Saturne (version 6.0, R&D (2015)). The basis of this code is a finite-volume numerical method for solving the three-dimensional RANS equations, in conjunction with the $k - \varepsilon$ turbulence model. The $k - \varepsilon$ model was used for its robustness and numerical stability. The governing equations are as follows :

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \quad (3.2)$$

where x_i is the distance in the i direction, u_i the velocity in the i direction, p is pressure, ρ is fluid density, and $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ is effective viscosity, with μ and μ_t the dynamic and turbulent viscosities respectively. Equations 3.1 and 3.2 presents a system of equations in which subscript i refers to the x, y or z directions in Cartesian coordinates, and the Einstein summation is used.

The turbulent kinetic energy, k , and its dissipation rate ε , are obtained from :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.4)$$

where $C_\mu = 0.09$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ and $\sigma_\varepsilon = 1.3$ are the default $k - \varepsilon$ model coefficients. $G_k = \mu_t S^2$ is the generation of turbulence kinetic energy due to mean velocity gradients with S^2 the scalar strain rates, $S^2 = 2S_{ij}S_{ij}$, where $S_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$. The eddy viscosity is given by $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$.

3.4 Numerical model

3.4.1 Features of model domain

The Poutès dam (France) is located 900 km from the Atlantic Ocean, on the Allier River, the main left-bank tributary of the Loire River (Figure 3.1).

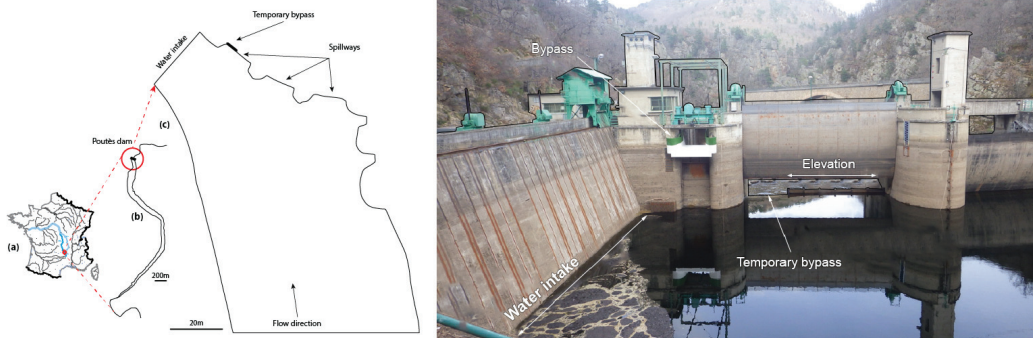


FIGURE 3.1 – Study area of smolt migration : (a) location of the Allier River in France, (b) location of Poutès dam zone on the Allier River, (c) zoom on the dam and simulation zone. And upstream view of Poutès intake zone with usual (non functional at the water level of this numerical study) and temporary bypasses.

The main features of Poutès dam are : a 85 m wide and 18 m high concrete dam ; an intake structure for supplying water to turbines through three intakes ; a spillway controlled by three radial gates (each 14m long) for the passage of flood flows and a fish bypass, a structure aimed to facilitate juvenile fish downstream migration. The salient features of the dam necessary for developing a CFD model of the forebay are shown in Figure 3.1.

The turbine intake is 24 m long and 5.7 m high. It is located on the left bank 7 m below the surface in normal operating conditions (water depth of 15.7 m). It is equipped with a trashrack with 3 cm bar spacing. Field studies have demonstrated that the bar spacing is sufficient to prevent entrainment of juvenile fish into the turbine intake flow (Larinier and Travade, 2002). It supplies three Francis turbines (#1/2 : $16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; #3 : $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). It can deliver a maximum flow of $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ to the Monistrol powerhouse. A surface bypass is located upstream of the turbine intake on the left bank (Figure 3.1). It is operating during the salmon downstream migration period from March to June. It is mounted on a gate automatically regulated according to water level, to ensure a continuous bypass flow of $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, representing 7.1% of the maximum turbine intake (Tétard et al., 2021). At the water level used in this numerical simulation (10.77 m), the initial bypass was inoperative, and therefore a new temporary bypass entrance was designed using the left bank spillway (Figure 3.1). An extension of metal uprights and wooden parts of about 1 m was fashioned to partly obstruct the weir crest and create a 4.5 m wide notch that delivered a flow of $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ with a hydraulic head ≥ 70 cm over the weir crest.

Figure 3.2 a) shows the rugged forebay bathymetry in the model domain.

3.4.2 Description of computational mesh

The Poutès dam site presented several challenges to mesh generation, including a large model domain, a complex bathymetry (Figure 3.2). The model domain shown in Figure 3.1 extends approximately 200 m upstream from the face of the dam, sufficiently far that river inflow boundary condition would not influence the solution in the region of interest (fish bypass and turbine intakes). The grid, containing approximately 6×10^5 nodes, is developed using the open-source grid generator source Salome software (version 8.3.0). The grid is constituted of hexaedric cells of variable size to resolve critical regions of interest. The cell size varies from 20 cm near the turbine intake and the spillway gates, to about 2 m in the reservoir.

Grid quality is an important issue for free surface flow simulations. A finer grid near the turbine intake and the spillway gates will minimize numerical diffusion. Upstream of the turbine intake and the spillway gates, cells gradually become larger to minimize the overall number of cells in the computational mesh. Although these requirements can be easily met for simple geometries, the effort to construct Poutès dam and its forebay was significant due to the geometrical complexity.

Figure 3.2 shows an overall 3D view of the grid and the finer grid details needed to adequately resolve the turbine intake and the spillway gates.

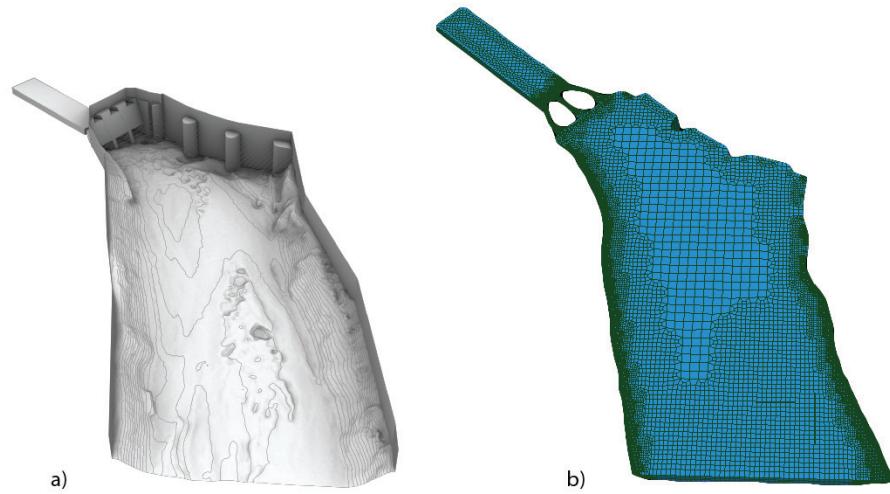


FIGURE 3.2 – a) Bathymetry in the model domain. The model domain from the face of the dam to the river side is approximately 200 m long. b) The computational mesh of the complete model domain.

3.4.3 Boundary conditions

Inlet, outlet, symmetry and no-slip boundary conditions were used for simulating forebay hydrodynamics. At an inlet boundary, an inflow (positive) or an outflow (negative) volume flow rate is specified. An outlet boundary allows flow of water out of the model domain. In simulations presented in this paper, inlet boundary conditions were specified at the powerhouse intakes, fish bypass and at the upstream end of the model domain. The fixed flow rate specified at an inlet was determined from cross-sectional area and known discharge based from hydrology data at Poutès in 2018. The free surface elevation is imposed. A symmetry boundary was used at the free surface. As we expected little surface deformation and discounted wind effects on the flow, we modeled the free surface using a homogeneous Neumann for the scalar fields and a zero Dirichlet for the vector fields. At all other surfaces, a no-slip boundary condition was applied. The boundaries were assumed to be rough walls with default roughness height of 0.01 m. Numerical simulations were run with constant flow rate conditions, letting the simulations converge to a steady state. The simulations were performed using 56 CPUs; computational time to steady state was approximately 30 minutes.

3.4.4 Simulation conditions

The hydrology data was used to evaluate the model performance. Plant operating conditions during data collection are shown in Table 1. The average water surface elevation was 10.77 m. The spillway was not in operation in the simulated days.

TABLE 3.1 – Operational conditions used for the validation case.

Water depth (m)	River discharge (m^3/s)	Powerhouse discharge (m^3/s)	Bypass discharge (m^3/s)
10.77	20	15	5

3.4.5 Available field data for the validation of the model

In support of this study, velocity profiles were measured in four cross-sections using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). The location of the transects is depicted in figure 3.3. The measurements were made in an area quite close to the dam and a little further upstream from the dam : a transect is positioned near the turbine intake (transect 1), one near the fish bypass (transect 2) and the remaining two transects are located upstream from the dam, called transects 3 and 4.



FIGURE 3.3 – View of Poutès dam and field measurement locations (with ADCP transects).

3.5 Results and discussion

3.5.1 Validation of the model

In this section a qualitative and quantitative comparison between the measurements and the numerical model are presented for the four transects. Simulated hydraulic conditions of a less refined mesh and a more refined mesh were compared to measured data from ADCP to validate the CFD model.

Pearson's correlation tests were used to compare predicted resultant flow velocity from both meshes with measured resultant flow velocity in Table 3.2.

For the mesh sensitivity analysis, velocity profiles at the four ADCP transects are compared between the unrefined mesh of 6×10^5 nodes and a mesh two times more refined than the previous one with 1.4×10^6 nodes.

The results from the Pearson's correlation tests and the qualitative comparison between the two meshes show that the computational grid is sufficiently refined for simulating the flow field reasonably well. We note that for all the transects, the two meshes have a very similar correlation coefficient which indicates that the evolution of the mean velocity is very close for both meshes. This can also be observed on the cross sections of the figure 3.4, where the two meshes present very similar results. The velocities at the bathymetry level of the refined mesh is about 15% lower than those of the unrefined mesh.

The Figure 3.4 shows the result for the four transverse sections. On the transect 1 near the turbine intakes, the simulated flow velocities are in good agreement with the measured ones. The velocities magnitude are in the same range. On the three other transects, it is visible that the velocities intensities are quite well reproduced by the numerical simulation. However, the simulated flow velocities are slightly lower (in average 17 cm/s) than the measured ones (in average 20 cm/s) on the right-bank and left-bank sides.

Predicted resultant flow velocity from both meshes increased with measured resultant flow velocity, as shown in the results of Pearson's correlation tests in Table 3.2, but there was a bias to the hydraulic model overestimating velocities at low measured velocities and underestimating velocities at high measured velocities. Overall, the CFD model was found to reproduce well the flow field.

TABLE 3.2 – Data summary and results used to assess the level of agreement between simulated mean flow velocity for the no refined mesh and the refined (Code_Saturne) with the measures mean flow velocity from ADCP. n -number of observations; r -correlation coefficient; $BIAS$ -Average bias; $RMSE$ -Root mean square error.

Transects	Average (min-max) ADCP (m/s)	Average (min-max) Code_Saturne (m/s)	n	Pearson (r)	$BIAS$	$RMSE$
Transect 1						
No refined mesh	0.091 (0.02-0.18)	0.075 (0.01-0.12)	93	0.40	0.02	0.12
Refined mesh		0.078 (0.01-0.13)		0.41	0.018	0.09
Transect 2						
No refined mesh	0.087 (0.01-0.15)	0.078 (0.02-0.13)	93	0.51	0.014	0.042
Refined mesh		0.82 (0.02-0.15)		0.51	0.011	0.04
Transect 3						
No refined mesh	0.097 (0.02-0.12)	0.082 (0.06-0.1)	93	0.6	0.016	0.034
Refined mesh		0.087 (0.07-0.11)		0.66	0.01	0.031
Transect 4						
No refined mesh	0.084 (0.04-0.12)	0.078 (0.02-0.12)	93	0.49	5.5×10^{-3}	0.022
Refined mesh		0.079 (0.02-0.13)		0.49	6.6×10^{-3}	0.02

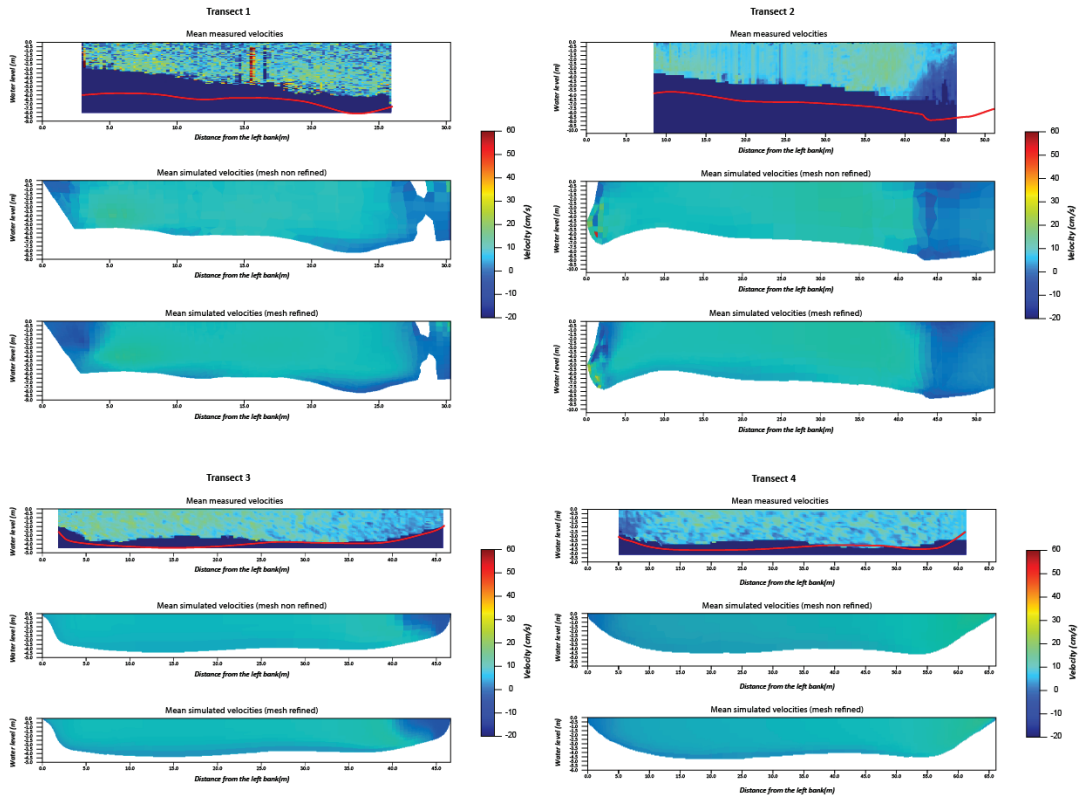


FIGURE 3.4 – Mean velocity field of the four transects upstream of the dam. On site measurements are on top and the numerical results of the non refined and refined meshes at the bottom. The colours represent the magnitude of the longitudinal velocity in cm/s.

3.5.2 Analyses of forebay hydrodynamics

The flow field in the forebay of the dam is of special interest because it influences the downstream fish passage. Several studies suggest that hydrodynamic cues utilized by juvenile fish while navigating through forebay of a dam are flow velocity, flow acceleration and TKE (Haro et al., 1998; Liao et al., 2003; Kemp et al., 2008; Silva et al., 2011, 2012; Goodwin et al., 2006) .

To evaluate flow field conditions that could affect fish bypass efficiency and juvenile fish downstream migration, the flow acceleration is calculated, defined as $a_f(x, y, z) = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2}$, where $a_x = u(\frac{\partial u}{\partial x}) + v(\frac{\partial u}{\partial y}) + w(\frac{\partial u}{\partial z})$, $a_y = u(\frac{\partial v}{\partial x}) + v(\frac{\partial v}{\partial y}) + w(\frac{\partial v}{\partial z})$ and $a_z = u(\frac{\partial w}{\partial x}) + v(\frac{\partial w}{\partial y}) + w(\frac{\partial w}{\partial z})$ are the components of the flow acceleration a_f along x , y and z , respectively and u, v, w are the velocity components along x , y and z , respectively.

Figures 3.5, 3.6 and 3.7 show spatial distribution of flow velocity magnitude, flow acceleration and turbulent kinetic energy at free surface water level (10.77 m) and circulation pattern in the complete domain. The computed flow velocity, flow acceleration and TKE are quite weak, even for regions close to the fish bypass and turbine intake (from 10 cm/s in the reservoir upstream from the dam to 50 cm/s near the bypass; 7.5×10^{-4} m/s² to 3×10^{-3} m/s² and 1.25×10^{-4} m²/s² to 5×10^{-4} m²/s² for flow velocity, flow acceleration and TKE respectively). Positive small accelerations are maintained everywhere in the reservoir optimizing the safe guidance of juvenile salmonids. However, the intensities of flow acceleration and TKE are far too low to affect the juvenile salmonids swimming behavior (Johnson et al., 2009; Goodwin et al., 2014; Scruton et al., 2008; Odeh et al., 2002).

We note a pathway with a higher flow velocity (around 20 cm/s) induced by the fish bypass flow. This could be the path preferred by juvenile fish, knowing that they mainly follow the direction of the bulk flow in the absence of flow acceleration and TKE (Faber et al., 2001; Liao, 2007; Evans et al., 2008; Williams et al., 2012; Coutant and Whitney, 2000).

The surface streamlines (Figures 3.5 exit the model domain through either the turbine intakes or the fish bypass. We note a recirculation in the region near the third gate at the right bank. In the area near the right bank, the fish will mainly swim toward the fish bypass. Whereas, in the area near the left bank, they will mostly swim toward the turbine intakes. However, the location of the bypass and the trashracks installation at the intakes deter fish from entering the intake and guide the fish to the bypass (Larinier and Travade, 2002). An important contribution of the trashracks is the significant reduction of areas occupied by higher velocity. The flow velocity near the turbine intake is of the same order 0.15–0.3 m/s as recommended by the Committee on Hydropower Intakes 1995 for designing trashracks at fish passage facilities. Such a flow field in the vicinity of the powerhouse is expected to aid the passage of juvenile fish to the bypass and reduce the possibility of the juvenile fish being entrained into the turbine intake flow.

Figures 3.5, 3.6 and 3.7 show also flow velocity, flow acceleration and TKE intensities at three vertical transverse cross section, across the width of the reservoir. Sections a, b and c are near the turbine intakes, near the fish bypass, and approximately 80m upstream of the dam, respectively.

The spatial variation of flow velocity, flow acceleration and TKE does not change with water depth in the vertical transverse cross section in the region upstream of the dam (Figures 3.5, 3.6 and 3.7). We note spatial variations of the hydrodynamic parameters when approaching the fish bypass and the turbine intake on the first 3 meters below the free surface (in sections a and b); from 1.5 m/s to 3 m/s, from 1.5×10^{-3} m/s² to 3×10^{-3} m/s² and from 2.5×10^{-4} m²/s² to 5×10^{-4} m²/s², for flow velocity, flow acceleration and TKE respectively. We also observe spatial variations of flow

acceleration and TKE near the turbine intakes on the left.

The hydrodynamic parameters vary very little spatially over the water column. Spatial variations of flow acceleration and TKE are found near the water intakes. However, these parameters are too weak to affect the juvenile salmonids swimming behavior. In dams such as Poutès where the hydrodynamic parameters are very low compared to juvenile fish sensitivity, we can discuss the need to conduct 3D telemetry monitoring and favor 2D monitoring to study fish behavior in relation to hydrodynamic parameters. The use of 2D telemetry implies that fish are assumed to swim at a constant depth. Considering the small variations of hydraulic conditions in the water column, the analysis of smolt behavior at a constant water depth remains realistic. This is especially relevant since smolts tend to swim close to the free surface.

Also, the development of the three-dimensional hydrodynamic model at Poutès allows us to understand and know the hydraulic conditions at a fine scale with regard to the smolt. Indeed, the mesh size of the CFD model varies from 20 cm to 2m compared to the size of the smolt which is about 15 cm on average.

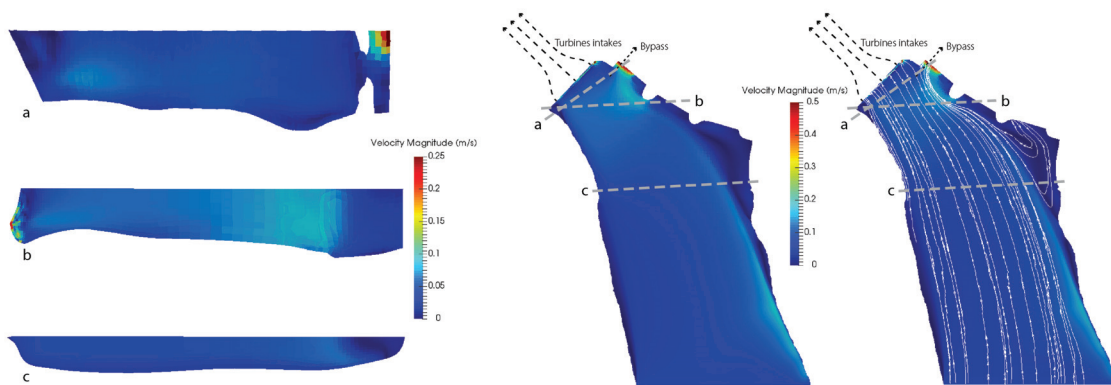


FIGURE 3.5 – Spatial variations of flow velocity at 10,77 m elevation, flow velocity with streamlines and flow velocity intensity at three vertical transverse cross-section : (a) transverse cross-section near the turbine intake, (b) transverse cross-section near the fish bypass, and (c) approximately 80m upstream of the dam.

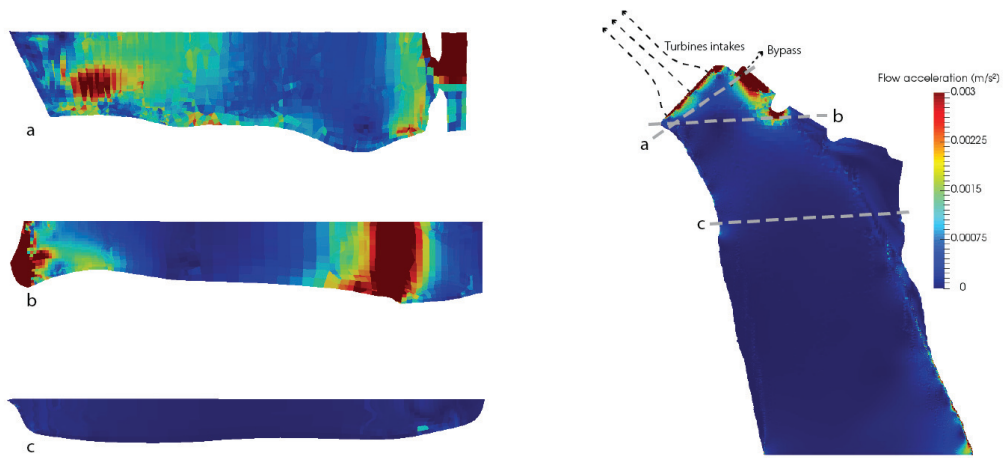


FIGURE 3.6 – Spatial variations of flow acceleration at 10,77 m elevation, and flow acceleration intensity at three vertical transverse cross-section : (a) transverse cross-section near the turbine intake, (b) transverse cross-section near the fish bypass, and (c) approximately 80m upstream of the dam.

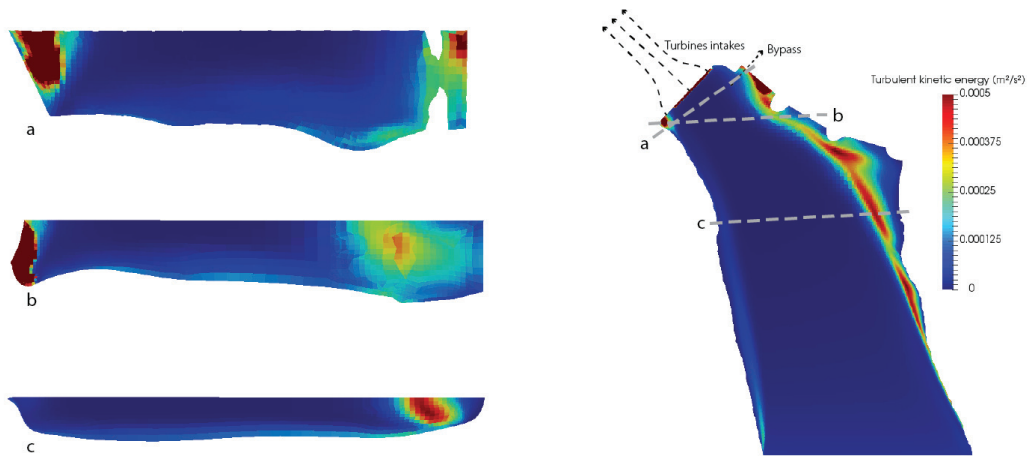


FIGURE 3.7 – Spatial variations of TKE at 10,77 m elevation, and TKE at three vertical transverse cross-section : (a) transverse cross-section near the turbine intake, (b) transverse cross-section near the fish bypass, and (c) approximately 80m upstream of the dam.

3.6 Conclusion

A 3D CFD model of the forebay of the Poutès dam has been presented in this paper. The distinguishing features of the model are : (a) a large domain with complex bathymetry ; (b) a fish bypass is located upstream of the turbine intake. The computational mesh extends 200 m upstream of the dam and consists of approximately 6×10^5 nodes cells.

The CFD model was validated by comparing velocity components in the two coordinate directions against field data (ADCP) along four transects. In general, the agreement between the model and data was quite good and consistent with previously reported comparisons by other researchers.

A detailed analysis of the forebay hydrodynamics in terms of the spatial distributions of flow velocity, flow acceleration and turbulent kinetic energy has been provided.

The paper demonstrates the utility of CFD models in investigating a complex hydraulic engineering problem related to juvenile fish passage facility at a dam. The CFD model will help the design of fish passage solutions and is fundamental for a comprehensive understanding of fish swimming movement in relation to their hydrodynamic environment.

Chapitre 4

Analyse exploratoire du comportement des saumons atlantiques juvéniles en fonction des conditions hydrauliques (duplication directe du papier Ben Jebria et al., 2021-Journal of Ecohydraulics)

Contents

4.1	Préambule	66
4.2	Introduction	68
4.3	Materials and methods	69
4.3.1	General approach	69
4.3.2	Study area	70
4.3.3	Fish telemetry	71
4.3.4	CFD modeling	71
4.3.5	Validation of simulated hydraulics	73
4.3.6	Fish navigation and propulsion force estimation	73
4.3.7	Influence of hydraulic conditions on fish behavior and corresponding navigation	74
4.3.8	Data analysis	75
4.4	Results	76
4.4.1	CFD simulations combined with smolt trajectories at Poutès	76
4.4.2	How do smolt behave depending on hydraulic conditions intensities?	77
4.4.3	How do hydraulic conditions influence smolt's behavior?	78
4.4.4	How do smolt orient themselves according to their swimming behavior?	78
4.5	Discussion	79
4.5.1	Influence of flow velocity, flow acceleration and TKE on smolt behavior	79
4.5.2	Limitations and perspectives	80
4.6	Conclusion	81

4.1 Préambule

Nous avons pu voir que le mouvement du poisson est lié à l'hydraulique (Goodwin et al., 2014; Nestler et al., 2008). En outre, ces dernières années, grâce aux améliorations des capacités de calcul et des données acquises sur le comportement des poissons via la télémétrie, des couplages de modèles hydrauliques et de modèles de comportement de poissons se développent afin de fournir des informations sur le comportement des poissons en dévalaison par rapport aux conditions hydrauliques lorsqu'ils s'approchent des obstacles de la rivière (Aarestrup et al., 1999; Moser et al., 2005; Burke and Jepson, 2006; Keefer et al., 2008; Johnson and Dauble, 2006).

La capacité à comprendre comment une espèce de poisson réagit aux conditions hydrauliques en amont des obstacles, ce qui les attire et ce qui les repousse, est la clé du développement et de la conception d'installations de franchissement réussies. En effet, la connaissance du comportement spatio-temporel des poissons (par exemple leurs déplacements) est nécessaire pour comprendre puis faciliter la dévalaison des poissons à l'approche d'ouvrages de franchissement. Il est essentiel de comprendre quelles sont les réponses comportementales aux conditions hydrauliques locales qui reflètent les processus de décision des poissons - poursuite ou rejet d'un chemin.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser l'effet des conditions hydrauliques sur le comportement des saumons atlantiques juvéniles dans un grand réservoir en amont d'un barrage pendant la dévalaison. Le comportement des smolts a été caractérisé par leur force de poussée en utilisant la deuxième loi de Newton afin de mieux préciser l'interaction entre le poisson et l'eau. Pour calculer ces forces, les vitesses et accélérations des poissons et les conditions hydrauliques rencontrées par les poissons le long de leurs trajectoires ont été évaluées. La télémétrie acoustique combinée à la modélisation 3D de la dynamique des fluides (CFD) a caractérisé le comportement de nage des smolts dans le réservoir sous différentes conditions hydrauliques. Plus précisément, nous avons exploré comment les conditions hydrauliques influencent l'orientation des poissons en fonction de la direction de l'écoulement, la direction du déplacement des poissons et la force de poussée des poissons. Parmi toutes les variables hydrauliques possibles fournies par les simulations 3D CFD, nous nous sommes concentrés sur la vitesse du fluide, l'accélération du fluide et l'énergie cinétique turbulente (TKE) à chaque emplacement enregistré du poisson, car ces variables se sont avérées être des facteurs importants affectant le comportement des poissons (Haro et al., 1998; Liao, 2007; Johnson et al., 2009; Gao et al., 2016).

Cette étude a permis de mieux comprendre comment les conditions hydrauliques influencent le mouvement des poissons et in fine leurs trajectoires au sein d'une retenue.

Coupling 3D hydraulic simulation and fish telemetry data to characterize the behavior of migrating smolts approaching a bypass

BEN JEBRIA Noor¹, CARMIGNIANI Rémi², DROUINEAU Hilaire³, DE OLIVEIRA Eric¹, TETARD Stéphane⁴ and CAPRA Hervé⁵

¹EDF R&D, 6 quai watier 78400 Chatou, France ;

²LHSV, Ecole des Ponts, CEREMA, EDF R&D, Chatou, France ;

³INRAE, 50 Avenue de Verdun, 33612 Cestas, France ;

⁴ICEO, 220 rue des Ailes, 85440 Talmont Saint Hilaire, France ;

⁵INRAE RiverLy, Villeurbanne, France.

Abstract

Human-induced river fragmentation is a major threat to migratory fish species. Restoring river connectivity requires the construction of fish passage solutions, such as fishways for upstream and downstream migration. While many studies focused on the upstream migration of diadromous fishes, and especially of adult Atlantic salmon (*Salmo salar*), we analyze juvenile behavior under different hydraulic conditions at reservoir to improve the development of effective bypass systems for downstream passage of salmon smolt.

Based on coupling three-dimensional (3D) computational fluid dynamics (CFD) simulations to smolt positions tracked by two-dimensional (2D) telemetry, the present study aimed to explore smolt behavior in relation to hydraulic cues. More specifically, we explored how hydraulic conditions influence fish behavior and how fish navigate depending on this behavior. In 2017, 23 smolts were tracked in the reservoir of Poutès (Allier River, France), associated with different turbine discharge rates. 3D CFD simulations were performed and validated against field measurements in the reservoir upstream of the hydropower plant.

The study of fish displacements in relation to flow conditions provided new insights with the use of thrust force, swimming orientation and direction as means to precisely characterize smolt behavior, which can help in the design of downstream migration passage facilities. At Poutès dam, flow velocity, flow acceleration and turbulent kinetic energy are very low and therefore can lead to fish disorientation. However, results underlined that having a minimum flow velocity of 20 cm/s in reservoirs is sufficient to prevent delay and allow fish navigation.

keywords : *Computational fluid dynamics ; Salmo salar ; Fish behavior ; Downstream migration ; Swim path*

4.2 Introduction

Ecosystem fragmentation is a major threat to biodiversity and one of the main challenges for the conservation and restoration of aquatic environments (Malmqvist and Rundle, 2002; Strayer and Dudgeon, 2010; Neeson et al., 2015). In aquatic ecosystems, human-induced longitudinal barriers, such as dams and weirs, are partly responsible for the decline in fish populations. The impact is even greater on diadromous species with life-cycles spanning marine and freshwater ecosystems. By blocking migration, river fragmentation is thought to be the main cause of the extinction of some populations or their confinement to restricted areas in river basins (Porcher and Travade, 1992; Kondolf, 1997; Coutant and Whitney, 2000; Larinier, 2001; Fukushima et al., 2007). Among human-induced obstacles to migration, hydropower plants pose an additional risk during migration : passage through turbines can cause direct injury and mortality (Baras and Lucas, 2001; Larinier, 2001; Thorstad et al., 2008; Limburg and Waldman, 2009; Bunt et al., 2012). Some large dams also disorient migratory fish by affecting stream flow (Ovidio et al., 2016; Schwinn et al., 2019) and potentially delaying migration (McCormick, 1998; Marschall et al., 2011).

One of the most common means of restoring the continuity of watercourses is fish passage solutions (FPS), with variable effectiveness (Noonan et al., 2012). Poor efficiency can sometimes result from unsuitable hydraulic conditions inside the FPS, but also from a lack of attractiveness for target species. Fish must locate the area influenced by the flow from the fishway to the FPS entrance (Groux et al., 2017). The development of effective fish passage therefore depends on understanding the behavioral response to hydraulic conditions that may attract or repel fishes. While much attention has been paid to upstream passage solutions, knowledge is still lacking, especially for downstream passage (Larinier and Travade, 2002; Williams et al., 2012; Silva et al., 2020).

It is well known that fish can sense variations in water pressure and velocity by means of their lateral line and inner ear (Dijkgraaf, 1963; Kalmijn, 1989; Montgomery et al., 1997; Braun and Coombs, 2000; Montgomery et al., 2001; Bleckmann and Zelik, 2009; Mogdans, 2019). For juvenile Atlantic salmon (known as smolts) undertaking their seaward migration, changes in hydraulic conditions, as reflected in water velocity, turbulence and acceleration, provide the major cues in seeking the migration pathway (Haro et al., 1998; Liao et al., 2003; Liao, 2007; Kemp et al., 2008; Tarrade et al., 2008; Enders et al., 2009; Johnson et al., 2009; Silva et al., 2011, 2012; Gao et al., 2016). However, it is less understood how fish respond to these stimuli. Studies showed that smolts tend to avoid areas with rapid changes in water velocity (Haro et al., 1998; Kemp et al., 2005, 2008; Enders et al., 2009) and are attracted towards flow with less turbulence and lower velocity and acceleration. Moreover, they tend to follow the bulk flow (Faber et al., 2001; Liao, 2007; Evans et al., 2008; Williams et al., 2012). For smolts swimming in forebays close to turbines and bypass, where mean average flow velocities and turbulence intensities are higher, fish can experience disorientation. Therefore, they swim faster to diverge from the flow and displayed positive rheotaxis (tail-first; Haro et al. 1998; Enders et al. 2003, 2009; Silva et al. 2020).

Recent telemetry studies provided valuable information on fish migration routes during downstream migration and improved our understanding of migrating fish behavior near dam structures (Jansen et al., 2007; Calles et al., 2010; Pedersen et al., 2012; Nyqvist et al., 2017a; Thorstad et al., 2017; Li et al., 2018). Coupled with hydraulic data, they provide insights into how hydraulic cues influence navigation in dam reservoir (Johnson et al., 2000; Faber et al., 2001; Johnson and Dauble, 2006; Timko et al., 2007; Evans et al., 2008; Johnson et al., 2009; Steig and Johnston, 2010; Khan et al., 2012; Arenas et al., 2015). Results show that as flow acceleration increases Pacific salmon smolts,

steelhead trouts (Johnson et al., 2000; Faber et al., 2001; Evans et al., 2008; Johnson et al., 2009; Enders et al., 2009; Vowles et al., 2014; Arenas et al., 2015) and Atlantic salmon smolts (Szabo-Meszaros et al., 2019; Silva et al., 2020) tend to actively swim instead of drift, orient themselves against the flow and swim upstream. Moreover, the effort made by fish to resist the flow increases.

During the last decade, hydraulic models and fish behavior models have been coupled to support the design of fish passages (Goodwin et al., 2006, 2014). However, most of these studies have focused on large dam structures with high powerhouse discharge, such as the Columbia River hydroelectric plants in the United States (Haefner and Bowen, 2002; Scheibe and Richmond, 2002; Goodwin et al., 2006, 2014). Yet, less studies have been conducted on dams with large reservoirs and low powerhouse discharges, despite these sites higher prevalence for relatively quiescent flows known to disorient fish (Coutant and Whitney, 2000).

In view of this, the present study aimed to analyze the effect of hydraulic conditions on Atlantic salmon smolt behavior in a large reservoir upstream of a hydropower plant during their downstream migration. The fish behavior was characterized by their thrust forces. To compute these forces, fish velocities and hydraulic conditions encountered by the fish along their trajectories were evaluated. Acoustic telemetry combined with 3D computational fluid dynamics (CFD) modeling characterized smolt swimming behavior in the reservoir under different hydraulic conditions. More specifically, we explored how hydraulic conditions influenced fish orientation in relation to flow direction, direction of the fish displacement and fish thrust force.

4.3 Materials and methods

4.3.1 General approach

In this study, we coupled 2D fish telemetry data with 3D CFD simulation results to better understand how the hydraulic conditions affected fish movement. Among all possible hydraulic variables provided by 3D CFD simulations, we focused on time-average flow velocity, flow acceleration and turbulent kinetic energy (TKE) at each fish location because those variables proved to be important factors affecting fish behavior (Haro et al., 1998; Liao, 2007; Johnson et al., 2009; Gao et al., 2016). By combining fish trajectory (velocity and acceleration) and the physical forces acting on the fish (due to time-average flow velocity), fish thrust magnitude and orientation were determined by solving Newton's second law at every recorded fish location. This was used to explore the influence of hydraulic conditions on fish swimming behavior.

4.3.2 Study area

The Poutès dam (France) is located 900 km from the Atlantic Ocean, on the Allier River, the main left-bank tributary of the Loire River (Figure 4.1). The Atlantic salmon has now disappeared from most of the major rivers of Europe but still migrates in the Loire-Allier River system, although the population has declined dramatically by around 80 % in the late eighties (Cuinat, 1988; Dauphin and Prévost, 2013).

The dam is 85 m wide and 18 m high, equipped with three spillway gates (each 14 m long). The turbine intake is 24 m long and 5.7 m high. It is located on the left bank 7 m below the surface in normal operating conditions (water depth of 15.7 m). It is equipped with a trashrack with 3 cm bar spacing. It supplies three Francis turbines (#1/2 : $16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; #3 : $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). It can deliver a maximum flow of $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ to the Monistrol powerhouse. A surface bypass is located upstream of the turbine intake on the left bank (Figure 4.1). It is operating during the salmon downstream migration period from March to June. It is mounted on a gate automatically regulated according to water level, to ensure a continuous bypass flow of $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, representing 7.1% of the maximum turbine intake (Tétard et al., 2021).

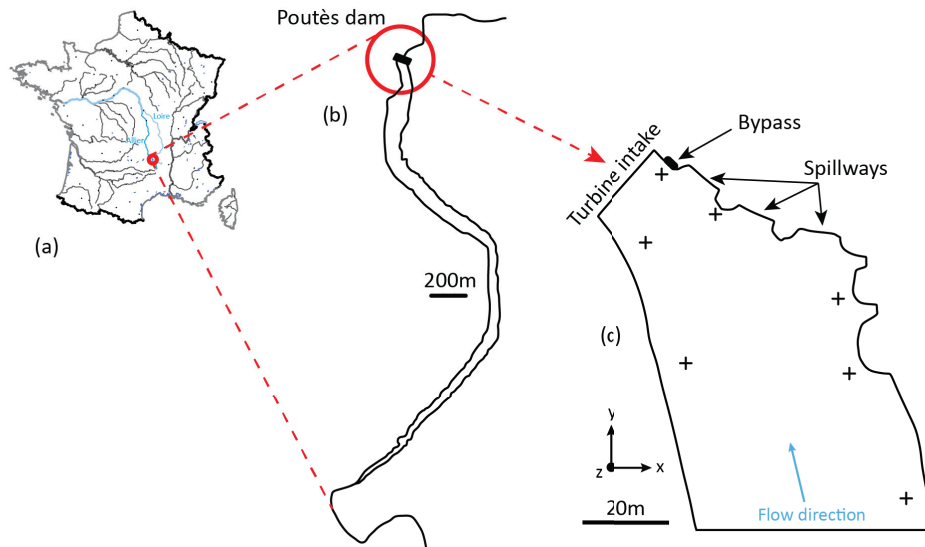


FIGURE 4.1 – Study area of smolt migration : (a) location of the Allier River in France, (b) location of Poutès dam zone on the Allier River, (c) zoom on the dam and simulation zone. The crosses indicate hydrophone locations in 2017 (Tétard et al. (2021)).

4.3.3 Fish telemetry

To study the downstream movement of Atlantic salmon in the forebay of the Poutès dam, eleven WHS4000 hydrophones (Lotek Wireless Inc.) were positioned near the dam (see Figure 4.1, c) : seven in the reservoir 80 m upstream of the dam and four in the bypass stretch 300 m downstream to confirm passage through the surface bypass. The system tracked fish in two dimensions with a median precision of 1.1 m (Tétard et al., 2021). The study is performed at water temperature of 6 to 10.9 °C (Tétard et al., 2019).

Two rotary screw traps were used to catch wild migrating fish, as described in Tétard et al. (2021). However, as the number of fish trapped was insufficient, some smolts from the National Wild Salmon Conservatory (CNSS) fish farm were used to ensure that a substantial number of fish were tagged.

In this study, 23 juvenile Atlantic salmon were tracked : 8 of them are wild fishes and 15 are from hatchery fish. In total, 1,618 positions were recorded (193 and 1,425 positions for wild and hatchery fish respectively). Mean total smolt length was $L_{sm} = 152$ mm (152 ± 30 and 164 ± 9.7 mm for wild and hatchery fish respectively) and mean body weight $m_{sm} = 30.0$ g (28 ± 16 and 40 ± 7.4 g for wild and hatchery fish respectively ; Tétard et al. 2021).

For each fish, the average time between two detections was 5 sec (Tétard et al., 2021). The succession of a fish position through time allows the reconstruction of trajectories. When the time between two detections was greater than 37 sec, we considered the two locations as independent leading to two separate trajectories. This delay corresponds to the threshold after which two positions are not significantly autocorrelated. We observed a total of 134 trajectories (8 and 126 trajectories for wild and hatchery fish respectively).

4.3.4 CFD modeling

In order to get realistic information about the hydraulic conditions encountered by smolts while they travelled through the dam's reservoir, we used numerical simulations. The Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) equations with $k - \epsilon$ turbulence model were solved using a finite volume method to obtain the three-dimensional components of velocity, pressure, turbulent kinetic energy (TKE) and the rate of turbulence dissipation. We used the open-source software Code_Saturne (version 6.0, R&D 2015) for the 3D simulations of the flow in the Poutès forebay.

Boundary conditions based on 2017 hydrology data were used to assign a fixed flow rate and water elevation to the entrance and exit of the system (bypass and turbine intake). Flow rate values for each configuration are listed in Table 4.1. As we expected little surface deformation and discounted wind effects on the flow, we modeled the free surface using a homogeneous Neumann for the scalar fields and a zero Dirichlet for the vector fields. In other words, the surface behaved like a symmetric plane or mirror in the simulations. The remaining boundaries were assumed to be rough walls with default roughness height of 0.01 m.

The 3D mesh was built using the open-source Salomé software (version 8.3.0), based on the planes provided by the operator. The mesh was constituted of 6×10^5 hexaedric elements of variable size (varying from 20 cm near the turbine intake and the spillway gates, to about 2 m in the reservoir). A convergence study was performed to validate the simulation. We verified that the refined mesh

did not change flow velocity at fish positions. We concluded that this resolution was sufficient to get realistic information on the flow.

Numerical simulations were run with constant flow rate conditions, letting the simulations converge to a steady state. The simulations were performed using 56 CPUs; computational time to steady state was approximately 30 minutes.

Numerical simulations allowed us to evaluate the hydraulic variables influencing smolt behavior at each position. The module of the total acceleration was calculated as :

$$a_f(x, y, z) = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2}$$

where $a_x = u(\frac{\partial u}{\partial x}) + v(\frac{\partial u}{\partial y}) + w(\frac{\partial u}{\partial z})$, $a_y = u(\frac{\partial v}{\partial x}) + v(\frac{\partial v}{\partial y}) + w(\frac{\partial v}{\partial z})$ and $a_z = u(\frac{\partial w}{\partial x}) + v(\frac{\partial w}{\partial y}) + w(\frac{\partial w}{\partial z})$ are the components of the flow acceleration a_f along x , y and z , respectively and u, v, w are the velocity components along x , y and z , respectively. Hereafter, we call $\vec{u}_f$ the time-average velocity and the subscript f designates the fluid. The module of the time-average velocity u_f was calculated as :

$$u_f(x, y, z) = \sqrt{(u)^2 + (v)^2 + (w)^2}$$

where u, v and w are the components of flow velocity along x, y and z .

The turbulent kinetic energy k is the mean kinetic energy per unit mass associated with vortices in a turbulent flow. It is calculated as :

$$k = \frac{1}{2}((u')^2 + (v')^2 + (w')^2)$$

It corresponds to half the sum of the variances of the velocity of fluctuation. Where u' the velocity of fluctuation is the difference between the instantaneous velocity u and the average velocity ; $\vec{u}' = \vec{u} - \vec{\bar{u}}$ and $\vec{\bar{u}} = \vec{u}_f$.

The different numerical simulations to estimate the hydraulic conditions encountered by the fish at Poutès during telemetry measurement in 2017 are listed in Table 4.1. For simplification, only fish measurements during steady hydraulic conditions were analyzed. Since we only had 2D telemetry data, we assumed that fish swim two meters below the water surface.

TABLE 4.1 – Numerical simulations estimating hydraulic conditions encountered by smolts, and the number of smolts and smolt's positions observed

Number of the numerical simulation	Water depth (m)	River		Powerhouse		Spillway		Number of smolts : total/wild	Number of smolt's positions : total/wild
		Discharge (m ² /s)	cross-sectional average velocity (m/s)	Discharge (m ² /s)	cross-sectional average velocity (m/s)	Discharge (m ² /s)	cross-sectional average velocity (m/s)		
1	11	29	0.12	15	0.42	14	1.25	3/0	85/0
2	11	40	0.17	27	0.76	13	1.16	2/2	145/145
3	11	78	0.33	30	0.85	48	1.2	6/6	48/48
4	15.7	7	0.029	2	0.056	5	0.45	7/0	766/0
5	15.7	15	0.063	10	0.28	5	0.45	5/0	574/0

4.3.5 Validation of simulated hydraulics

Simulated hydraulic conditions were compared to measured data from an acoustic doppler current profiler (ADCP) to validate the CFD model. Predicted resultant flow velocity increased with measured resultant flow velocity (Pearson's correlation test, $t = 4.362$, $p_value < 0.001$, $r = 0.50877$), but there was a bias to the hydraulic model overestimating velocities at low measured velocities and underestimating velocities at high measured velocities. The hydraulic model was found to reproduce well the flow field in the study area.

4.3.6 Fish navigation and propulsion force estimation

We used fish thrust force to characterize different smolt swimming behaviors and to determine fish orientation at each fish position. Fish thrust force quantifies the effort that the fish exerts upon the water to travel from one measured location to the next.

Thrust force and orientation describe more accurately how fish respond to what they perceive. Thrust force is evaluated by solving Newton's second law, following the approach of Arenas et al. (2015). Fish acceleration is given by the momentum equation :

$$m_{sm} \frac{d\vec{u}_g}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_T, \quad (4.1)$$

where m_{sm} (kg), $\vec{u}_g$ (m/s), $\vec{F}_D$ and $\vec{F}_T$ (N) are the total fish mass, fish velocity with respect to the ground, fish drag and thrust force, respectively. Ground velocity, $\vec{u}_g$, and fish acceleration, $d\vec{u}_g/dt$ were calculated from fish positions measured by acoustic telemetry. A smoothing technique was applied to the measured fish positions to remove ground velocity values beyond swimming capacity. Videler (1993) defined this threshold as :

$$||\vec{u}_{g,max}|| = 0.4 + 7.4L_{sm} = 1.5 \text{ m/s}; \quad \text{where } L_{sm} = 152 \text{ mm is smolt length.}$$

Values above $2||\vec{u}_{g,max}||$ were discounted as outliers, above smolt swimming capacity.

Eq.4.1 allowed us to calculate fish thrust, once $\vec{F}_D$ was known. Drag force was modeled as :

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2}\rho A_{sm} C_{d,sm} |\vec{u}_s| \vec{u}_s, \quad (4.2)$$

where ρ (kg/m³) is the fluid density, A_{sm} (m²) the smolt wetted area, $C_{d,sm}$ the drag coefficient and u_s the smolt velocity in relation to the flow (hereafter called swimming velocity). Swimming velocity was evaluated using the velocity composition relation : $\vec{u}_g = \vec{u}_s + \vec{u}_f$. Wetted surface was evaluated as :

$$A_{sm} = S_C L_{sm}^{S_e}, \quad (4.3)$$

with $S_C = 0.28 \text{ m}^2$ a reference area and $S_e = 2.11$ a fitting constant (Webb, 1976). The expression to calculate drag coefficient $C_{d,sm}$ depends on whether the fish is actively swimming or drifting with the flow. It is derived from the data of Webb et al. (1984) :

$$C_{d,sm} = \begin{cases} \frac{493.9}{Re_{sm}^{0.922}} & \text{if swimming,} \\ \frac{0.072}{Re_{sm}^{0.2}} & \text{if drifting,} \end{cases} \quad (4.4)$$

where Re_{sm} corresponds to the smolt Reynolds' number defined as :

$$Re_{sm} = \rho |\vec{u}_s| \frac{L_{sm}}{\mu}, \quad (4.5)$$

with μ (Pa.s), ρ (kg/m³) fluid dynamic viscosity and fluid density respectively. Note that this Reynolds' number is defined using $|\vec{u}_s|$ as fish velocity relative to the fluid.

Given the ground velocity and fish acceleration obtained from the telemetry and flow velocity data of the CFD simulations, we derived fish thrust by solving Eq.4.1. We solved this equation at each fish position i :

$$\vec{F}_T^i = m_{sm} \frac{\vec{u}_g^{i-1} - \vec{u}_g^i}{\Delta t} - \vec{F}_D^i,$$

where Δt is the time interval between the two consecutive positions. We first assumed that the fish was swimming passively (i.e. drifting), as explained below. Then, if $|\vec{F}_T^i| < 6 \times 10^{-4}$ N, we went on to the next step, using passive drag.

Otherwise, we computed thrust force with active (i.e. swimming) drag.

Based on these fish thrusts, we defined three behavioral states : passive, endurance and burst. Following Arenas et al. (2015), we assumed that fish thrust 6×10^{-4} N corresponds to passive swimming : i.e., fish passively moving with the flow. This threshold corresponds to 10% of the fish thrust at the maximum sustained speed measured by Tang and Wardle (1992). Between 6×10^{-4} N and fish thrust at maximum sustained speed (6×10^{-3} N), fish were considered to be in an “endurance state”. Maximum sustained speed corresponds to the maximum speed reachable in endurance swimming : i.e., an activity that can be maintained over a long period of time and uses only aerobic muscle fibers (Mu et al., 2019). Above the maximum sustained speed, the fish was in a “burst state”. Burst swimming is swimming behavior that cannot be maintained for a long time, that requires both aerobic and anaerobic muscle fibers, and can correspond to unsuitable predation conditions or breaking through water flow barriers (Mu et al., 2019).

4.3.7 Influence of hydraulic conditions on fish behavior and corresponding navigation

The resulting dataset was composed of a set of rows, each row corresponding to a fish position, estimated fish thrust and associated fish behavior and all the hydraulic factors at this point. To characterize fish orientation, we analyzed the angle β (Figure 4.2) between fish thrust and time-average flow velocity vectors. This determined fish orientation in relation to flow direction : i.e., head oriented upstream or downstream. Here we assumed that the fish thrust force direction corresponded to the fish direction. We also characterized fish swimming direction by the angle θ between fish ground velocity and time-average fluid velocity vectors. This determined how far fish followed the direction of the flow. In the smolt's frame of reference, we also described its relative swimming direction as the angle γ between fish thrust and velocity with respect to the flow (Figure 4.2). It allowed us to know fish swimming direction in their referential.

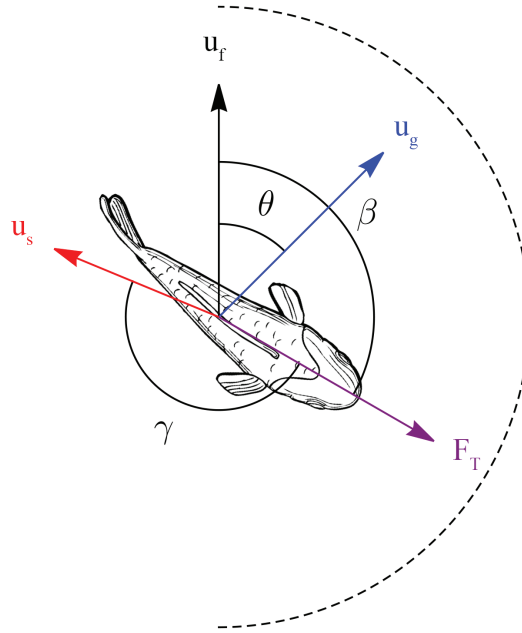


FIGURE 4.2 – Smolt swim orientation and direction. Orientation is characterized by angle β between time-average flow velocity ($\vec{u}_f$) and fish thrust ($\vec{F}_T$) vectors. Direction is characterized by angle θ between time-average flow velocity ($\vec{u}_f$) and fish velocity with respect to the ground ($\vec{u}_g$). Relative direction is characterized by the angle γ between fish thrust ($\vec{F}_T$) and fish velocity with respect to the flow ($\vec{u}_s$).

4.3.8 Data analysis

We analyzed how time-average flow velocity, flow acceleration and turbulent kinetic energy (TKE) (coming from 3D CFD model) influenced smolt thrust force, swimming orientation and direction at every measured fish position (coming from acoustic telemetry), with fish positions all pooled together.

These three hydraulic conditions were strongly positively inter-correlated : correlation coefficient $r^2 = 0.918$ for time-average flow velocity and TKE, $r^2 = 0.863$ for flow acceleration and time-average flow velocity and $r^2 = 0.849$ for flow acceleration and TKE. As such, it was not possible to disentangle their relative effects. In view of this, a principal component analysis of the three hydraulic variables was carried out, followed by hierarchical clustering on principal components to detect groups of similar hydraulic conditions in the dataset. This led us to distinguish four types hydraulic clusters : very low, low, medium or high intensity, as described in Table 4.2. Based on this, every fish positions is associated to a hydraulic condition intensity.

To assess the effect of hydraulic conditions intensities on smolt behavior, we compared their distributions associated with each behavioral state and smolt swimming orientation and direction with respect to the flow. Kruskal-Wallis non-parametric tests were carried out to detect significant differences between distributions. This is a statistical test to determine whether differences between medians are significant.

TABLE 4.2 – Ranges of hydraulic conditions intensities obtained by hierarchical clustering on principal components.

Hydraulic conditions	Intensities			
	Very low	Low	Medium	High
Time-average flow velocity (m/s)	$0.01 \leq u_f < 0.02$	$0.02 \leq u_f < 0.04$	$0.04 \leq u_f < 0.2$	$u_f \geq 0.2$
Flow acceleration (m/s^2)	$2 \times 10^{-6} \leq a_f < 4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6} \leq a_f < 3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5} \leq a_f < 3 \times 10^{-4}$	$a_f \geq 3 \times 10^{-4}$
TKE (m^2/s^2)	$4 \times 10^{-7} \leq k < 1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6} \leq k < 3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6} \leq k < 8 \times 10^{-5}$	$k \geq 8 \times 10^{-5}$

4.4 Results

4.4.1 CFD simulations combined with smolt trajectories at Poutès

Figure 4.3 shows that for numerical simulations number 1, 2 and 3 most of the flow was directed toward the turbine intake. A maximum time-average flow velocity of about 0.3, 0.4 and 0.5 m/s respectively was observed near the turbine intake and bypass.

For numerical simulations number 4 and 5, there was very low time-average flow velocity (in average equal to 0.016 m/s, 0.034 m/s respectively) in the entire reservoir except at the bypass with time-average flow velocity that could reach 0.3 m/s.

For numerical simulations number 1, 2 and 3 where time-average flow velocities are higher (in average equal to 0.12, 0.2 and 0.31 m/s respectively) the trajectories appeared to be much more straightforward and directed towards the bypass, whereas for numerical simulations number 4 and 5 (in average equal to 0.016 m/s, 0.034 m/s respectively) smolts displayed active exploratory behavior in the forebay before finding a pathway. Indeed, smolts spent little time to move downstream for medium and high hydraulic conditions intensities (largely encountered in numerical simulations number 1, 2 and 3) with an average time of 12 (min/max = 8/15), 13 (min/max = 13) and 5 (min/max = 2/11) minutes respectively. While for low hydraulic conditions intensities (largely found in numerical simulations number 4 and 5), smolts needed a significant amount of time to travel through the reservoir with an average time of 6h (min/max = 3 minutes/13 hours) and 24h (min/max = 13 minutes/3 days) respectively.

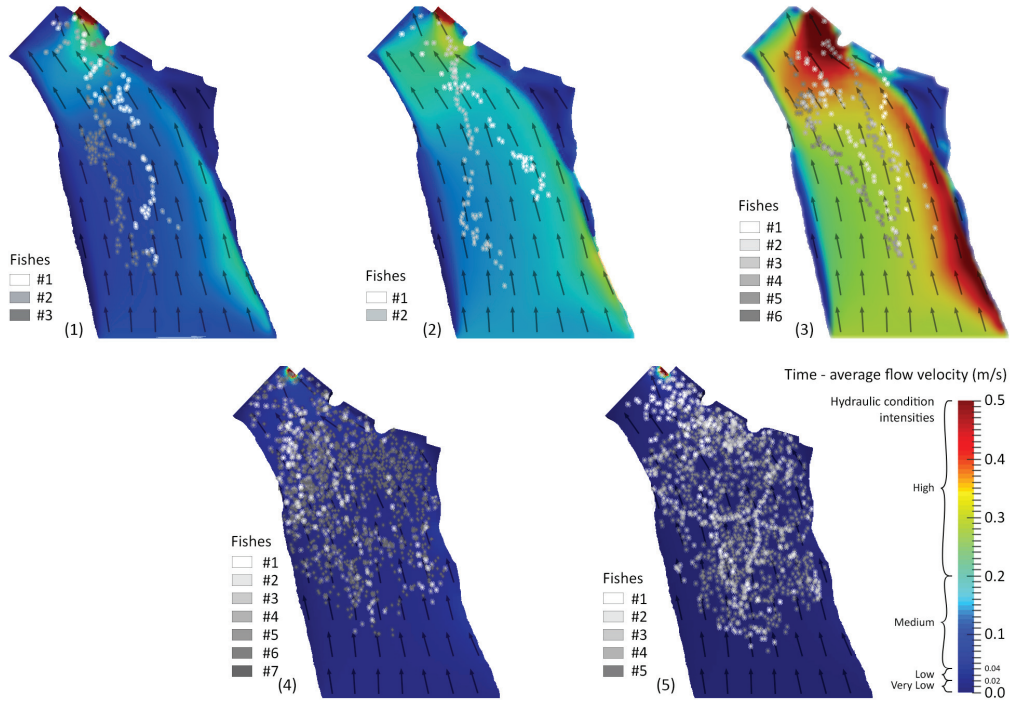


FIGURE 4.3 – Five numerical simulations (time-average velocity for a water depth of 11 m for numerical simulation 1, 2 and 3 and 15.7 m for numerical simulation 4 and 5) combined with smolt trajectories at Poutès. The succession of a fish position through time allows the reconstruction of trajectories. The different colors for the fish positions correspond to different smolt's trajectory. Model input values (water level and discharges) of each numerical simulation are listed in table 4.1.

4.4.2 How do smolt behave depending on hydraulic conditions intensities ?

The swimming behaviors were significantly different depending on hydraulic condition intensities (table 4.3) ($\chi^2 = 88.171$, p-value < 0.001). Table 4.3 indicates that, for lower (very low and low) hydraulic conditions intensities, fish positions were mostly (respectively, 61% and 58%) in the burst swimming state. For higher (medium and high) intensities of hydraulic conditions, fish positions were mostly (respectively, 57% and 69%) in the endurance swimming state. The proportion of passively swimming fish positions was quite low, with not a significant difference between lower (1 to 3%) and the higher (5 to 8%) hydraulic intensities.

TABLE 4.3 – Proportion of the three swimming behaviors at Poutès dam for the different hydraulic conditions intensities (χ^2 test, $\chi^2 = 88.171$, p-value < 0.001).

	Passive swim $F_T < 6 \times 10^{-4} \text{N}$	Endurance swim (Sustained swimming speed) $6 \times 10^{-4} \leq F_T < 6 \times 10^{-3} \text{N}$	Burst swim (burst swimming speed) $F_T \geq 6 \times 10^{-3} \text{N}$
Very low	1%	38%	61%
Low	3%	39%	58%
Medium	5%	57%	38%
High	8%	69%	23%

4.4.3 How do hydraulic conditions influence smolt's behavior ?

Figure 4.4 shows the influence of hydraulic conditions intensities on smolt swimming orientation β and thrust force (Figure 4.4a), and influence of hydraulic conditions on smolt swimming direction θ (Figure 4.4b).

Higher hydraulic conditions intensities were associated with lower fish thrust force (Figure 4.4). In low hydraulic conditions intensities, median thrust force was 7×10^{-3} N (burst swimming state) and decreased to 2.6×10^{-3} N (endurance swimming state) in high hydraulic conditions intensities.

In low hydraulic conditions intensities (Figure 4.4a1,2 and 4.4b1,2), fish orientation was erratic, leading to wide scatter in swimming angles. At intermediate level, thrust was also erratic (Figure 4.4a3), but swimming direction started to follow the flow direction (Figure 4.4b3), suggesting passive transport by the flow. At high intensity, fish navigated in the direction of the flow (Figure 4.4b4) but thrust was often orientated in the opposite direction with a low thrust force (Figure 4.4a4), suggesting controlled drift with the head facing flow direction. Statistical tests confirmed the influence of hydraulic conditions on fish thrust force (Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 92.468$, p-value < 0.001), swimming orientation (Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 13.728$, p-value < 0.01) and swimming direction (Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 118.02$, p-value < 0.001).

Figure 4.5 shows the influence of the apparent flow velocity in the fish referential. According to Figure 4.5, smolt always swam against the apparent flow orientation. At low hydraulic conditions intensities, they induced this apparent flow direction with high thrust with a narrow range of apparent velocity angles. This implied that smolt were swimming straight ahead with little change of direction. At higher hydraulic conditions intensities, smolt thrust force decreased and the range of angles increased slightly. However, we did not observe any change in the distribution of relative swimming direction, regardless of the hydraulic conditions intensities (Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 6.0704$, p-value = 0.1082).

4.4.4 How do smolt orient themselves according to their swimming behavior ?

Figure 4.6 completes figure 4.4 by separating the orientations and directions by swimming behavior. Smolts swam with the head facing the flow direction in a passive swimming state for low hydraulic conditions intensities (very low to low) and oriented in the same direction as the flow direction in a passive swimming state at higher hydraulic conditions intensities (medium to high).

In the endurance swimming state, at low hydraulic conditions intensities, smolts did not have a preferred swimming orientation or direction. Moreover, they swim mainly in burst swimming state with no preferred swimming orientation or direction for low hydraulic conditions intensities.

Smolts followed the direction of the flow, with the head in the same direction as the water flow at medium hydraulic condition intensity and with the head facing the water flow at high hydraulic condition intensity in a burst swimming state. However, they mainly swim in the same direction as the flow, oriented against the flow in an endurance swimming state for higher hydraulic conditions intensities (medium to high).

4.5 Discussion

4.5.1 Influence of flow velocity, flow acceleration and TKE on smolt behavior

Based on 2D telemetry and a hydraulic model, it was possible to show that fish movements were well linked to hydraulic conditions intensity. A minimum time-average flow velocity threshold of 20 cm/s allowed them to move quickly through the reservoir.

The results showed that, at the Poutès dam, the stronger the hydraulic conditions, the lower the fish thrust. At relatively high time-average flow velocity, flow acceleration and turbulent kinetic energy ($u_f \geq 0.2$ m/s, $a_f \geq 3 \times 10^{-4}$ m/s², $k \geq 8 \times 10^{-5}$ m²/s²), juvenile Atlantic salmon were in an endurance swimming state. They tended to move in the same direction as the flow, oriented against the flow. They were drifting.

The fact that fishes switch from negative (facing downstream) to positive rheotaxis (facing upstream) does not necessarily indicate that they want to move upstream, but is more likely a mechanism to increase escape readiness as needed, as hypothesized by Enders et al. (2009).

Under low hydraulic conditions intensity ($0.01 \leq u_f < 0.04$ m/s, $2 \times 10^{-6} \leq a_f < 3 \times 10^{-5}$ m/s², $4 \times 10^{-7} \leq k < 3 \times 10^{-6}$ m²/s²), smolt exhibited greater thrust force, and a burst swimming state predominated. They did not exhibit any predominant swimming orientation or direction; they seemed to be exploring the reservoir. As a result, they could remain in place for a long time and travel a long distance before passing through one of the dam surface outlets (water intake or bypass). In large reservoirs, flow patterns can be barely perceptible for fish, making them disoriented (Schwinn et al., 2019; Tétard et al., 2019).

Even if swim movement appears erratic, smolt were swimming straight ahead (i.e. maintaining their orientation with respect to the ground), which is a notable observation that will be important to consider when modeling smolt behavior in a reservoir where hydraulic conditions intensities are very low.

Overall, juvenile Atlantic salmon upstream of the Poutès dam were mainly swimming actively. This is consistent with studies of smolt behavior according to hydraulics upstream of a dam (Arenas et al., 2015; Johnson et al., 2000, 2009; Faber et al., 2001; Kemp et al., 2005, 2008).

Silva et al. (2020) analyzed how turbulence kinetic energy and flow velocity influenced juvenile Atlantic salmon in the River Mandaselva, in Norway. They obtained three distinct behaviors : swimming in the same direction as the flow at a speed below their endurance state ; diverging from the flow with higher swimming speeds ; and swimming against the flow in a burst state. The first two behaviors were also found in the Poutès dam, but not the third.

According to the literature, swimming against the flow is observed at high hydraulic intensities (Arenas et al., 2015; Johnson et al., 2009; Enders et al., 2012), which are not found in reservoirs with low time-average flow velocity such as the Poutès dam. In such a reservoir, fish tend to explore the environment and then, when they detect sufficient flow, follow it.

Arenas et al. (2015) reported that the three species they had studied (chinook salmon, sockeye salmon and steelhead) exhibited average thrust forces of 1.4×10^{-2} N. This is very close to the thrust force

of Atlantic salmon, which is 10^{-2} N, and it is interesting to compare the responses of the species to hydraulic cues. Pacific salmon showed a tendency to exert higher fish thrust as flow acceleration increases (for flow accelerations above 7×10^{-3} m/s²), and Arenas et al. (2015) postulated a tendency of smolt to resist when flow acceleration increases. In Poutès, such levels of flow acceleration were never reached (maximum, 3×10^{-3} m/s²) and fish never exhibited such resistive behavior. However, Arenas et al. (2015) also noted that the thrust force for sockeye salmon and steelhead decreased for lower flow accelerations (between 4×10^{-3} and 7×10^{-3} m/s²). This range of accelerations was also observed in Poutès, and the Atlantic salmon displayed the corresponding behavior.

To ensure that smolt have optimal downstream migration conditions, there must be little TKE and a low upstream flow acceleration (Johnson et al., 2009; Goodwin et al., 2014). These two conditions, low TKE and low flow acceleration, apply at Poutès, which is a dam with particularly low time-average flow velocities in the reservoir, and can be assimilated to a reservoir with low flow fluctuations. The turbulent kinetic energy is particularly low, with a maximum of 2.8×10^{-3} m²/s². The same applies to flow acceleration, which reaches only 2×10^{-3} m/s². These hydraulic variables do not seem to interfere with smolt swimming motion.

Field and laboratory studies also corroborate this. Scruton et al. (2008) assessed bypass efficiency for juvenile Atlantic salmon at Bishop's Falls Dam in Canada, where forebay conditions are extremely turbulent. They compared the Bishop's Falls bypass efficiency (62–72%) to bypass efficiencies in facilities in the Eastern United States and Canada with less turbulent fluctuations in flow, and found that bypasses associated with less TKE had higher bypass efficiency (80–87%).

The aim of Odeh et al. (2002) experimental study was to improve the understanding of the effects of hydraulic turbulence intensity on juvenile fish; they created varying levels of turbulence intensity that resembled conditions found in the field, and concluded that, at low turbulence intensity, fish were able to swim and maintain vertical orientation.

Silva et al. (2020) reported that, in the main water course, smolts' relatively low TKE values (3×10^{-3} m²/s²) allowed them to maintain stability and swimming capacity.

Most studies analyzing fish behavior during downstream migration were carried out in dams with very high hydraulic conditions intensities. This mainly results in recommendations concerning the upper limits of these parameters to improve the management of hydropower plants. However, we found results for very low time-average flow velocity, flow acceleration and TKE. And this did not seem to disturb smolt's swimming behavior. When time-average flow velocities are very low ($u_f < 2 \times 10^{-1}$ m/s) then it became very difficult for smolts to orient themselves. According to Coutant and Whitney (2000), low time-average flow velocity does not favor smolt orientation and leads to a decrease in migration speed.

4.5.2 Limitations and perspectives

The present study sheds light on swimming behavior upstream of a dam according to several hydraulic conditions. However, since we had 2D telemetry data, we assumed that fish swim two meters below the water surface. This, knowing that according to studies on smolt's behavior, they tend to swim close to the free surface (Coutant and Whitney, 2000; Scruton et al., 2002; Gao et al., 2016). Ideally, 3D telemetry could be used and tracking devices optimized to achieve resolution similar to

that of hydrodynamic models. Moreover, it was previously observed by Tétard et al. (2019), and McCormick (1998) that smolt behavior changes with the period of migration. Therefore, the difference in swimming behavior between hydraulic conditions intensities may be due to the timing of migration, which we did not take into account in our study. However, for the Poutès dam, the important concern is to have a relatively small reservoir to prevent migration delays (Tetard et al., 2016; Tétard et al., 2021). This is what is actually being undertaken for the dam's restoration.

Sensitivity analyses of the estimated forces with respect to positioning errors and errors of the CFD model should also be considered in order to achieve finer results than in this study, which should be considered as preliminary.

Despite the limited number of individuals considered in the analysis, the high temporal resolution of detection allowed us to have a data set with 1618 locations. However, since each individual was released in specific environmental conditions, there might be some confusions between inter-individual differences and environmental conditions. Ideally, a larger number of tagged individuals would have limited this risk but it was not possible to catch more wild fishes because of the status of the population (Dauphin and Prévost, 2013). Farmed salmon had been used in the telemetry study to increase the number of individuals. First analysis by Tétard et al. (2021), did not detect any behavioral differences between wild and farmed salmon. Other authors found opposite results in other sites. Aarestrup et al. (1999) suggested that observed differences among wild and farmed salmon in migratory behavior were related to genetic component. However, in the wild river, farmed salmon originate from local wild genitor and consequently are genetically similar to wild salmon. Nyqvist et al. (2017b) did not see any behavioral difference between wild and hatchery fish while many studies reported differences between them (McCormick, 1998; Thorstad et al., 2012). Given the observations of Tétard et al. (2021), the limited number of wild salmon and the genetic similarity between wild and farmed salmon, we did not explore for potential differences due to the origin of salmon.

Given that hydraulics is a key factor in fish behavior (Nestler et al., 2008; Goodwin et al., 2014), the coupling of telemetry and CFD appears to be an appropriate approach. The framework proposed by Arenas et al. (2015) allowed rigorous coupling of the two data sources, enabling interpretation in terms of fish behavior by comparison with experimental studies (although it would be preferable to carry out experiments under conditions strictly similar to those seen in the field). Fish thrust force and swimming orientation give us a precise description of smolt behavior, revealing whether smolt swim with the head in the same direction as the water flow or with the head facing the water flow and to what extent they resist or do not resist the flow. Furthermore, this approach reveals precisely how fish react to what they perceive. This approach permits to establish behavioral rules that can then be used in fish trajectory prediction models, including the use of IBMs (Scheibe and Richmond, 2002; Goodwin et al., 2006, 2014). This study paves the way for modeling approaches to simulate fish behavior that go beyond Goodwin et al. (2014) by adjusting on observed data.

4.6 Conclusion

This paper presents a fine-scale analysis of smolts' behavior in the forebay of a dam with particularly low time-average flow velocity, flow acceleration and TKE. Measured fish positions and CFD

simulations were used to characterize smolt's swimming behavior using fish thrust force, swimming orientation and direction. Thrust force was found by solving Newton's second law. The study aimed to analyze the effects of time-average flow velocity, flow acceleration and TKE on smolt's swimming behavior. Our results showed that in spite of very low hydraulic conditions intensities in the reservoir that cause fish disorientation, a minimal time-average flow velocity of 20 cm/s in the reservoir was needed to guide smolts to the FPS. Results presented in this paper can be used to assess the impact of operational and/or structural modifications on fish attraction or dissuasion. The results could also be used to determine the hydraulic conditions intensities that maximize fish drifting with the flow or swimming in the same direction as the flow.

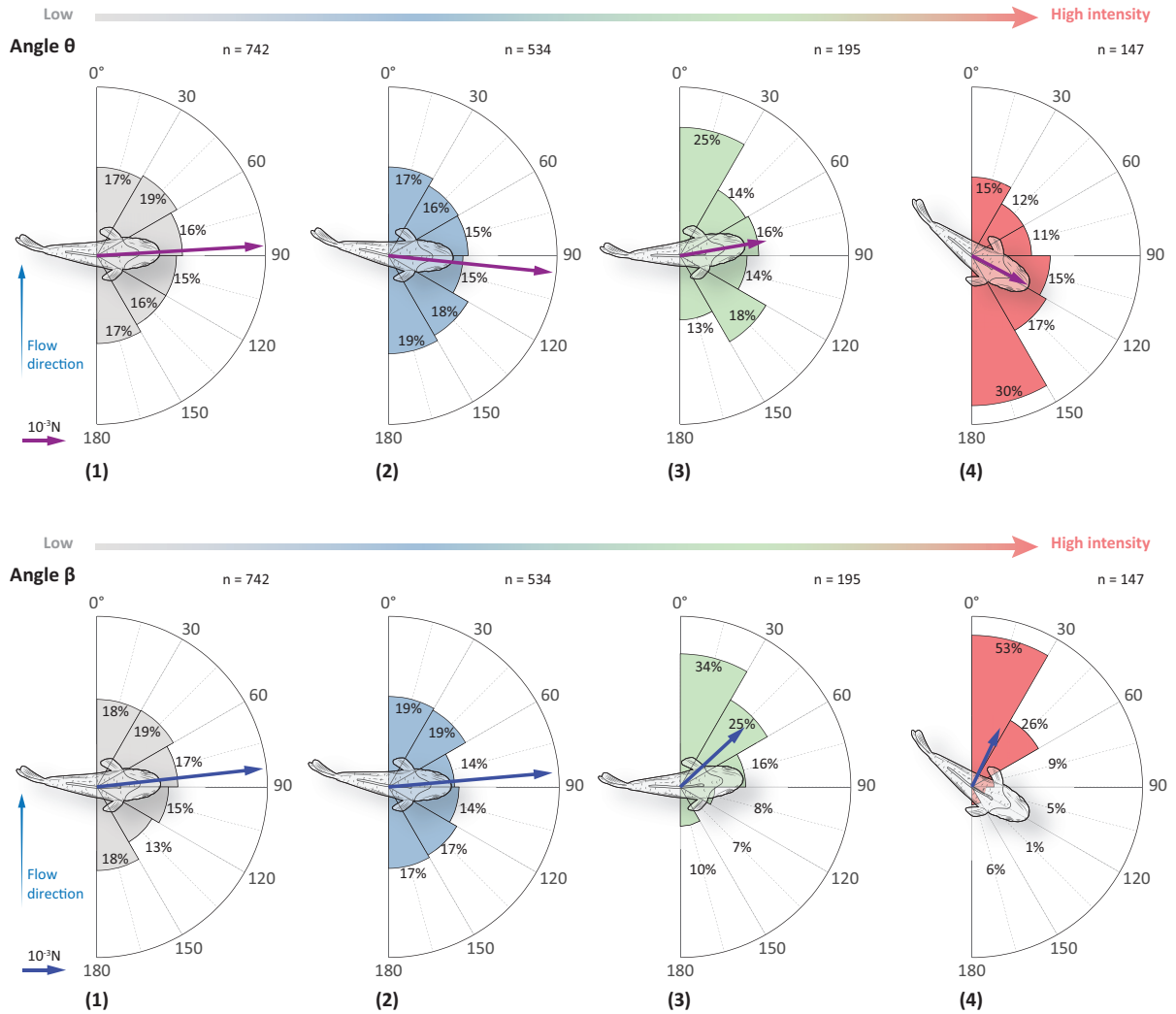


FIGURE 4.4 – Influence of hydraulic condition intensities on smolt swimming orientation β and thrust force (a), and influence of hydraulic condition intensities on swimming direction θ (b). In each figure, the smolt position corresponds to median orientation. The purple arrow corresponds to the intensity of the fish thrust force (scale : $0.94 \text{ cm} \leftrightarrow 10^{-3} \text{ N}$). Figures 4.4a and 4.4b represents how very low (1), low (2), medium(3) and high (4) hydraulic condition intensities influenced swimming orientation, direction and thrust force.

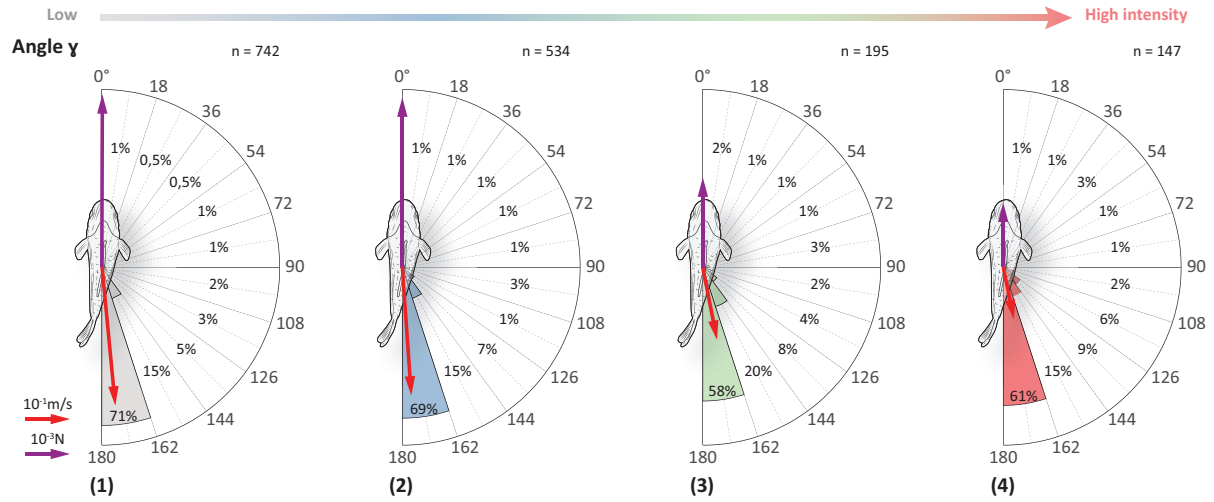


FIGURE 4.5 – Influence of hydraulic condition intensities on relative swimming direction γ . The purple arrow corresponds to the intensity of the fish thrust force (scale : $0.94 \text{ cm} \leftrightarrow 10^{-3} \text{ N}$). The red arrow corresponds to the intensity of the fish velocity with respect to the flow (scale : $0.94 \text{ cm} \leftrightarrow 10^{-1} \text{ m/s}$).

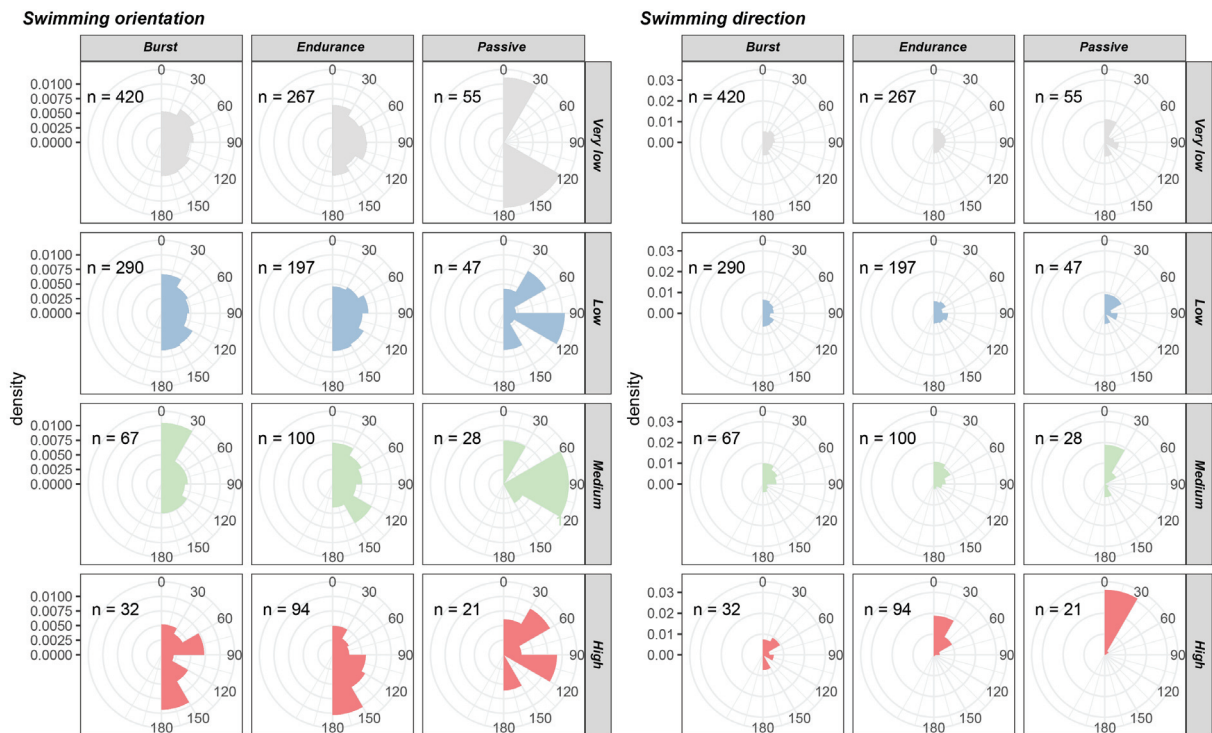


FIGURE 4.6 – Smolt swimming orientation β (left) and direction θ (right) according to behavioral state and hydraulic condition intensity. Fish swimming orientation in relation to flow direction enabled to know if smolt had their head oriented upstream or downstream. And, fish swimming direction determined how far fish followed the direction of the flow.

Chapitre 5

Modélisation bayésienne du comportement de nage des smolts dans une retenue de barrage (duplication directe du papier en préparation)

Contents

5.1	Préambule	86
5.2	Introduction	89
5.3	Material and Methods	91
5.3.1	A biomechanically-inspired model of true and observed fish positions	91
5.3.2	Statistical inference	98
5.4	Experiments	103
5.4.1	Motivating case study	103
5.4.2	Qualitative model prevalidation	104
5.4.3	Simulation-based study	110
5.4.4	Experiments on the real dataset	111
5.5	Discussion	117
5.6	Appendix	120
5.6.1	Managing boundary situations	120
5.6.2	On the use of logistic regression	121
5.6.3	The Fréchet distance between discretized trajectories	122
5.6.4	Measurement noise calibration	123
5.6.5	Calibrating the random features of swimming direction angle	125

5.1 Préambule

La fragmentation des rivières causée par l'homme est une menace majeure pour les espèces de poissons migrateurs (Malmqvist and Rundle, 2002; Strayer and Dudgeon, 2010; Neeson et al., 2015). La restauration de la continuité des cours d'eau nécessite la construction d'ouvrages de franchissement visant à faciliter le franchissement de ces obstacles par les poissons migrateurs (Noonan et al., 2012). L'étude du comportement des smolts sous différentes intensités de vitesse du fluide est essentielle pour proposer des stratégies permettant de guider les smolts à travers les retenues en amont des barrages et leur permettre de compléter leur cycle migratoire. Cette tâche nécessite le développement de modèles de simulation des trajectoires des poissons, alimentés par des modèles hydrauliques, pour calculer les conditions hydrauliques rencontrées dans les retenues et impactant la nage des smolts. Un avantage de ces modèles concerne leur utilisation pour optimiser la conception et l'emplacement des ouvrages de franchissement.

Le mouvement est une préoccupation essentielle en écologie animale, le mouvement conditionne les migrations (Drouineau et al., 2017; Tetard et al., 2016; Tétard et al., 2019). L'étude du mouvement des animaux repose souvent sur le suivi individuel. Les progrès techniques récents ont révolutionné ces études avec l'utilisation de la télémétrie acoustique (Cooke et al., 2012; Hussey et al., 2015; Lennox et al., 2017).

A partir des suivis de trajectoires des smolts mesurées par télémétrie acoustique et du modèle hydraulique de la retenue amont du barrage de Poutès, l'objectif de ce chapitre est de prédire le comportement de nage des smolts et in fine leur trajectoire à l'approche d'un barrage pour optimiser la conception et l'implantation des dispositifs de dévalaison. Nous avons ainsi conçu un outil numérique capable de simuler numériquement les trajectoires probables des smolts associées à différentes configurations d'ouvrages de franchissement.

Cet article propose une approche bayésienne de modèle à espace d'état pour modéliser le déplacement des smolts, motivée par une situation où les smolts suivis par télémétrie bidimensionnelle (2D) sont soumis à des intensités de vitesse d'écoulement faibles et fortes. La dynamique des poissons de rivière est connue pour être partiellement expliquée par l'état du comportement de nage des poissons (Mu et al., 2019). Pour modéliser l'état comportemental de la nage des poissons, nous avons utilisé un modèle de régression de Bézier avec l'intensité de la vitesse d'écoulement comme covariable. Les paramètres du processus de mouvement (vitesse du poisson et angles d'orientation) sont définis conditionnellement aux états comportementaux.

L'idée principale repose sur la caractérisation du comportement du poisson à l'aide de la force de poussée, réalisée au chapitre précédent. L'analyse du comportement des smolts en réponse aux conditions hydrauliques effectué au chapitre précédent permet d'apporter des connaissances a priori sur leur comportement de nage (état comportemental : passif, endurant ou sprint, et orientation de nage par rapport à la direction de l'écoulement) en amont d'un barrage. Cette analyse permet également une meilleure compréhension du comportement des poissons par rapport aux variables du champ d'écoulement qui contribue ainsi à l'élaboration de nouveaux modèles mathématiques représentant plus précisément le comportement migratoire des poissons à l'approche d'ouvrages de franchissement.

En utilisant la méthode « Approximate Bayesian Computation » (ABC) nous nous sommes particulièrement intéressés à la détermination de l'intensité minimale de la vitesse d'écoulement facilitant la dévalaison des smolts. La métrique de Fréchet, qui est adaptée à la comparaison entre les trajectoires observées et simulées, s'avère capable de sélectionner des intensités de vitesse d'écoulement en accord avec d'autres études. Cette connaissance sur la vitesse du fluide minimal optimisant la dévalaison des smolts a été établie au chapitre précédent. Ce résultat acquis à l'aide du modèle prédictif du comportement de nage des smolts permet de réaliser une validation supplémentaire du seuil de vitesse du fluide optimisant la gestion des ouvrages de franchissement, obtenu dans l'article précédent.

Le travail réalisé dans ce chapitre reste une modélisation préliminaire du comportement de nage des smolts. Il faudrait poursuivre cette étude en effectuant une inférence statistique qui aille au-delà de la méthode ABC. Cette méthodologie semble utile pour initier des inférences par des techniques de contrôle stochastique. De plus, il faudrait également effectuer une analyse de sensibilité qui n'a pas pu être réalisée en raison d'un manque de temps.

Grâce au couplage entre télémétrie et modèle hydraulique et aux connaissances a priori sur le comportement de nage, l'outil développé permet de prédire les trajectoires des smolts en fonction de l'intensité de la vitesse du fluide afin d'optimiser les exutoires de dévalaison et d'aider à la gestion des barrages pour les rendre plus attractifs pour la migration des poissons.

Preliminary Bayesian assessment of outmigration velocity regime of river smolt from hybrid simulation modeling

BEN JEBRIA Noor¹, DE OLIVEIRA Eric¹, CARMIGNIANI Rémi²,
DROUINEAU Hilaire³, BOUSQUET Nicolas^{1,4}

¹ EDF R&D, 6 quai Watier, 78401 Chatou, France ;

² LHSV, Ecole des Ponts, CEREMA, EDF R&D, Chatou, France ; ³ INRAE, 50 Avenue de Verdun, 33610 Cestas, France ;

⁴ Sorbonne Université, LPSM, 4 place Jussieu, France.

Abstract

The study of juvenile salmon (known as smolt) behavior under different flow regimes in natural rivers is essential to propose strategies for guiding these animals through hydraulic structures and allowing them to achieve their migratory and their life cycles. This task requires the development of hybrid simulation models of fish trajectories, fed by field measurements and linked to monitorable characteristics, such as flow velocity, which can itself be simulated by hydraulic models. Another key features of such models are boundary conditions, leading to behaviors for which known ecological knowledge must be respected. While such models can be used to optimize the design of fish passage structures, they can also be useful to guide the development of new measurement experiments to improve the knowledge of smolts dynamics. Motivated and illustrated by the case study of smolt downstream migration in Allier (Poutès dam), this article proposes a Bayesian state-space approach to such modeling, motivated by a situation where the animals being tracked are subjected to both weak and strong flow velocity intensities. Using Approximate Bayesian Computation, that carries out matching between observed and simulated trajectories using the Fréchet metric, we are particularly interested in determining the minimum flow velocity intensity facilitating the fish downstream migration. Allowing to confirm velocity magnitudes obtained by former studies, this methodology appears useful to initiate refined inferences by specialized stochastic control techniques.

Keywords : *fish outmigration, smolt, Bayesian modelling, simulation, hydrodynamics, fish passage solutions*

5.2 Introduction

Hydropower production in rivers raises concern for the impact on biofauna. These dams cause river fragmentation, preventing the free movement of fish diadromous species with life-cycles shared between marine and freshwater ecosystems. By blocking their migration, this leads to a decline in migratory fish populations (Porcher and Travade, 1992; Kondolf, 1997; Coutant and Whitney, 2000; Larinier, 2001). Moreover, these anthropological obstacles can cause fish to be injured or even fish mortality while passing through the turbines (Baras and Lucas, 2001; Larinier, 2001; Thorstad et al., 2008; Limburg and Waldman, 2009; Bunt et al., 2012). They can also be disoriented in large reservoirs with low hydraulic conditions, resulting in migration delays (Ovidio et al., 2016; Schwinn et al., 2019; McCormick, 1998; Marschall et al., 2011). Thus, there is an increasing need of fish passage facilities (such as fish bypass for downstream migration) to mitigate those impacts (Jager and Smith, 2008; Noonan et al., 2012). The case of the Poutès dam is iconic and constitutes an internationally known example (European Commission, 2020), which motivates the present contribution. Optimizing the fish passage facilities design relies heavily on how a smolt moves in relation to flow velocity intensity, the main environmental forcing (Groux et al., 2017; Arenas et al., 2015).

The coupling of a fluid dynamics model with a smolt movement model would thus provide a useful tool for ecological engineering. Few models of fish swimming behavior exist, especially for smolts. Mathematical models that simulate fish downstream migration movement by linking fish trajectories to hydraulic models including fish behaviors remain a challenge (Steel et al., 2001). In addition, the development of such models requires expertise in mathematics, ecology and hydraulics.

In particular, Goodwin et al. 2006, 2014 developed a theory of fish perception and response to the surrounding flow field, however they did not confront simulated trajectories with observed ones. This type of model has provided a better understanding of fish behavior in relation to hydraulics and has contributed to the development of new mathematical models in an IBM framework (Individual-based model). Such models allow to simulate the individual's actions and interactions with the environment to understand and predict its behavior (DeAngelis and Grimm, 2014). If the development of the first analysis of the influence of hydraulic condition intensities on smolts swimming behavior upstream of Poutès dam is the purpose of the article (Ben Jebria et al., 2021), the production of a simulation model of smolt movement in the reservoir of Poutès dam is the subject of this article. More precisely, through simulation several problems can be examined : (a) determining the flow velocity intensity that guides the fish to the fish bypass in an optimal manner ; (b) determining the best position for a fish bypass. Finally, developing such a model could reveal to be useful for defining a framework to optimize new field trajectory measurement experiments by telemetry, in a highly noisy environment.

Probabilistic models include state space models (SSMs), which are useful for predicting actual locations from noisy movement data (Jonsen et al., 2005; Patterson et al., 2007; McClintock et al., 2012; Jonsen et al., 2013; Auger-Méthé et al., 2021). Hidden Markov Models (HMM) (Joo et al., 2013; McClintock et al., 2020; Auger-Méthé et al., 2021) have also seen significant parallel development, as they can classify multiple discrete states influencing the movement process, and these can be inferred to reflect animal behavior. In addition, other stochastic methods have been developed, such as animal movement models based on Brownian assumptions (Michelot et al., 2019). From a probabilistic point of view, the modeling of animal trajectories by stochastic state-space models seems the most appropriate to answer the problem, as emphasized by Patterson et al. 2007. Models of animal movements based on Brownian assumptions and estimated from tracking data (typically

telemetry) show strong limitations reviewed by Michelot et al. 2019 (unrealistic animal movements). These latter authors, conversely, proposed to use a Langevin diffusion for the so-called utilization distribution ("the probability density function that gives the probability of finding an animal at a particular location" Anderson 1982), which was found more relevant than historical approaches when applied to marine mammals. This appealing approach however suffers from theoretical and technical drawbacks, some of which having been highlighted in the first stages of the present study : (a) it does not allow the use of categorical covariates, as the fish swimming behavior introduced further in the text, a key driver on fish movement (Mu et al., 2019) ; (b) the frequentist estimation requires sufficient contrasts in the gradient operator of the state-space equation, which were difficult to find when applied to the motivating use case of this article, characterized by a small number of trajectories and unequal time steps. Another limitation was the absence of boundary conditions, which are key for generating realistic river fish movement.

From a statistical point of view, the small number of collected trajectories pleads for a Bayesian approach within the assessment and the use in simulation of the model, allowing to take into account in an appropriate way the numerous uncertainties (Robert, 2007; Nagel and Sudret, 2016). Supported by many authors specializing in the field (Jonsen et al., 2003; McClintock et al., 2012) and more generally in quantitative ecology (e.g., Low Choy et al. 2009), this choice is reinforced by the existence of knowledge external to the data, or prior knowledge, which facilitates the estimation of poorly known parameters – including the transition flow velocity intensity – and in general of predictive animal trajectories when the model is used in simulation. Thus, these poorly known parameters will be interpreted as random variables, and they will be given prior distributions.

Finally, in the specific case of river fish, the main physical processes that underlie the behavior of animals can be explained by equations of point mechanics subjected to a force. However, the second Law of Newton has been little used because it requires coupling with hydraulic models (Arenas et al., 2015; Ben Jebria et al., 2021). In contrast, fish unconstrained by flow velocity are characterized by relatively simple intrinsic dynamics. Fish behavior continuously varies between these dynamics.

For all these reasons, we chose to place our study in this Bayesian *inversion* framework (Scales and Tenorio). More precisely, given a choice of state-space dynamics simulation model of smolt displacement (defined by their position Z_t for $t \geq t_0$)

$$Z_{t+1} = H(Z_t, f, \theta)$$

where H is a mathematical operator, f a set of environmental forcings (e.g., a known flow velocity intensity) θ a set of poorly known modeling parameters living in a finite dimensional space Θ , we propose to consider θ as a random vector, with prior probabilistic measure $\Pi(\theta)$ reflecting this uncertainty, and update the latter from noisy observations on Z_t trajectories, using Bayes' formula. The complexity of H , which is stochastic and non-linear, does not allow to implement straightforwardly this inference except by Approximate Bayesian Computation (ABC) techniques (Beaumont et al., 2009; Csilléry et al., 2010), filtering approaches (Kitagawa, 1996) or other kernel-based techniques (e.g., De Valpine and Hilborn 2005). In order to estimate relevant areas of Θ allowing to generate plausible trajectories in a first order way, we study more particularly in this paper the use of ABC, using metrics adapted to fish trajectories (Cleasby et al., 2019; Besse et al., 2015).

This article is thus structured as follows. The modeling choices and inferential techniques are des-

cribed in Section 5.3. The implementation on synthetic data, then on the real Poutès case study, conducted in Section 5.4, allows to reach conclusions on the flow velocity intensity adapted to the training of smolts in downstream for the crossing of a structure. These results are finally discussed in the final section of this article. Several technical appendices contain the details necessary for the computational implementation of the proposed methods and tools.

5.3 Material and Methods

5.3.1 A biomechanically-inspired model of true and observed fish positions

Generic framework

Inspired by the real-life case study empirically studied in Ben Jebria et al. (2021) and summarized in § 5.4.1, we generically consider the situation where smolts swim at nearly constant altitude in a bi-dimensional, fixed and orthogonal coordinates system, with boundary (edge) conditions embodied by an upstream section inlet, a dam intake and a downstream fish bypass, as well as banks delimiting the water flow. Along the article, the configuration of the Poutès dam, detailed on Figure 5.1, will illustrate our point. For simplicity, each position at time t will be denoted $Z_t = (X_t, Y_t)$. Following the second Law of Newton, the bi-dimensional speed (or *swimming velocity*) $\vec{V}(t)$ of each individual with respect to the ground at time t (m/s) obeys the following differential equation

$$m \frac{d\vec{V}(t)}{dt} = \vec{F}_T(t) + \vec{F}_D(t) \quad (5.1)$$

where m is the mass of the fish (in kg) and $(\vec{F}_T(t), \vec{F}_D(t))$ are the fish thrust and drag forces, respectively. From Webb 1976; Webb et al. 1984, the drag force can be modelled as :

$$\vec{F}_D(t) = \vec{F}_D(t|\vec{v}_{f,t}) = K(\vec{V}_{t-1} - \vec{v}_f(Z_{t-1}))\|\vec{V}_{t-1} - \vec{v}_{f,t}\|$$

where $\vec{v}_f(Z)$ is the bi-dimensional vector of flow velocity (m/s) at position Z of the fish, which is a known forcing in this article (possibly produced by a fluid dynamic model as explained in the Introduction), and :

$$K = -\frac{1}{2}\rho AC_d,$$

the (known) hydraulic parameters (ρ, A, C_D) being described in Table 5.1.

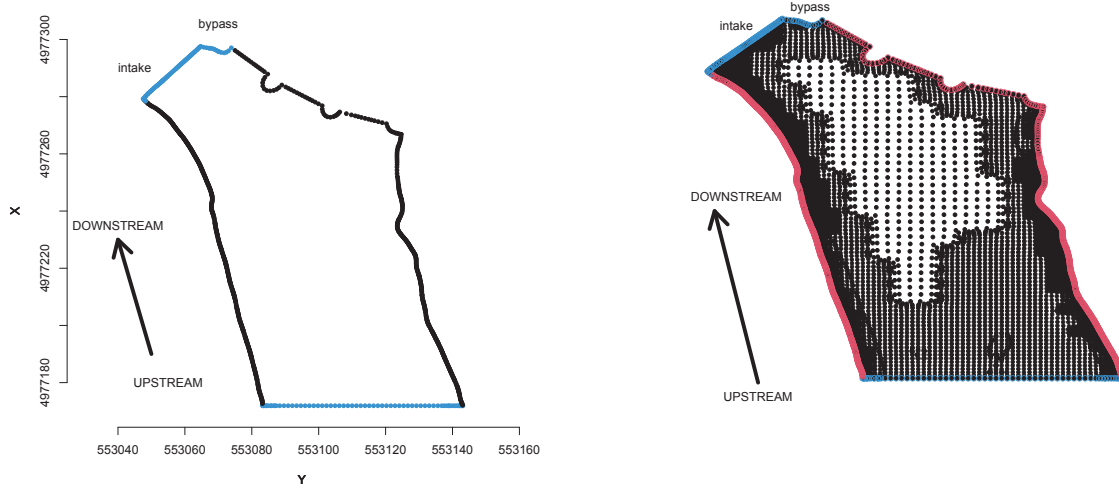


FIGURE 5.1 – Configuration of meshed Poutès dam, according to a system of coordinates (this coordinate system is based on the Universal Transverse Mercator (UTM) projection, on the UTM31 North zone). Fish enter the domain of study from the upstream section inlet (bottom, blue curve) and their moves are limited by banks (black curves). It leaves the domain of study by the intake or the bypass (top, blue curves), or possibly by the inlet (turning back).

Symbol	Meaning	Value	Associated references
ρ	Fluid density (kg/m^3)	1000	
m	Fish mass (kg)	0.03	Tétard et al. (2021)
L	Fish length (m)	0.152	Tétard et al. (2021)
A	Fish wetted surface	$0.28 \times L^{0.22}$	Webb (1976)
C_D	Fish drag coefficient	0.006	Webb et al. (1984)
F_1	FTF corresponding to passive swimming	$6 \times 10^{-4} \text{ N}$	Tang and Wardle (1992)
F_2	FTF corresponding to maximum sustained swimming speed	$6 \times 10^{-3} \text{ N}$	Tang and Wardle (1992)
F_3	FTF corresponding to smolt's maximum swimming speed	$6.5 \times 10^{-3} \text{ N}$	Webb (1976)
$\ v_f\ $	flow velocity intensity from CFD simulations		Ben Jebria et al. (2021)

TABLE 5.1 – Table of known parameters. *FTF* means *Fish thrust force*.

The fish thrust force $\vec{F}_T(t)$ can be decomposed as a rotation of the fish orientation in the (x, y) -coordinate system and the intensity of an uni-dimensional displacement, similar to the modulus of $\vec{F}_T(t)$:

$$\vec{F}_T(t) = \begin{pmatrix} \|F_T(t)\| \cos(\gamma_t) \\ \|F_T(t)\| \sin(\gamma_t) \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

where γ_t corresponds to the angle between flow velocity and fish thrust force, it characterizes fish orientation in relation to flow direction. In this definition of $\vec{F}_T(t)$ two models for $\|F_T(t)\|$ and γ_t are required. The fish thrust force $\vec{F}_T(t)$ summarizes the intrinsic, stochastic swimming behavior of a fish placed in a fluid whose characteristics are essentially the velocity and boundary conditions (river banks). Such models are proposed in § 5.3.1. It is worthy to note that these models are intrinsically probabilistic, which appears as a necessary requirement to produce stochastic fish trajectories (Equation (5.1) appearing, by its writing, deterministic).

Notice that, in absence of flow velocity and fish thrust force, ie when $\vec{F}_T(t) = \vec{0}$, $\vec{v}_f(Z) = \vec{0}$ for any $t \geq t_0$, given the position Z of the fish, then the trajectory is a straight line and :

$$\|\vec{V}_t\| = \frac{\|\vec{V}_{t_0}\|}{1 + \frac{t-t_0}{\tau_0}}$$

where τ_0 corresponds to the characteristic time of deceleration with :

$$\tau_0 = \frac{2m}{\rho A C_D \|\vec{V}_{t_0}\|} \quad (5.3)$$

This characteristic time corresponds to the time required for the fish to decelerate and stop in these idealistic conditions, which implies that the approximation of $\vec{F}_T(t)$ proposed hereinbefore is relevant only if the trajectory of the fish is discretized at a time step $\Delta_t \gg \tau$. In such a case, Equation (5.1) can be approximated by :

$$\vec{V}(t + \Delta_t) = \vec{V}(t) + \frac{\Delta_t}{m} \left(\vec{F}_T(t) - \vec{F}_D(t) \right). \quad (5.4)$$

Consequently, the successive real and observed positions of the fish are assumed to be explained by the state-space model defined by (5.4) and :

$$\begin{cases} \vec{Z}_{t+\Delta_t} &= \vec{Z}_t + \vec{V}(t)\Delta_t & (\text{structural equation}) \\ \vec{Z}_t^* &= \vec{Z}_t + \varepsilon_t & (\text{observation equation}) \end{cases} \quad (5.5)$$

where ε_t is a measurement noise. In the following of the article, the time scale will be normalized such that $\Delta_t = 1$, to alleviate the notations. If the classical choice :

$$\varepsilon_t \sim \mathcal{N}(0, R), \quad (5.6)$$

R being a bidimensional covariance matrix calibrable from repeated observations, can be roughly defended by a statistical analysis (as the one conducted in 5.6.4 for the motivating case-study of this article, on the basis of telemetry observations), this choice remains somewhat simplistic, in the sense that ε_t should actually depend on the relative geographical positions of an observed fish and the measurement device. Further in the article, this will contribute to defend the usefulness of conducting preliminary assessments using simulation tasks that can be easily adapted to new structures of measurement error (unlike more sophisticated statistical approaches requiring to develop a complex likelihood).

A stochastic (sub)model of fish thrust force

It has been shown in Mu et al. 2019 (among others) that fish swimming behavior, at time t , can be qualitatively described as a categorical latent state C_t taking values in $\Omega = \{C_1 = \text{passive}, C_2 = \text{endurance}, C_3 = \text{burst}\}$. These behavioral categories are more deeply explained on Table 5.2. In the formulation chosen (5.2), this latent state will be used as a conditioning variable or covariate to explain how the intensity $\|F_T(t)\|$ and the angle γ_t vary through time.

Note that finding the flow velocity intensity allowing to favor downstream migration without rushing the animals corresponds to establishing the flow velocity intensity for which the C_2 state takes over the C_3 state, with high probability. This is why the evolution of the probability for a fish of being in a certain state, in function of the flow velocity intensity, constitutes a key element of the modeling (cf. § 5.3.1) and the central stake of the inference (cf. § 5.3.2).

Thrust force intensity $\|F_T(t)\|$. Conditioned on the value of $C(t) = C_i \in \Omega$ (for $i \in \{1, 2, 3\}$), it has been shown in previous works (Tang and Wardle, 1992; Arenas et al., 2015; Ben Jebria et al., 2021) that $\|F_T(t)\|$ varies in a compact domain (F_{i-1}, F_i) . (These studies are swimming tunnel experiments that allow to follow the oxygen consumption at different swimming speeds). These bounds (and related references) are summarized on Table 5.1. A conditional stochastic (sampling) model for $\|F_T(t)\|$ is thus chosen as :

$$\|F_T(t)\| | C(t) = C_i \sim \mathcal{U}(F_{i-1}, F_i) \quad \forall i \in \{1, 2, 3\}. \quad (5.7)$$

where $\mathcal{U}$ denotes the uniform distribution.

State	Name	Behavior
C_1	Passive	Fish is passively moving with the flow (foraging, resting).
C_2	Endurance	Fish is in an activity that can be maintained over a long period of time and uses only aerobic fibers, Mu et al. (2019) (ranging, foraging, migration).
C_3	Burst	Fish is in a swimming behavior that cannot be maintained for a long time, that requires both aerobic and anaerobic muscle fibers, Mu et al. (2019) (predation avoidance, obstacle crossing).

TABLE 5.2 – Notations and meanings for the fish swimming behaviors.

Fish swimming orientation angle γ_t . The angle γ_t between flow velocity and fish thrust force corresponds to the fish swimming orientation angle for the behavioral state C_t at time t . By including this angle in Equation (5.4), it indicates in which direction the fish is swimming. We assume here that this angle varies in function of the swimming behavior C_{t-1} at the previous position Z_{t-1} of the fish, again stochastically (Williams et al., 2012). We define a random model on the swimming orientation angle γ_t using a Wrapped Cauchy distribution $\mathcal{WC}$ (an usual choice defended in Patterson et al. 2007, among others) :

$$\gamma_t | C_{t-1} \sim \mathcal{WC}(\mu_t, \rho_t) \quad (5.8)$$

with mean swimming orientation angle $\mu_t = \sum_{i=1}^3 \mathbb{1}_{[C_{t-1}=C_i]} \mu_i$ and scale parameter (mean cosine) $\rho_t = \sum_{i=1}^3 \mathbb{1}_{[C_{t-1}=C_i]} \rho_i$, that vary in function of the fish behavioral state with random

values of μ_i and ρ_i . These random effects can be calibrated from empirical measurements, as described in 5.6.5. This led, for the Poutès case study, to the choices provided in Table 5.3. When smolts are in endurance swimming state (C_2), they tend to orient themselves against the flow. And when they are in burst swimming state (C_3), they do not exhibit a preferred swimming orientation. In (5.8), the meaning of ρ_t is that of a global variability around the mean angle μ_t .

$\mu_2 \sim \mathcal{U}(-3\pi/4, 3\pi/4)$	Mean and scale parameter of fish swimming orientation angle
$\rho_2 \sim \mathcal{U}(0, 0.1)$	for behavioral state C_2 .
$\mu_3 \sim \mathcal{U}(-\pi, \pi)$	Mean and scale parameter of fish swimming orientation angle
$\rho_3 \sim \mathcal{U}(0.5, 1)$	for behavioral state C_3 .

TABLE 5.3 – Distribution of mean μ_t and scale parameter ρ_t of fish swimming orientation angle in relation with the fish behaviorale state.

Bézier regression model on swimming behavior

It is then necessary, for assembling all bricks previously proposed into a whole simulation model, to define how the latent state $(C_t)_t$ of a fish varies depending on experienced environmental conditions. This behavior is assumed to be associated to a covariate process generically denoted $\mathbf{Y}_{t-1}$, which generates the σ -field :

$$\mathcal{F}_{t-1} = \sigma \{ \mathbf{Y}_{t-1}, \mathbf{Y}_{t-2}, \dots \}.$$

This assumption is also necessary to make the flow velocity influence the angle γ_t , through Equation (5.8), and to produce more relevant fish trajectories. To conduct such a modeling task, let use the basis of the canonical approach to categorical model regression (Fokianos and Kedem, 2003; Agresti, 2003; Moysiadis and Fokianos, 2014). More precisely, let $\tilde{\mathbf{C}}_t = (\tilde{C}_{t,1}, \tilde{C}_{t,2})$ be a two-dimensional vector with elements :

$$\tilde{C}_{t,j} = \begin{cases} 1 & \text{if the } j\text{th state category is observed at time } t; \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

for $j = 1, 3$ and $t \geq t_0$. This formalism then allows to define $\boldsymbol{\pi}_t = (\pi_{t,1}, \pi_{t,3})$ the vector of conditional probabilities of being in a given state given $\mathcal{F}_{t-1}$, by :

$$\pi_{t,j} = P(\tilde{C}_{tj} = 1 | \mathcal{F}_{t-1}) = E[\tilde{C}_{tj} | \mathcal{F}_{t-1}], \quad j = 1, 3 \text{ for every } t > t_0.$$

More succinctly, we refer to the $\pi_{t,j}$ as "transition probabilities". Then :

$$\tilde{C}_{t,2} = 1 - \sum_{j \in \{1,3\}} C_{t,j} \quad \text{and} \quad \pi_{t,3} = 1 - \sum_{j \in \{1,3\}} \pi_{t,j}.$$

Following the principles of regression models (McCullagh and Nelder, 1989; Fokianos and Kedem, 2003) we assume that the vector of transition probabilities is linked to the covariate process through the equation :

$$\boldsymbol{\pi}_t(\theta) = h(\mathbf{Y}_{t-1}'\theta)$$

where h is a regression function and θ a vector of parameters to infer on.

From a large bibliography (Williams et al., 2012; Goodwin et al., 2014; Arenas et al., 2015; Silva et al., 2020; Ben Jebria et al., 2021), we postulate in this article that one major factor explains C_t : the influence of the flow velocity intensity $\|v_f(Z_{t-1})\|$ at the previous position Z_{t-1} of the fish. This assumption is furthermore guided by prior knowledge on the influence of $\mathbf{Y}_{t-1}$ on the transitions probabilities $\pi_{t,j}$, illustrated on Figure 5.2, and resulting from former studies conducted in Ben Jebria et al. 2021. When the flow velocity is under extreme conditions (very low and very high flow velocity intensity ($v_f \rightarrow 0$ and $v_f \rightarrow \infty$)), the fish is mainly in the latent state C_3 , ie. $\pi_3(\beta) \rightarrow 1$.

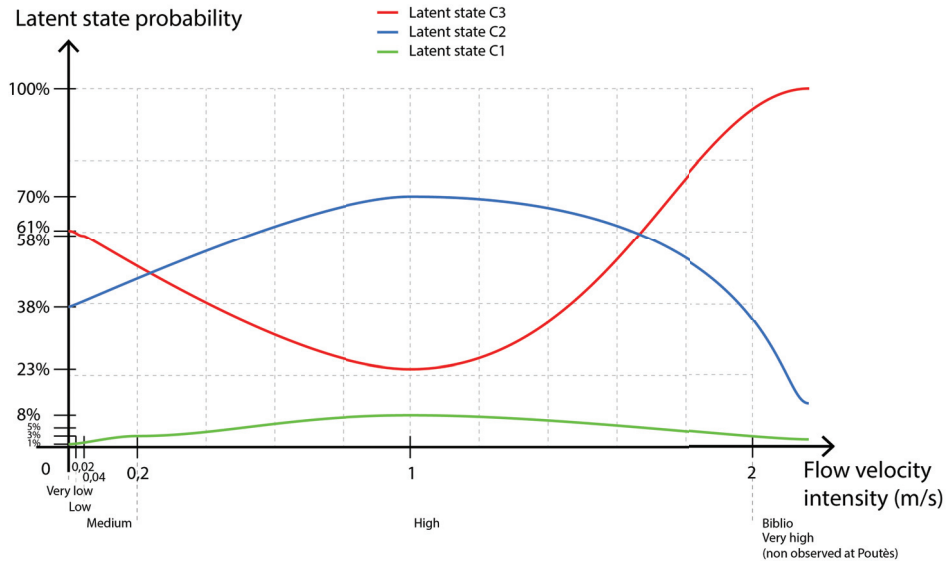


FIGURE 5.2 – Prior guesses obtained from Ben Jebria et al. 2021; Arenas et al. 2015 about the probability of smolt's behavioral state in relation to fluid velocity intensity ($\|V_f\|$ in m/s), in the case of Poutès study.

Assuming $\mathbf{Y}_{t-1} = \|v_f(Z_{t-1})\|$, usual regression models h as the logit model proposed by Fokianos and Kedem 2003 do not have enough flexibility to produce probability curves $\|v_f(Z_{t-1})\| \rightarrow \pi_{t,j}$ respecting the prior guesses plotted on Figure 5.2. See 5.6.2 for some details on this rationale. For this reason, a Bézier regression model (Kingle, 2004; Hug et al., 2020) was preferred. Bézier curves are known to provide accurate polynomial approximations of bounded shapes with various geometrical features (e.g., concavity and convexity, see (Prautzsch et al., 2002) for details) and for this reason are very popular in various areas related to computer-aided design, including data interpolation (Farin and Farin, 2002; Harada and Nakamae, 1982). In our context, a coordinate $h_i(\|v_f(Z_{t-1})\|)$ of the two-dimensional Bézier regression function

$$h(\mathbf{Y}_{t-1}'\theta) = \begin{cases} h_1(\|v_f(Z_{t-1})\|) & (\text{state } C_1) \\ h_3(\|v_f(Z_{t-1})\|) & (\text{state } C_3) \end{cases}$$

can be described as follows :

$$h_i(\|v_f(Z_{t-1})\|) = \sum_{j=1}^m B_j^m \left(\frac{\|v_f(Z_{t-1})\|}{v_{\text{sup}}} \right) \mathbf{P}_{i,j}(\|v_f(Z_{t-1})\|)$$

where :

- The B_j^m are Bernstein polynomials of degree m , that uniformly approximate continuous functions on $(0, 1)$ (Qian et al., 2011).
- The parameter v_{sup} is the flow velocity intensity above which fish are in a unique state (C_3) is 1;
- The $(\mathbf{P}_{i,j})_{1 \leq j \leq m}$ are the ordinates of the so-called *control points* for the Bézier regression of $\pi_{t,i}$; a number $m = 5$ is sufficient to provide regular curves that know at least two soft variations of convexity; these control points correspond roughly to situations around which the derivative of probability $\pi_{t,i}$ with respect to $\|v_f(Z_{t-1})\|$ is modified, and $\mathbf{P}_{i,j}$ has crudely the sense (when restricted to $(0, 1)$) of the corresponding value of $\pi_{t,i}$. The set of control points determine actually the convex hull for the interpolation curve, which explains that some ordinates $p_{i,j}$ can be found outside $(0, 1)$. An illustration is provided on Figure 5.3 for better understanding.

The parameter vector θ can then be defined as :

$$\theta = \{v_{\text{sup}}, (v_{i,j})_{1 \leq j \leq m, i \in \{1,3\}}, (p_{i,j})_{1 \leq j \leq m, i \in \{1,3\}}\} \quad (5.9)$$

where the $v_{i,j}$ are selected values of $\|v_f(Z_{t-1})\|$ and $p_{i,j} = \mathbf{P}_{i,j}(v_{i,j})$. The dimension of β can be reduced and most of its components are relatively easy to interpret, which simplify its use in an informative Bayesian framework where prior knowledge can be elicited. Especially,

$$\begin{aligned} v_{i,j} = 0 &\Leftrightarrow p_{i,j} \text{ is the probability of being in state } C_i \text{ at null flow velocity,} \\ v_{i,j} = v_{\text{sup}} &\Leftrightarrow p_{1,j} = 0 \text{ and } p_{3,j} = 0. \end{aligned}$$

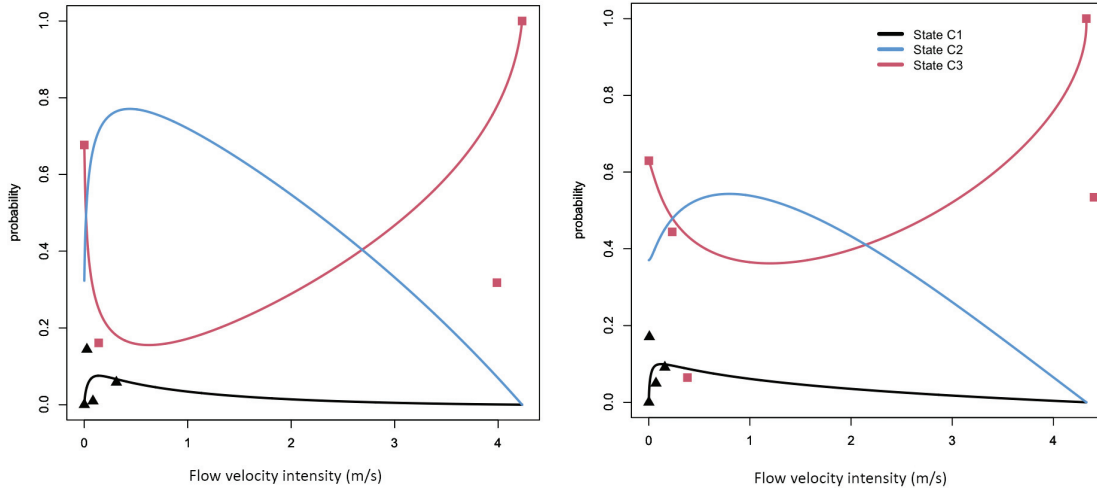


FIGURE 5.3 – Two illustrations of Bézier regression for the three latent state probabilities, for several random parameters β . The control points for the probabilities related to states C_1 and C_3 are plotted in solid triangles and rectangles, respectively. They define a convex hull for the probability curves.

Remark 1 Note that the specification of these polynomial regressions for the couple of states (C_1, C_3) were chosen because of more robust prior knowledge for these probabilities in the context of the Poutès study, but an equivalent choice could be done by specifying regression for (C_1, C_2) or (C_2, C_3) .

Remark 2 *In a Bayesian context where simulation algorithms are required to sample and test the relevance of a prior guess, it is not uneasy to remove from simulation non-physical situations where regressed probabilities are not summing to 1 nor being each in $(0, 1)$. In the present study, the selection of prior domains for β was found to guide efficiently the sampling such that no such situations were found.*

5.3.2 Statistical inference

Priors and likelihood

In the Bayesian setting, the vector $\theta \in \Theta$ of uncertain parameters, related to fish swimming, is given the sense of a random vector living in the probabilistic space $(\Theta, \mathcal{B}(\Theta), \Pi)$ endowed with the probability measure Π . Considerations made in § 5.3.1 and the writing (5.9) allow to define Θ as a bounded subset of $\mathbb{R}^d$ with $d \in (17, 19)$ (depending on the value of m). Uniform prior distributions can be chosen on the components of θ , as exemplified in the section devoted to experiments.

Denoting $L(\mathbf{Z}^*|\theta)$ the statistical likelihood of observations $\mathbf{Z}^*$ defined by (5.5), the so-called *prior* probability density function (pdf) $\pi(\theta) = \partial\Pi(\theta)/d\theta$ (derivative in the Radon-Nykodim sense) is updated to the *posterior* pdf using Bayes' rule :

$$\pi(\theta|\mathbf{Z}^*) = \frac{L(\mathbf{Z}^*|\theta)\pi(\theta)}{\int_{\Theta} L(\mathbf{Z}^*|\theta)\pi(\theta) d\theta}. \quad (5.10)$$

While prior distributions can be used to sample a very large number of fish trajectories using the simulation model, the latter have small chances to correspond to relevant (close-to-measured-reality) trajectories. Conditioning on observations $\mathbf{Z}^*$ increases the chance of simulating relevant ones, provided the simulation model is flexible enough, while keeping a biodynamical sense.

The inference on θ carried out by (5.10) implies to define the statistical likelihood $L(\mathbf{Z}^*|\theta)$ of observations $\mathbf{Z}^*$, namely the joint pdf of these observations given θ . Assuming to observe n independent fish (e.g., by telemetry), the position of each fish i being measured at times $t_{0,i}, \dots, T_i$, one can write :

$$L(\mathbf{Z}^*|\theta) = \prod_{i=1}^n L(Z_{i,t_{0,i}}^*, \dots, Z_{i,T_i}^*|\theta).$$

In the above expression, $L(Z_{i,t_{0,i}}^*, \dots, Z_{i,T_i}^*|\theta)$ is the likelihood of the observed trajectory for the fish i , which is integrated over all (latent) true positions :

$$L(Z_{i,t_{0,i}}^*, \dots, Z_{i,T_i}^*|\theta) = \int f(Z_{i,t_{0,i}}^*, \dots, Z_{i,T_i}^*|Z_{i,t_{0,i}}, \dots, Z_{i,T_i}) L(Z_{i,t_{0,i}}, \dots, Z_{i,T_i}|\theta) \prod_{j=t_{0,i}}^{T_i} dZ_{i,j}$$

where $f(Z_{i,t_{0,i}}^*, \dots, Z_{i,T_i}^*|Z_{i,t_{0,i}}, \dots, Z_{i,T_i})$ is the joint distribution of observed positions given the true positions. Assuming each measure is made independently of the others along a fish trajectory,

it comes :

$$f\left(Z_{i,t_0,i}^*, \dots, Z_{i,T_i}^* | Z_{i,t_0,i}, \dots, Z_{i,T_i}\right) = \prod_{j=t_0,i}^{T_i} f\left(Z_{i,j}^* | Z_{i,j}\right),$$

$$\propto |R|^{-(T_i-t_0,i+1)/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{j=t_0,i}^{T_i} \left(Z_{i,j}^* - Z_{i,j} \right)^T R^{-1} \left(Z_{i,j}^* - Z_{i,j} \right) \right\}.$$

Since all true positions along a fish trajectories are potentially dependent, a Markovian assumption should be made to simplify the likelihood of true positions $L\left(Z_{i,t_0,i}, \dots, Z_{i,T_i} | \theta\right)$. For instance, under a first-order Markovian assumption :

$$L\left(Z_{i,t_0,i}, \dots, Z_{i,T_i} | \theta\right) = L\left(Z_{i,T_i} | \theta, Z_{i,T_i-1}\right) \dots L\left(Z_{i,t_0,i+1} | \theta, Z_{i,t_0,i}\right) L\left(Z_{i,t_0,i} | \theta\right).$$

However, despite this simplification, each term in the product above is an intractable integral over nonlinear random effects introduced by the stochastic submodel of fish thrust force described in § 5.3.1. Filtering inferential techniques (Kitagawa, 1996), and especially marginalized particle filtering approaches (Schön et al., 2005) seem good candidates to solve the problem of (posterior) sampling from $\pi(\theta | \mathbf{Z}^*)$. Relying on importance sampling or nested Monte Carlo processes and smoothing techniques (e.g. Svensson et al. 2015; Svensson and Schön 2017, among others), their good convergence in practice is usually dependent on approximations made on the likelihood and often requires fine-tuning.

In the context of this article, since our objectives are primarily to investigate : (a) if the proposed model has potential to mimic the observed trajectories; (b) the range of fluid velocity intensity allowing for a "soft" downstream migration (cf. § 5.3.1), we chose to adopt a more crude inferential, simulation-based approach of Approximate Bayesian Computation (ABC). It has the merit to deal with untractable likelihoods, and to avoid making most of the previous assumptions on the nature of trajectories. For this reason, the ABC inference considered here must be considered as a preliminary assessment of the model and a possible starting point for refined, specialized inference tasks.

Approximate Bayesian Computation (ABC)

A major representer of "likelihood-free" methods, ABC was firstly formalized in Beaumont et al. 2002. This inferential paradigm has now become a popular approach of Bayesian computation in situations where the quasi-only feasible exploration of a forward model has to be conducted using numerical simulation. See Marin et al. 2012 for a review. The principle of ABC is to approximate the target posterior $\pi(\theta | \mathbf{Z}^*)$ by :

$$\pi\left(\theta | \mathcal{D} \left\{ s(\mathbf{Z}^*), s(\hat{\mathbf{Z}}^*) \right\} \leq \epsilon\right) \quad (5.11)$$

where $s(\cdot)$ is a set of representative statistics capturing the important information within the observations, $\hat{\mathbf{Z}}^*$ are simulated (noisy) observations, $\mathcal{D}\{\cdot, \cdot\}$ is a measure of discrepancy that formally arises from a choice of smoothing kernel (Blum et al., 2012) and ϵ has the nature of a tolerance or acceptable error. It can be shown that the approximate posterior distribution (5.11) converges towards the true posterior when $\epsilon > 0$ diminishes towards 0, provided s is sufficient and for some classes of discrepancy measures. Although those conditions remain hard to check in practice and require heuristics for choosing appropriate $(s, \mathcal{D})$ and (possibly a decreasing scheme for) ϵ , rules of thumbs based on iterative approaches with ϵ defined as a limit empirical percentile often provide good results.

Choosing $\mathcal{D}$ and s The ABC paradigm means that sampling θ_j from (5.11) means that the simulated trajectories $\hat{\mathbf{Z}}^*(\theta_j)$ generated from θ_j match acceptably with the truly observed trajectories $\mathbf{Z}^*$. This matching has to be defined through metrics adapted to the nature of these bi-dimensional discrete time series. In 5.6.3 a review of such metrics is conducted, concluding that the Fréchet distance d_F , a performing tool in statistical learning of time series (e.g., Chouakria-Douzal and Nagabhushan 2006; Driemel et al. 2016) or more general geometrical patterns and shape analysis (e.g. Devogele et al. 2016), seems one of the most appropriate.

To understand how d_F can be used to define a global discrepancy in the ABC framework, a bit of formalization is required. Let $\mathbf{Z}^*(t)$ be the (unknown) stochastic process of all possible observable positions for any fish along time, living in the space $\mathcal{H}$ metrized by d_F . Let $\hat{\mathbf{Z}}^*(t|\theta) \in \mathcal{H}$ be an instance of the model parameterized by θ for this process. Denote respectively $(P_{\mathbf{Z}^*}, P_{\hat{\mathbf{Z}}_\theta^*})$ their distributions. For all $(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in \mathcal{H}^2$, $d_F(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq 0$ measures a gap between these two processes. One may define :

$$\delta^*(\theta) = \arg \min_{u \geq 0} \mathbb{E}_{\mathbf{X} \sim P_{\mathbf{Z}^*}, \mathbf{Y} \sim P_{\hat{\mathbf{Z}}_\theta^*}} \left[(u - d_F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}))^2 \right]$$

as the estimator of this gap with the minimal quadratic error. It is equivalent to the *expected Fréchet distance* :

$$\delta^*(\theta) = \mathbb{E}_{\mathbf{X} \sim P_{\mathbf{Z}^*}, \mathbf{Y} \sim P_{\hat{\mathbf{Z}}_\theta^*}} [d_F(\mathbf{X}, \mathbf{Y})].$$

Assume the most realistic assumption that the n fish trajectories evoked above, which are bi-dimensional discretized time series, are independent and are independently measured. The empirical, unbiased and consistent estimator $\delta^*(\theta)$ of the expected error is :

$$\tilde{\delta}_{n,m}^*(\theta) = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_F(\mathbf{Z}_i^*, \hat{\mathbf{Z}}_{i,j}^*(\theta))$$

where $\hat{\mathbf{Z}}_{i,\mathbf{m}}^*(\theta) = (\hat{\mathbf{Z}}_{i,1}^*(\theta), \dots, \hat{\mathbf{Z}}_{i,m}^*(\theta))$ is an iid m -sample of $P_{\hat{\mathbf{Z}}_{\theta_i}^*}$ (trajectories for the fish i). Since our concern is to approximate this distribution by (5.11), selecting values of θ such that $\tilde{\delta}_{n,m}^*(\theta)$ be small seems a relevant criterion for defining implicitly both $\mathcal{D}$ and s . Note that if n is fixed as it is the size of the truly observed trajectories, m can theoretically be chosen as large as wanted. Practically, m will be fixed after some preliminary tests, to avoid prohibitive computational time costs.

Nevertheless, the minimization of $\tilde{\delta}_{n,m}^*(\theta)$ is not sufficient to select values of θ favoring relevant simulated trajectories. As illustrated on Figure 5.4, using only $\tilde{\delta}_{n,m}^*(\theta)$ would lead to select trajectories with small bias and high variance. To counterbalance the bias minimization, a *regularity penalty* should be added to $\tilde{\delta}_{n,m}^*(\theta)$ to define a complete discrepancy (or loss function), as usual in statistical learning. As noticed by Buchin et al. 2011, “a natural time-dependent similarity measure for two trajectories is their average distance at corresponding times”. This led us to consider that an interpretable limitation of the complexity of simulated trajectories is minimizing the average difference of real and simulated path lengths traveled by the fish, under the assumption that such path lengths remain close to sums of Euclidian distances between successive positions (neglecting the circumvolutions of true trajectories) :

$$\text{pen}_{n,m}(\theta) = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| \ell_i^* - \hat{\ell}_{i,j}^*(\theta) \right\|_q$$

with :

$$\ell_i^* = \left(\sum_{k=t_{0,i}}^{T_i-1} \|Z_{k+1}^* - Z_k^*\|^2 \right)^{1/2}, \quad \text{and} \quad \hat{\ell}_{i,j}^*(\theta) = \left(\sum_{k=t_{0,i}}^{T_i} \|\tilde{Z}_{j,k+1}^*(\theta) - \tilde{Z}_{j,k}^*(\theta)\|^2 \right)^{1/2}.$$

The choice $q = 1$ corresponds to a Lasso-type penalty, while $q = 2$ is similar to a ridge-type penalty. The choice of q will be further studied in the numerical experiments, as the choice of a coefficient λ such that the empirical global discrepancy to minor chosen for carrying out ABC is :

$$\mathcal{D} \left\{ s(\mathbf{Z}^*), s(\hat{\mathbf{Z}}^*) \right\} \simeq \tilde{\delta}_{n,m}^*(\theta) + \lambda \text{pen}_{n,m}(\theta).$$

FIGURE 5.4 – Illustration of the need for a "bias-path length" trade-off similar to a "bias-variance" trade-off.

Remark Notice that the problem of matching multivariate time series has recently become key in the field of synthetic data generation by deep learning techniques. The interest for the Fréchet distance as a probabilistic embedding tool (Driemel and Krivošija, 2018) and a criterion to minimize has gained much interest in this community, especially with the development of Generative Adversarial Networks (GAN) for images and time series (Heusel et al., 2017; Smith and Smith, 2020; Kim et al., 2020). Roughly speaking, an ABC method is similar in spirit to a GAN-type method and both share close concerns about how defining "what is a relevant simulation", although the generative part strongly differs.

In summary, the ABC algorithm can be described as a function of $(M, m, q, \lambda, \epsilon)$ detailed beneath, M being the size of the sampling of $\theta \in \Theta$ using a proposal distribution (typically the prior $\Pi(\theta)$ at first iteration).

Kernel-ABC algorithm.

Initialization:

- Choose $\mu_0(\theta) \equiv \pi(\theta)$.

Step $l \geq 0 \rightarrow l + 1$:

1. Sample $\theta_M = (\theta_1, \dots, \theta_M) \stackrel{iid}{\sim} \mu_l(\theta)$;
2. For $k = 1, \dots, M$:
 - For $i = 1, \dots, n$ and $j = 1, \dots, m$:
 - (a) Sample m trajectories $\hat{Z}_{i,1}^*(\theta_k), \dots, \hat{Z}_{i,m}^*(\theta_k)$ with similar starting position $Z_{t_0,i}^*$;
 - (b) Compute the m distances $d_F(Z_i^*, \hat{Z}_{i,1}^*(\theta_k)), \dots, d_F(Z_i^*, \hat{Z}_{i,m}^*(\theta_k))$;
 - Compute the empirical discrepancy

$$\tilde{\delta}_{n,m}^*(\theta_k) + \lambda \text{pen}_{n,m}(\theta_k); \quad (5.12)$$

3. Select $\tilde{\theta}_{P_l} = (\theta_{k_1}, \dots, \theta_{k_{P_l}}) \subset \theta_M$ such that

$$\forall \theta_k \in \tilde{\theta}_{P_l}, \quad \tilde{\delta}_{n,m}^*(\theta_k) + \lambda \text{pen}_{n,m}(\theta_k) \leq \epsilon;$$

4. Update the proposal distribution μ_l in μ_{l+1} by multivariate kernel regression on $\tilde{\theta}_{P_l}$;
 5. Stop if $\mu_{l+1} = \mu_l$.
-

Carrying out this algorithm requires :

- (i) To calibrate (λ, ϵ) . This can be crudely but intuitively done using the following procedure, inspired by cross-validation techniques :
 1. Replicate all observed trajectories using the observation noise and compute the empirical distribution $\{d_F^{(k)}\}_{k \in \mathcal{K}}$ of Fréchet distances between replicates.
 2. Sample prior trajectories from the model, then estimate the empirical distribution $\{d_F^{(j)}\}_{j \in \mathcal{J}}$ of Fréchet distances between replicates produced for the same set of input parameters θ_0 (varying θ_0 in $\text{Supp}(\pi(\theta))$).
 3. Choose a limit quantile (e.g., 95%) ν of the empirical distribution mixing $\{d_F^{(k)}\}_{k \in \mathcal{K}}$ and $\{d_F^{(j)}\}_{j \in \mathcal{J}}$. This defines a limit acceptable shift between real and simulated trajectories, in terms of Fréchet distance.
 4. Given the choice θ_0 and the "virtually true" trajectories produced at Step 2, sample prior trajectories using a perturbed input parameter $\theta_0 + \varepsilon_{\theta_0} \in \text{Supp}(\pi(\theta))$, and test several values of λ to select the minimizer λ^* of (5.12) (on average on the sampled θ_0).

5. Calibrate $\varepsilon = \nu + \lambda^* \ell$ where ℓ is the empirical mean of the penalty obtained at Step 4.
- (ii) A method for building the new proposal μ_{l+1} . Provided P_l is large enough, a simple way of using multivariate kernel regression (Silverman, 1986; Scott, 1992) on selected values $\tilde{\theta}_{P_l}$ is to resample from this kernel. Such a procedure (using Gaussian kernels) is described in Deng and Wickham 2014 and implemented within the R package `kernelboot`.
 - (ii) a statistical testing between μ_l and μ_{l+1} . This can be conducted using the kernel dissimilarity procedure proposed by Gretton et al. 2009.

5.4 Experiments

The numerical experiments conducted in this section are of two kinds. First, the versatility of the simulation model and its appropriateness with respect to known ecological behaviors are investigated (§ 5.4.2). Secondly, the estimation approach is conducted on real data, and allows to quantify the approximate joint posterior distribution of the uncertain parameters. We start this section by describing more deeply the motivating case study of Poutès reservoir.

5.4.1 Motivating case study

The case of trajectories of smolts within the reservoir of Poutès dam, which motivates this study, was recently empirically studied in Ben Jebria et al. (2021). More precisely, we consider 17 trajectories of juvenile Atlantic salmon tracked by acoustic telemetry in two dimensions (Lotek Wireless Inc.), in the Poutès dam on the Allier River (France). These trajectories were collected from March to June 2017. For each fish, the average time between two detections was 5 sec. (Tétard et al., 2021), which is much larger than the characteristic time $\tau = 1.7$ sec. computed from (5.3), for a fish initial velocity V_{t0} chosen as 1 m/s.

The three subfigures of Figure 5.5 correspond to smolt trajectories measured under conditions where flow velocity intensities are relatively high (on average equal to 0.21 m/s, Ben Jebria et al. 2021). Under these hydraulic conditions, smolts exhibit a nearly straight trajectory and travel a relatively short distance. According to Ben Jebria et al. 2021, smolts are mainly in an enduring swimming state.

The two subfigures of Figure 5.5) correspond to smolt trajectories observed under conditions where flow velocity intensities are much lower (on average equal to 0.025 m/s, Ben Jebria et al. 2021). When smolts encounter such low flow velocity intensities, they display an active exploratory behavior in the forebay and travel a great distance. Authors of Ben Jebria et al. 2021 showed that they are mostly in a burst swimming state.

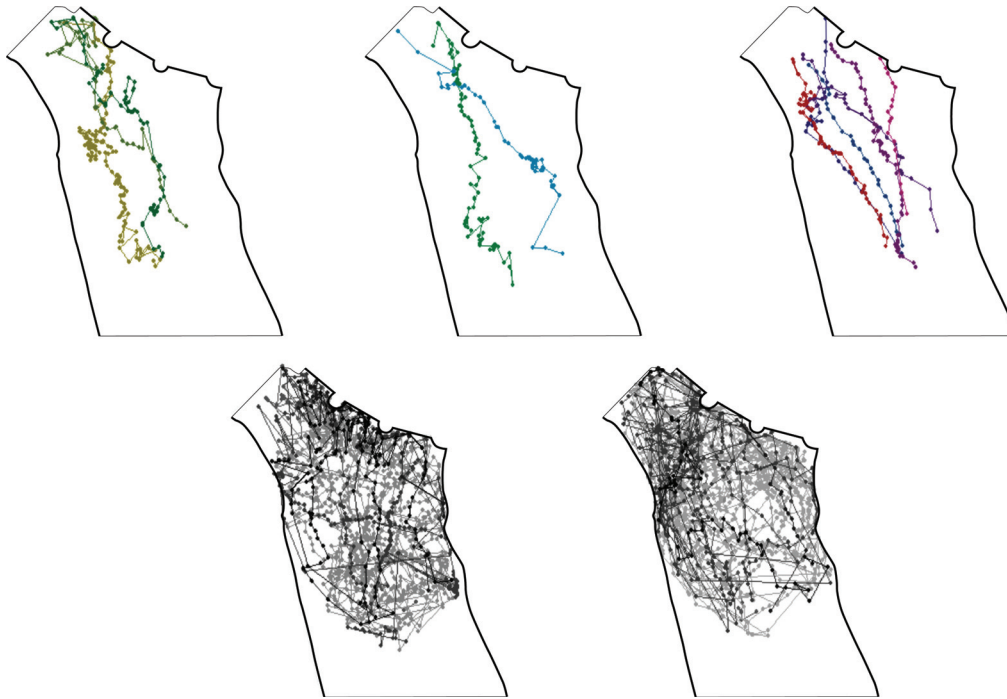


FIGURE 5.5 – Smolt observed trajectories at Poutès. The succession of a fish position through time allows the reconstruction of trajectories. The different colors for the fish positions correspond to different smolt's trajectories.

5.4.2 Qualitative model prevalidation

Some trajectories are randomly sampled from the prior distribution on θ , which was determined to respect crudely the available guesses on the state probabilities. They are summarized on Table 5.4. The corresponding prior state probabilities are plotted on Figure 5.6. Some examples of truly observed and simulated fish trajectories are plotted on Figure 5.7, that illustrate the potential of the model to approximate some observed characteristics of real trajectories.

Symbol	Meaning	Prior distribution
v_{sup}	water velocity (modulus) above which $P(C_3) = 1$ (m/s)	$\mathcal{U}[3.5, 4.5]$
$\{p_{1,1}, p_{2,1}, p_{3,1}\}$	frequencies of states (C_1, C_2, C_3) for null water velocity	$\mathcal{D}_{ir}(0.01, 0.38, 0.61)$
<i>State C_1</i>		
$v_{1,2}$	water velocity (modulus) for which $\partial P(C_1)$ is maximal (m/s)	$\mathcal{U}[0, 0.2]$
$p_{1,2}$	corresponding control point ordinate	$\mathcal{U}[-0.2, 0.4]$
$v_{1,3}$	water velocity (modulus) for which the sign of $\partial^2 P(C_1)$ is modified (m/s)	$\mathcal{U}[0, 0.6]$
$p_{1,3}$	corresponding probability (control point ordinate)	$\mathcal{U}[0, 0.1]$
$v_{1,4}$	water velocity (modulus) for which the sign of $\partial P(C_1)$ is modified (m/s)	$\mathcal{U}[0, 0.1]$
$p_{1,4}$	corresponding control point ordinate	$\mathcal{U}[-0.1, 0.1]$
<i>State C_3</i>		
$v_{3,2}$	water velocity (modulus) for which $\partial P(C_3)$ is minimal (m/s)	$\mathcal{U}[0, 0.3]$
$p_{3,2}$	corresponding control point ordinate	$\mathcal{U}[-0.2, 1]$
$v_{3,3}$	water velocity (modulus) for which the sign of $\partial^2 P(C_3)$ is modified (m/s)	$\mathcal{U}[0, 0.6]$
$p_{3,3}$	corresponding control point ordinate	$\mathcal{U}[-0.5, 0.5]$
$v_{3,4}$	water velocity (modulus) for which the sign of $\partial P(C_3)$ is modified (m/s)	$\mathcal{U}[1.8, 4]$
$p_{3,4}$	corresponding probability (control point ordinate)	$\mathcal{U}[0, 1]$

TABLE 5.4 – Prior distributions chosen for uncertain parameters for the Poutès case study. $\mathcal{U}$ means the uniform distribution and $\mathcal{D}_{ir}$ means the Dirichlet distribution. Five control points are used for defining the curve of the probabilities related to states C_1 and C_3 , respectively. Abcissas of limit Bézier control points are deterministic given the uncertain parameters ($v_{1,1} = v_{3,1} = 0$, $v_{1,5} = v_{3,5} = v_{\text{sup}}$ and $p_{1,5} = 0$ and $p_{3,5} = 1$). Note that $p_{2,1} = 1 - p_{1,1} - p_{3,1}$ is useless and not used in the prior sampling task, the Dirichlet sampling being only used to ensure the correct summation of these initial prior probabilities.

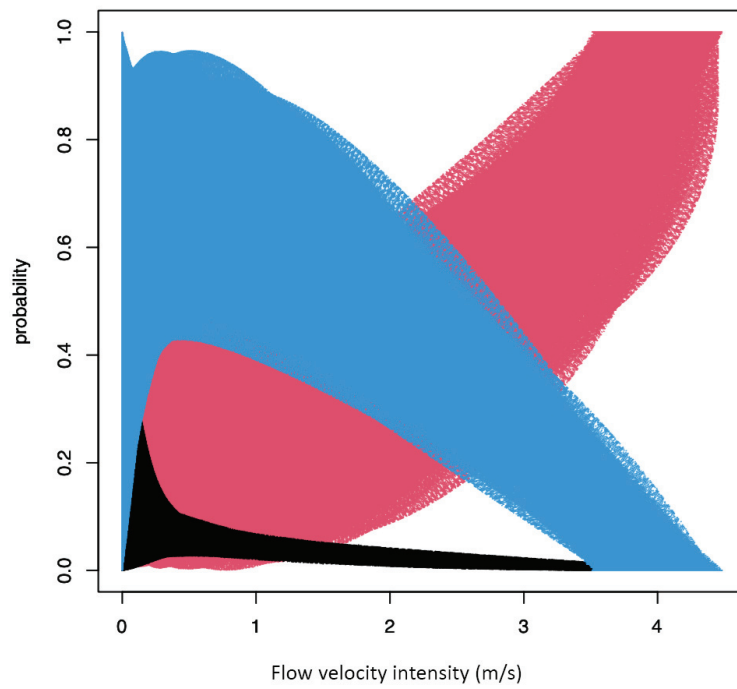


FIGURE 5.6 – Prior ranges of variation for the probability curves of being in state C_1 (black), C_2 (blue) and C_3 (red) in function of the water velocity.

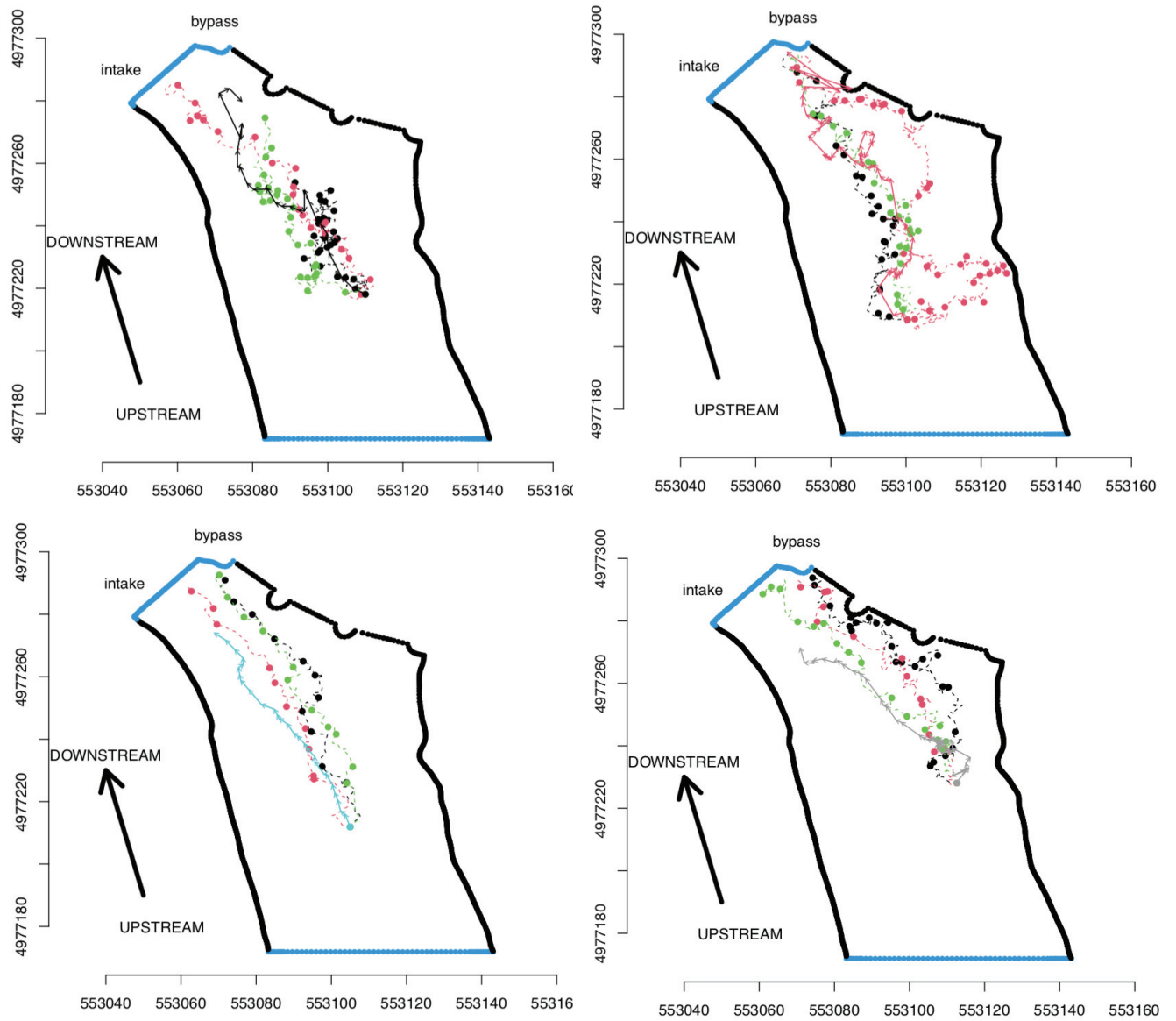


FIGURE 5.7 – Some examples of truly observed (solid arrows) and simulated trajectories from random input parameters following the prior distribution.

More precisely, when the model is applied to a more bounded setting where the velocity field is uniform along a virtual channel (Figures 5.8 to 5.10), one can exhibit the following properties from the simulated trajectories :

- At relatively high flow velocity intensity (Figure 5.8), the fish presents a quasi-rectilinear trajectory and descends in a rather short time a rather short distance compared to the lower flow velocity intensities (Figure 5.9).
- At relatively low flow velocity intensity, the fish is "circling", exploring, and traveling a long distance in a relatively long time (Figures 5.9 then 5.10).

The fact that these distinct "types" of trajectories globally agree with the observed reality encourage us to consider the use of the simulation model for the inferential task.

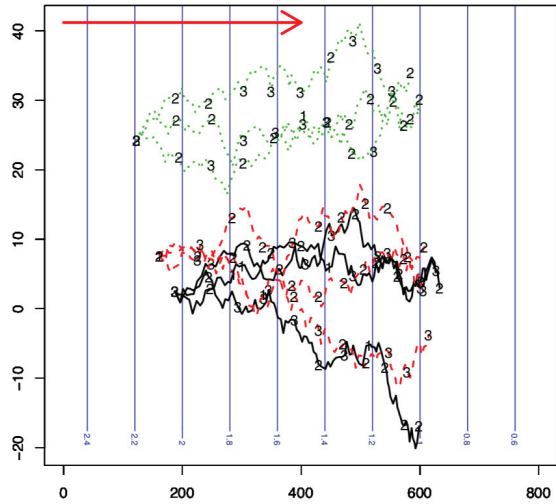


FIGURE 5.8 – Simulation of 2D fish displacements within a channel submitted to high to moderate values of flow velocity (uniform on the x -axis, values provided in m/s on level lines). Numbers indicate the most probable swimming states.

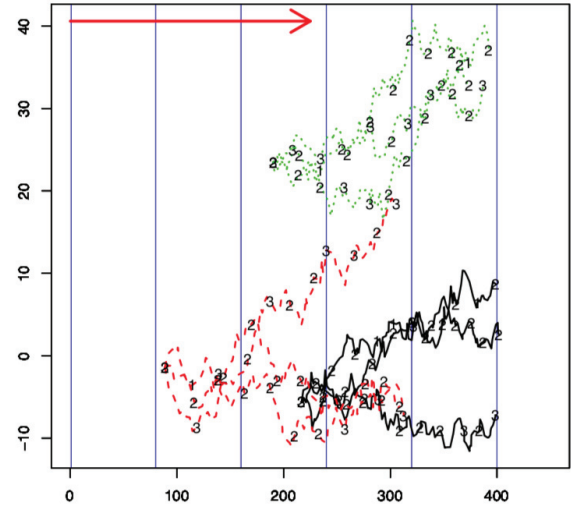


FIGURE 5.9 – Simulation of 2D fish displacements within a channel submitted to moderate to small values of flow velocity (uniform on the x -axis). Numbers indicate the most probable swimming states. The total simulation time is the same than for the example plotted on Figure 5.8.

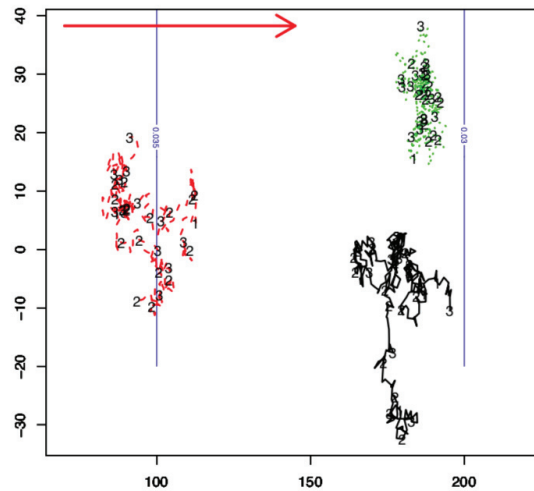


FIGURE 5.10 – Simulation of 2D fish displacements within a channel submitted to very small values of water velocity (uniform on the x -axis, values provided in m/s on level lines). Numbers indicate the most probable swimming states. The total simulation time is the same than for the example plotted on Figures 5.8 and 5.9.

5.4.3 Simulation-based study

A preliminary study was conducted to calibrate the ABC framework previously described. The empirical distribution $\{d_F^{(k)}\}_{k \in \mathcal{K}}$ of smallest Fréchet distances characterizing truly observed trajectories, plotted on Figure 5.24 can be compared to the empirical distribution $\{d_F^{(j)}\}_{j \in \mathcal{J}}$ of such distances when the truly observed trajectories are replaced by prior simulations. This latter is displayed on Figure 5.11. The strong dissimilarity between the two figures indicates that the stochastic effects present in the model can generate an important part of the observed variations of the trajectories, for the same set of parameters θ . This distance is particularly important for fish # 11, whose trajectory is particularly sinuous and probably difficult to reproduce (Figure 5.12). We therefore chose to split randomly this trajectory into two parts, so as to allow a choice of average Fréchet distance of 110 to set the value ν for the calibration procedure described in § 5.3.2.

Second preliminary experiments were conducted by selecting randomly values of θ_0 , modify them in $\tilde{\theta}_0 = \theta_0 + \varepsilon_{\theta_0}$ such that the relative mean square error :

$$\frac{\|\theta_0 - \tilde{\theta}_0\|_2}{\|\theta_0\|} \leq 5\%,$$

and compute by simulation the ABC criterion (5.12). A value of $\lambda^* = 1.78$ was found on average on 5000 replicates of this procedure such that 95% of the modified simulations (considered as reasonably close to θ_0) were selected by the ABC procedure, estimating the penalty by the empirical mean $\ell = 51.36$.

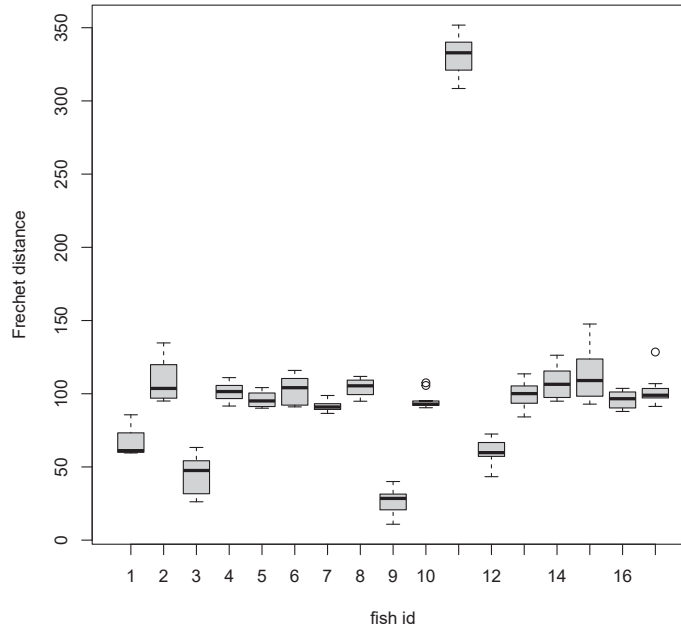


FIGURE 5.11 – Distribution per simulated fish of the distribution of the Fréchet distance due to the effect of measurement noise.

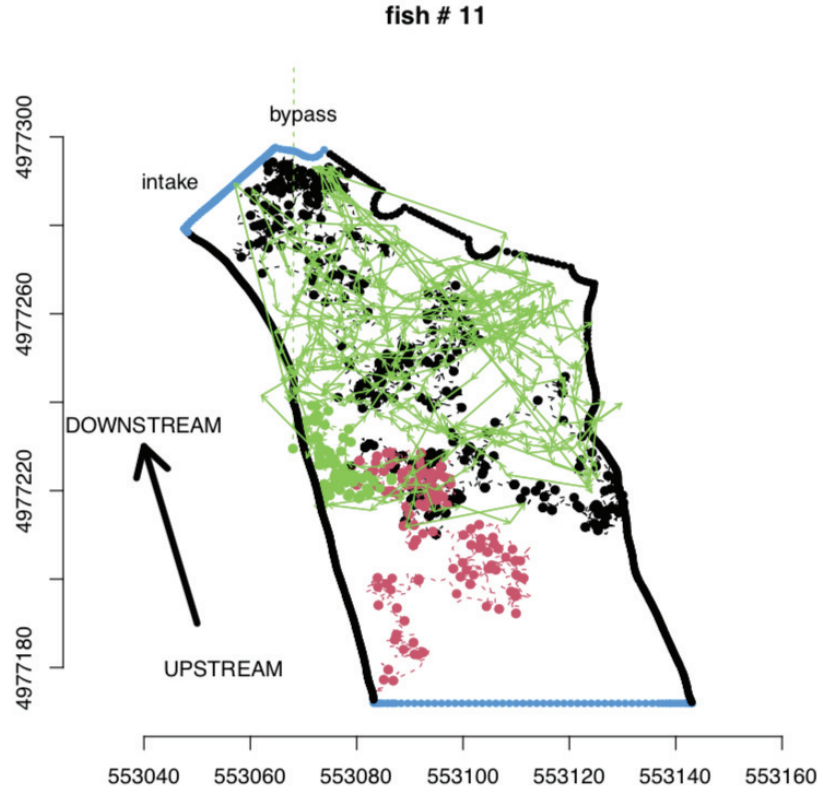


FIGURE 5.12 – Observed (green arrows) and randomly simulated trajectories (colored points) for fish # 11.

5.4.4 Experiments on the real dataset

The ABC procedure calibrated in the previous paragraph was run over the truly observed trajectories, on the basis of 6 iterations involving each 50,000 trajectories. The final distribution of the discrepancy (5.12) is plotted over Figure 5.13.

Prior and approximated posterior distributions of uncertain parameters are plotted over Figure 5.16 to 5.18. The differences between the densities traduce that we can learn from the observed trajectories for all parameters, except possibly $(v_{\text{inf}}, p_{1,3})$ for which more investigation is probably required. However, this does not strongly affect the behavior of the approximate posterior state probabilities, which are plotted over Figure 5.14. These latter computations allow to estimate by Monte Carlo the minimal value v^* of flow velocity v for which the probability of fish outmigration is becoming upper than the probability of burst, namely :

$$\begin{aligned} v^* &= \arg \min_{v>0} \{P(\text{State } C_2 > \text{State } C_3 | v) > 1/2\} \\ &\simeq 0.18 \text{ m/s,} \end{aligned}$$

which is displayed with its uncertainty on Figure 5.15. The 95%-order credibility range for this velocity is approximately $(0.15, 0.2)$ (in m/s).

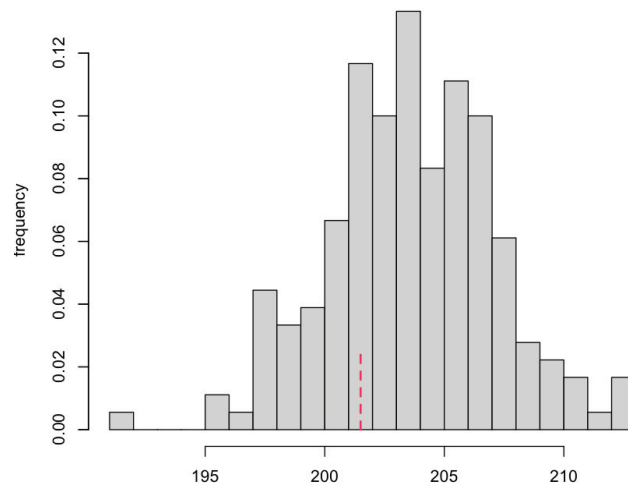


FIGURE 5.13 – Simulated distribution of discrepancy (5.12) after six steps of kernel-based resampling. The limit value $\varepsilon = 201.5$ for the discrepancy is plotted as a dotted red line.

The result of the minimum flow velocity threshold that optimize smolt outmigration is close to that obtained in the article Ben Jebria et al. 2021 that was approximately 0.2 m/s.

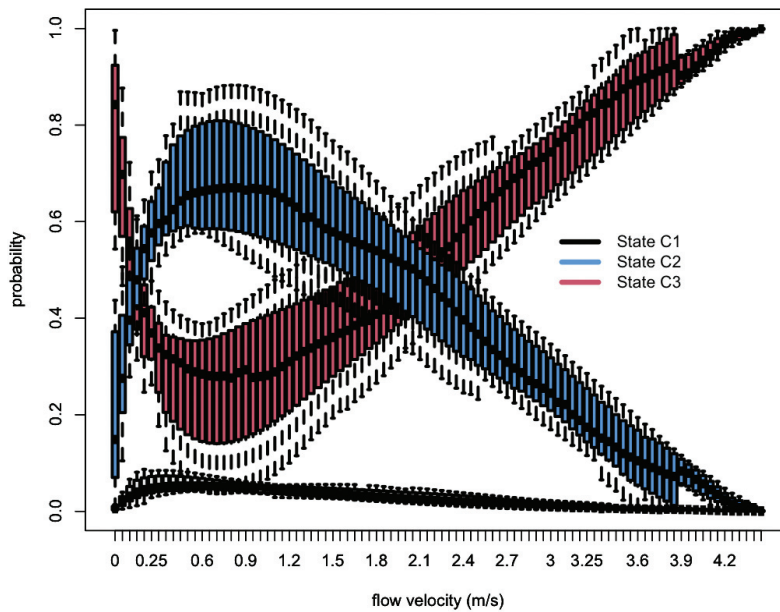


FIGURE 5.14 – Approximate posterior trajectories of state probabilities.

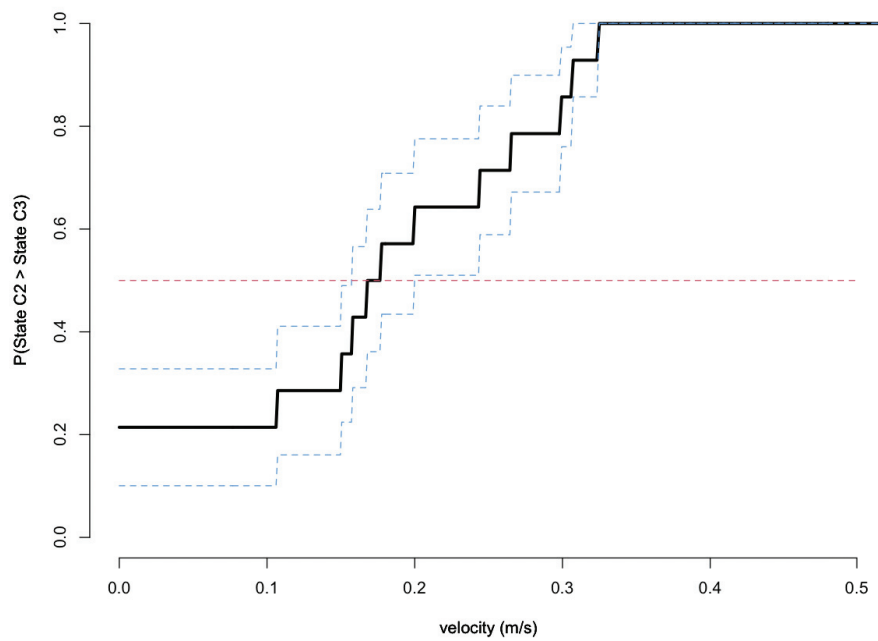


FIGURE 5.15 – Approximate posterior probability $P(\text{State } C_2 > \text{State } C_3)$ (regime shift) for low flow velocities (plotted with 95% credibility area).

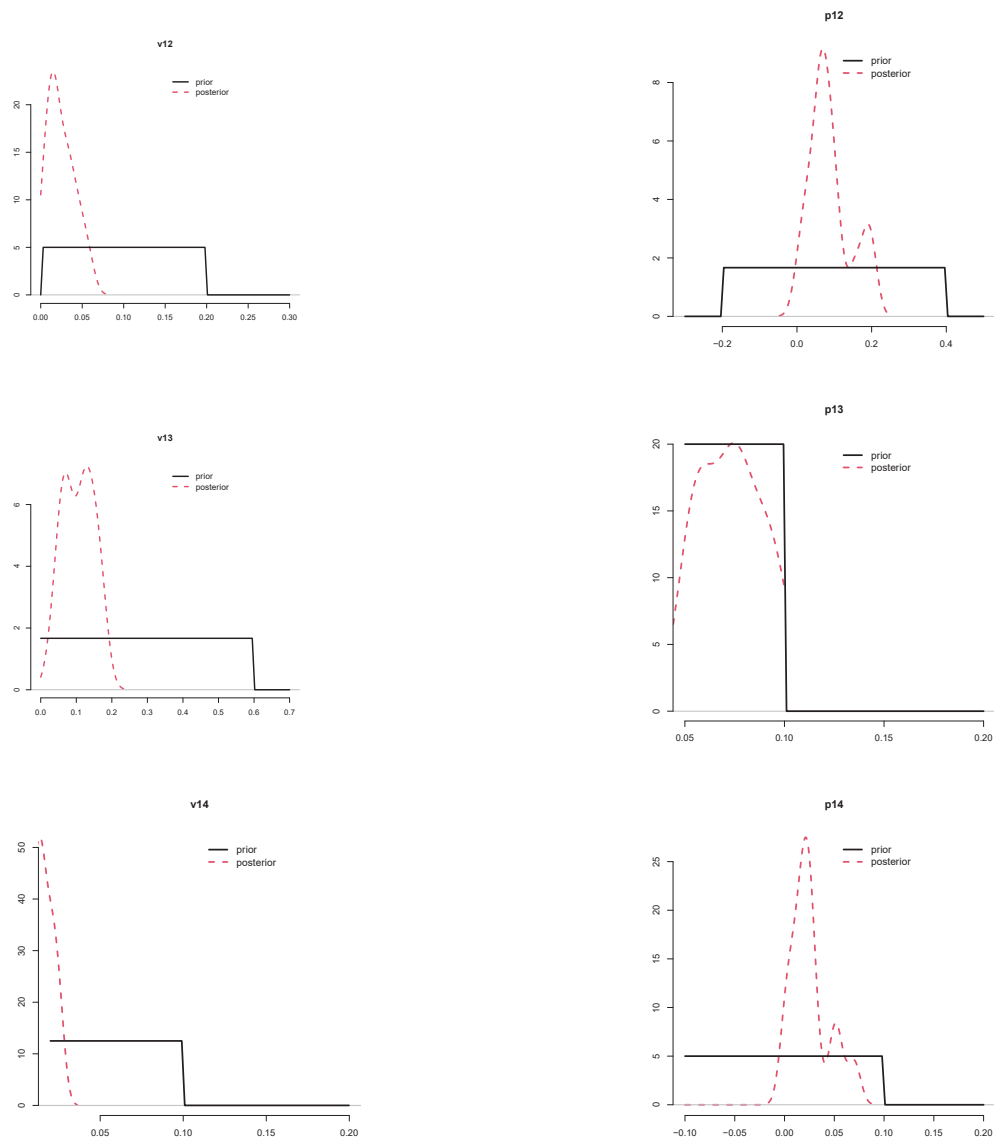


FIGURE 5.16 – Prior and approximate posterior densities for the uncertain parameters (1/3).

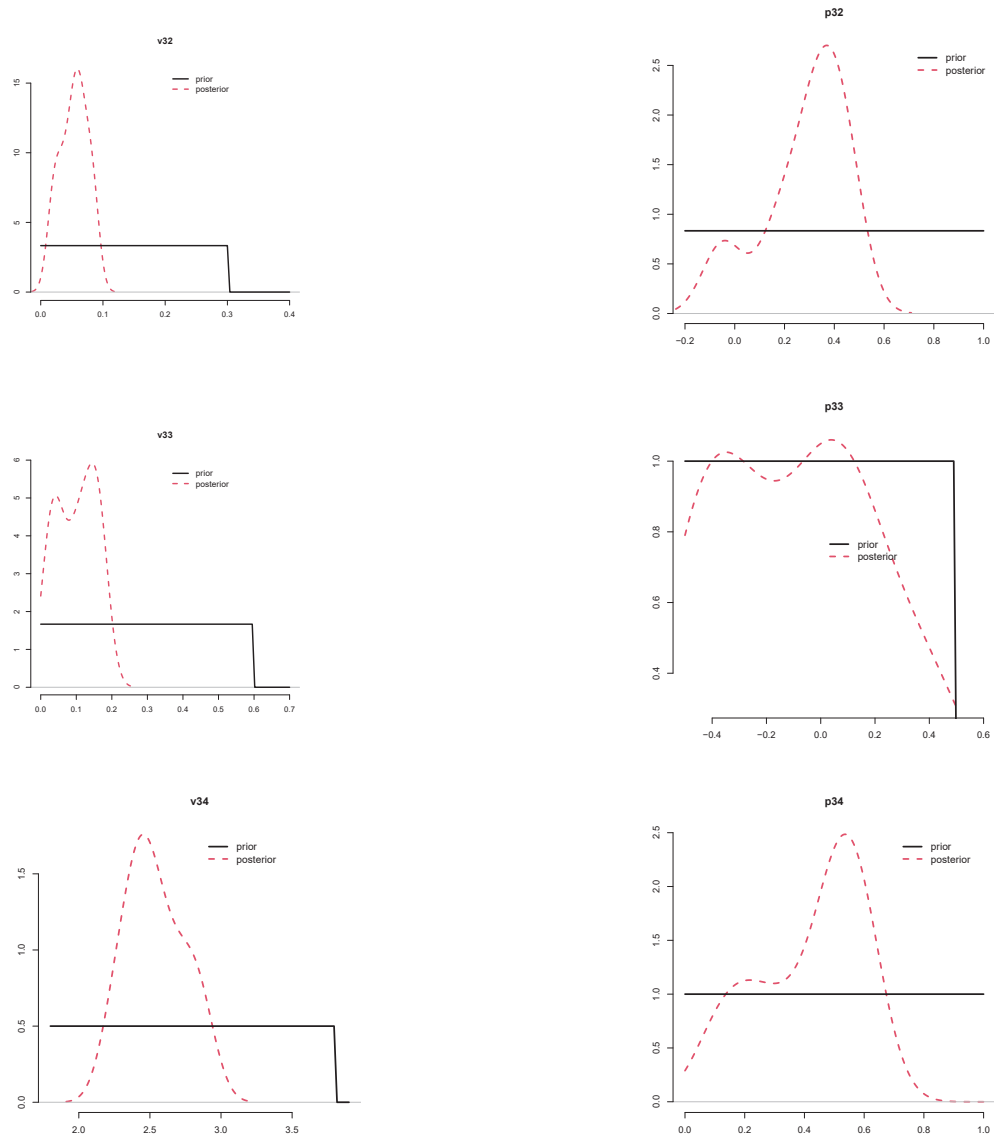


FIGURE 5.17 – Prior and approximate posterior densities for the uncertain parameters (2/3).

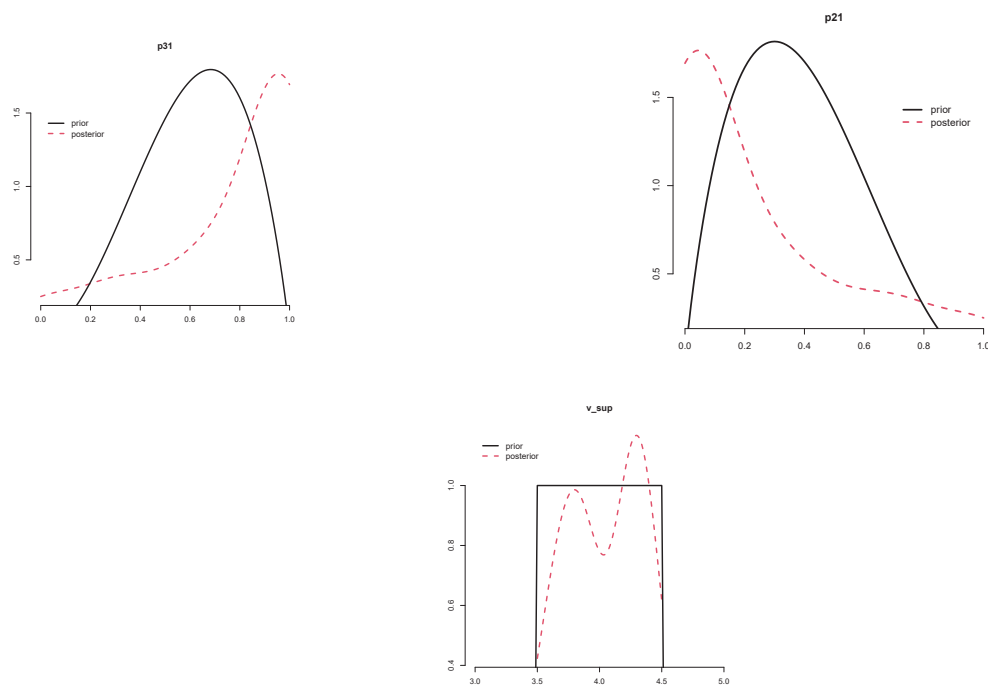


FIGURE 5.18 – Prior and approximate posterior densities for the uncertain parameters (3/3).

5.5 Discussion

Fine-scale tracking with acoustic telemetry improves knowledge into the movement ecology of aquatic animals (Espinoza et al., 2011; Nathan et al., 2008, 2022). To predict smolts positions from spatially-discrete detection data, Bayesian state space modeling is known to provide a good framework for positioning modeling (Parton et al., 2016). The present article tries to explore this paradigm by coupling a hybrid movement model with hydraulic outputs, to provide a better understanding and prediction of fish movement in hydraulic fields such as encountered in dam reservoirs and near fish passage facilities.

More precisely, the model developed in this article makes use of the underlying mechanisms (behavioral swimming state) that influence the smolts displacements, to help forecasting smolts behavioral states for improving the design of fish passage facilities. By testing the simulation abilities of the model to generate relevant smolt trajectories from measurements collected at Poutès dam, we demonstrated the reasonable abilities of this model to identify the smolts behavioural states (passive, endurance and burst swimming states; Mu et al. 2019; Silva et al. 2020; Ben Jebria et al. 2021). More precisely, according to the literature, hydraulic conditions are considered as the key drivers for smolt navigation upstream of dams (Goodwin et al., 2006, 2014; Williams et al., 2012). For low flow velocity intensities, we noticed that simulated smolts exhibit mainly an exploratory behavior, they swam mostly in a burst swimming state and moved in “circles” in the forebay. At higher flow velocity intensities, smolts display a more straightforward trajectory, travel a shorter distance, and are essentially in an endurance swimming state. These results are confirmed by the study on the influence of hydraulic conditions on smolts swimming behavior at Poutès dam (Ben Jebria et al., 2021).

In summary, the model forecasts reasonably well the response of smolts to the flow velocity intensity in the forebay of Poutès dam, which allows for inverting some of the parameters guiding these responses. Using an ABC trajectory matching inferential method, the minimum velocity intensity optimizing downstream migration – required to guide smolts in the forebay of Poutès dam – was estimated to a level which agrees with the result of the other study realized at Poutès dam (Ben Jebria et al., 2021).

Goodwin et al. 2006, 2014 combined a computational fluid dynamics model of the flow field at a dam in Columbia River and a behavioral model in which simulated fish adjust swim orientation and speed to modulate their experience to flow velocity and pressure (depth).

They developed a predictive model of smolt swimming behavior using individual agent-based models (IBM) that allow them to establish rules for fish behavior with respect to what hydraulics fish perceive.

In particular, they predicted smolt movement in relation to flow velocity, as we conducted.

In the real world, many factors influences fish movement, including light and vision (Arnold, 1974; Popper and Carlson, 1998; Haro et al., 1998), sound (Popper and Carlson, 1998), predators, and hydraulics. Although we do not presume that fish respond only to flow velocity intensity, this hydraulic condition provided remains a major stimulus to identify how the fish behave in the hydraulic field encountered at forebays of dams.

Goodwin et al. 2006, 2014 identified three swimming behaviors : when entering the forebay, the fish

followed the direction of the flow ; when flow velocity intensity $v_f \leq 0.98$ m/s, the fish swam toward faster flow velocity or when $v_f > 0.98$ m/s the fish swam upstream.

Our model of smolt swimming behavior also replicated their prediction of swimming behavior. However, the modeling of Goodwin et al. 2006, 2014 did not account for smolts swimming behavior when they encountered very low hydraulic condition intensities like those observed at Poutès dam. While the Bayesian framework used in this study allowed to take into account not only the low hydraulic conditions encountered at Poutès dam, but also integrated prior knowledge on smolts swimming behavior in higher hydraulic conditions such as those observed on the Columbia River in the United States or in the River Mandalselva in Norway (Faber et al., 2001; Johnson et al., 2009; Silva et al., 2020). Consequently, this model can also be applied in the vicinity of fish passage facilities (near the water intake and fish bypass) where flow velocity intensities are higher (Coutant and Whitney, 2000; Silva et al., 2020).

Alternatively, Whoriskey et al. 2022 developed a tool to simulate the movement of aquatic animals from measured positions by acoustic telemetry. To do this, they used a state space model (SSM) in combination with a hidden Markov model (HMM) to incorporate changes in behavioral states. They elected, as we did, to use SSM. This is a statistical model often used to model the movement of animals in ecology which has the advantage of taking into account the error of measurements (Patterson et al., 2007; Nathan et al., 2022). This research has the potential to be applicable to ecologists interested in identifying fine-scale space use and behavioural states from acoustic telemetry data (Whoriskey, 2021; Whoriskey et al., 2022).

However, Whoriskey et al. 2022 chose a relatively simple process to model animal movement with a single parameter that governs the dispersion of an animal in any direction. We adopted a biomechanical model to characterize the fish displacement, to accurately describe the actions and interactions between the fish and the surrounding water in a more realistic way, thanks to the fish thrust and drag forces (Webb, 1976). This approach remains very rarely used as it requires the development of complex hydraulic models (Arenas et al., 2015; Ben Jebria et al., 2021).

In addition, we modelled the step lengths and turning angles as separate continuous-time processes. This provide more easily accessible interpretations of movement (Parton and Blackwell, 2017).

However, this work remains preliminary before such a model can be fully coupled to an environmental forcing model (which would simulate flow and turbine operating regimes in a dam). We list below the main limitations of this work, which constitute research avenues for improving the use of this model.

First, it seems to be a priority to be able to take advantage of more varied real-world trajectory observations made under hydraulic conditions achieving a continuum between low and high fluid velocity conditions. This can only improve our knowledge of transitions between smolt behavior states, and thus help to correct the model's error with respect to reality. Such measurements are costly by nature. To guide these experiments, which are broadly defined by a number of fish tracked, a tracking time, a range of flow velocity intensities and a global cost function, the Bayesian model produced in this paper may offer some assistance. More precisely, Bayesian optimization of experimental designs, inspired by (Chaloner and Verdinelli, 1995; Müller, 1999; Huan and Marzouk, 2013) and many other researches conducted in biological or medical contexts, is most likely one of

the important uses of a model built and calibrated with the preliminary approach proposed in this paper. Such investigations will start soon.

Second, a clear limitation of the model is that the fish swimming behavior depends only on the flow velocity. However, facilitating route discovery and passage is not trivial in complex environments and may depend on a fish's previous experience. Indeed, the movement of an animal no longer depends only on the current behavioural state, but can depend on one or more past states as well; this is called the snapshot principle (Patterson et al., 2017). Therefore, an autoregressive model of swimming behavior should be developed. Since rigorous testing from the snapshot principle with respect to animal movement has not been documented (Whoriskey et al., 2022), testing the importance of the autoregressive part should be the subject of a future work, which should incorporate too a more elaborated reflection on the nature of the regression model. Here, the Bézier regression was chosen precisely because it offers more versatility than classical logistic regression when a single regressor (flow velocity) is used. When an autoregressive term is incorporated within the regression, the canonic regression framework evoked in this article could be a better candidate.

A third major research avenue, finally, is the improvement of numerical approaches used for estimation. As explained before, we believe that the use of ABC-type techniques can pave the way for refined research about the use of filtering techniques or weighted kernel density estimates (De Valpine and Hilborn, 2005) adapted to the complex nature of the state-space modeling, while avoiding some structural hypotheses on the likelihood. Another benefits of such methods is to make use of the wide literature on trajectory matching, which today knows numerous improvements in the machine / deep learning community. If ABC-type methods should, in our view, merit some improvements, the latter should first rely on the choices of discrepancies popular for multivariate time series / trajectory matching problems. Let us cite the squared Maximum Mean Discrepancy (MMD) (Briol et al., 2019), the Hausdorff distance (Taha and Hanbury, 2015) or Wasserstein distances (Muskulus and Verduyn-Lunel, 2011), that can be used to define subtrajectory dissimilarity measures investigated by (Buchin et al., 2011; Wang et al., 2019; Tao et al., 2021), among others. They could be studied in alternative or in cooperation with the use of the Fréchet distance. Especially, the promisingly robust MMD posterior bootstrap methodology recently proposed by (Dellaporta et al., 2022) seems a good candidate approach.

Note that, if, in this article, we took advantage of the computational parallelism afforded by the use of ABC, developing, testing and using trajectory models such as the one proposed in this article is made expensive by the choice of a fine time step compared to the time intervals between measurements. Characterization of the local geometry, when a simulated trajectory reaches a boundary condition, is required to propose an ecologically credible alternative, and this task can also be costly. This permanent technical constraint should help guide the improvement of inference methods for this type of problem. For such future studies, we recommend paying attention to using or developing methodologies that are directly scalable on powerful multi-core machines.

5.6 Appendix

5.6.1 Managing boundary situations

Detecting the boundary conditions In practice, testing if the predicted next position of a simulated fish trajectory can reach the inlet, intake, fish bypass or a bank of the river section cannot rely directly on comparing this position with the position of all centroids of the mesh delimiting the banks, since these banks are complicated polytopes. Rather, it is more efficient to generate the virtual fish progress line and see if it intersects with a small precision (1 meter) the curve of the nearest mesh points of the edge (red line in dotdash on Figure 5.19).

"Bouncing off" on the banks If it does, if a bank is reached, this collision line is used to generate a "bounce" line at the intersection (solid blue line in Figure 5.19), according to a relative angle :

$$\alpha \sim \mathcal{U}[0, \pi/12],$$

which is then shifted to the current position of the virtual fish (dashed blue line in Figure 5.19). More formally, denoting Ω Poutès' impoundment and $\delta\Omega$ the edge of Ω , if the predicted position $Z_t \in \delta\Omega$ at time t , then :

$$Z_{t+1} = Z_t + \alpha ||Z_t \vec{Z}_{t+1}||$$

is such that $||Z_t \vec{Z}_{t+1}|| = ||Z_{t-1} \vec{Z}_t|| = ||V_{t-1}|| \Delta_{t-1}$ and $\alpha = \text{angle}(\vec{AB}, Z_t \vec{Z}_{t+1})$, where $(A, B) \in \delta\Omega^2$ are two consecutive positions such that $A = Z_t$.

The new position proposed by the model (suggested by a square on the Figure 5.19) is established on this last straight line, in coherence with the value of the calculated velocity modulus, so as not to collide with the bank. This approach allows to generate trajectories that globally reproduce the observed behavior of fish, which more or less follow the bank before moving away from it (Figure 5.20).

FIGURE 5.20 – Illustration of the swimming behavior of smolts near the banks of the Poutès reservoir.

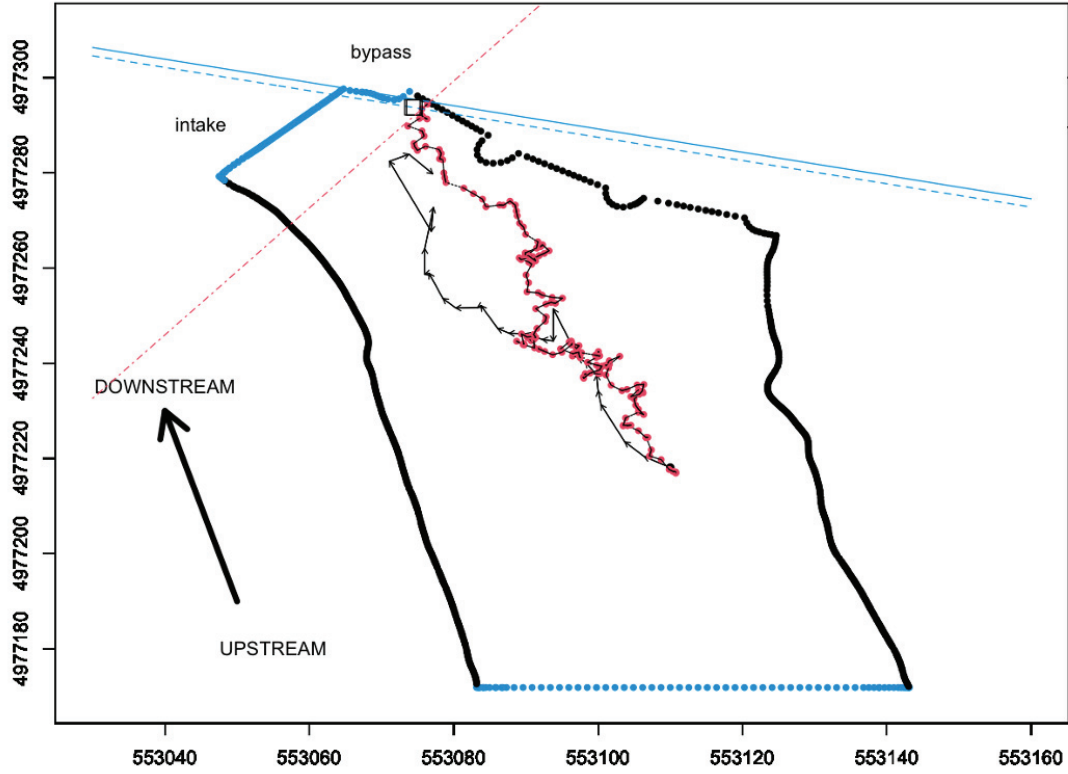


FIGURE 5.19 – Illustration of a simulated fish hitting a bank. We draw the collision line (dotdashed red line), then we generate the "bounce" line (solid blue line) that we shift to the current position. The new proposed position is located on this line, indicated by a square.

5.6.2 On the use of logistic regression

The Bézier regression was chosen in § 5.3.1 because a more classical approach by logistic regression on the state probabilities, in the spirit of the canonical work formalized by (Fokianos and Kedem, 2003; Agresti, 2003; Moysiadis and Fokianos, 2014), between others, does not appear to be flexible enough to allow the agreement with the prior knowledge available on the behavior of the fishes with respect to the fluid velocity (Figure 5.2). Indeed, the logistic regression would consist in choosing :

$$\mathbf{Y}_{t-1} = (1, \|v_f(Z_{t-1})\|)$$

and

$$\pi_{t,j}(\theta) = \frac{\exp(\theta_j^T \mathbf{y}_{t-1})}{1 + \sum_{l=1}^2 \exp(\theta_l^T \mathbf{y}_{t-1})}, j = 1, 3,$$

which would imply :

$$\pi_{t,1}(\theta) = \left(1 + \sum_{l=2}^3 \exp(\theta_l^T \mathbf{y}_{t-1})\right)^{-1} \quad \text{and} \quad \log\left(\frac{\pi_{t,j}}{\pi_{t,1}}\right) = \theta_j^T \mathbf{y}_{t-1}, \quad \text{for } j \in \{1, 3\}.$$

The monotonic nature of these probabilities with respect to $\|v_f(Z_{t-1})\|$ would not agree with the requirements that $\pi_{t,3}(\theta) = 1$ for both $\|v_f(Z_{t-1})\| = 0$ and $\|v_f(Z_{t-1})\| = v_{\text{sup}}$.

5.6.3 The Fréchet distance between discretized trajectories

The comparison between discretized and simulated trajectories is essential for the inference and validation of simulation models, and the search for appropriate metrics has been the subject of much work (e.g., Buchin et al. 2011; Cleasby et al. 2019; Sturbois 2021). Especially, the Fréchet distance (Chambers et al., 2010) between two trajectories, illustrated on Figure 5.21, offers relevant features for our problem.

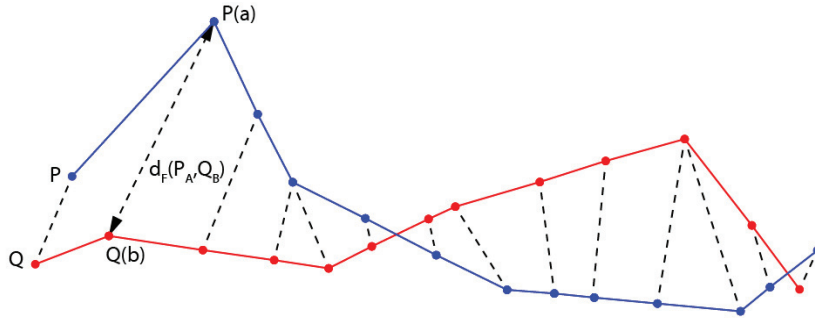


FIGURE 5.21 – Illustration of the Fréchet distance between two polygonal trajectories (Took from (Guo et al., 2017)).

More in details, the Fréchet distance is a shape-based metrics that try to catch geometric features of the trajectories. It is a distance measure for continuous shapes or curves that considers the location and sequence of points within the compared trajectories (Cleasby et al., 2019; Besse et al., 2015). As described by Cleasby et al. 2019, when calculating Fréchet distance, trajectories are approximated as polygonal curves.

To be more formal, we consider a trajectory T_A that contains a series of m timestamped two dimensional points $a_i = (a_{i,1}, a_{i,2})$:

$$T_A = ((t_1, a_1), \dots, (t_m, a_m)) \quad (5.13)$$

where t_i are ordered, discrete timestamps. The length of a trajectory is given by the number of discrete timestamps it contains. In the following explanations, T_A is compared with another trajectory T_B of length k :

$$T_B = ((t_1, a_1), \dots, (t_k, a_k)). \quad (5.14)$$

Thus trajectory T_A could be approximated as the polygonal curve $P_A[0, m]$ with m segments. P_A can be parameterized using the parameter $a \in \mathbb{R}$ so that $P_A(a)$ refers to a given position on the curve, with $P_A(0)$ and $P_A(m)$ referring to the first and last vertices of the curve respectively. Similarly, T_B could be approximated as the curve $Q_B[0, k]$ with $Q_B(b)$ referring to a position on the curve. The Fréchet distance is :

$$d_F(P_A, Q_B) = \min_{\substack{a[0;1] \rightarrow [0;m] \\ b[0;1] \rightarrow [0;k]}} \left\{ \max_{t \in [0;1]} (P(a(t)), Q(b(t))) \right\} \quad (5.15)$$

where $a(t)$ and $b(t)$ range over continuous and increasing functions, with $a(0) = 0$, $a(1) = a(m)$, $b(0) = 0$ and $b(1) = b(k)$ and d is a distance operator.

Then the Fréchet distance is shape-dependent and does not use point matching. It can be used on trajectories of different length. It is also sensitive to noise because every point of the two trajectories being compared is used in its calculation. The computation of the Fréchet distance between polygonal then piecewise smooth curves, as those characterizing animal trajectories, was studied by Alt and Godau 1995 and Rote 2007, respectively. A fast computation of the discretized distance is provided within the R package `TSdist` (Mori et al., 2016), and was used in this article.

5.6.4 Measurement noise calibration

To estimate the measurement error by telemetry, a transmitter was installed in the middle of the Poutès reservoir at a fixed position for 15 h 35 min ; represented by the red point on the figure 5.22. The position of this transmitter was recorded every 5 seconds ; this corresponds to a total of 10566 recorded positions, represented by the black dots on the figure 5.22.

To evaluate the noise of the telemetry measurements, the positioning error defined as the Euclidean distance between the positions recorded by the hydrophones and the actual position of the transmitter in the reservoir was calculated and displayed on Figure 5.23. Spatial correlation was not considered. While the general shape of this error is Gaussian, it must be noticed that the mean positioning error is 1.95 m, the median positioning error is 1.7 m, and the standard deviation is 0.98 m. Using a fitted Gaussian distribution, the distribution $\{d_F^{(k)}\}_{k \in \mathcal{K}}$ of Fréchet distances between the 17 true trajectories and their replicates (as described in § 5.3.2) is plotted on Figure 5.24.

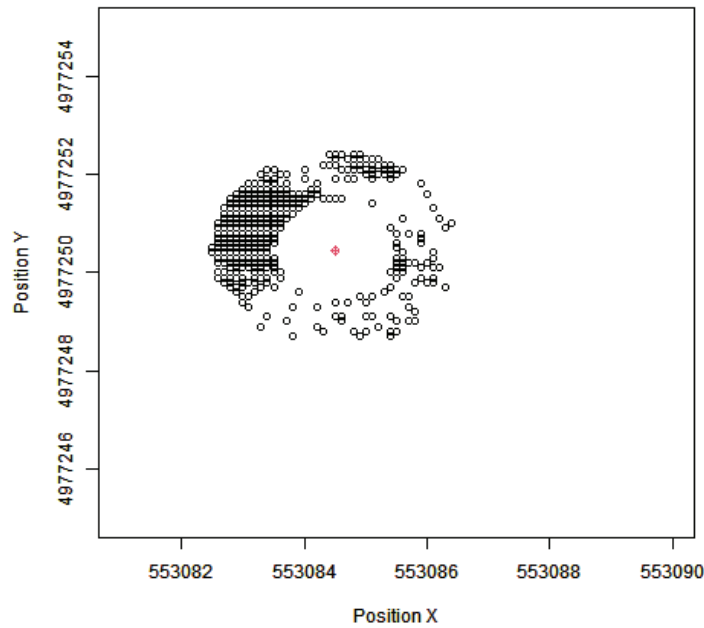


FIGURE 5.22 – Representation of the real position of the transmitter in red and the measured positions in black to evaluate the noise of the telemetry measurements at Poutès reservoir.

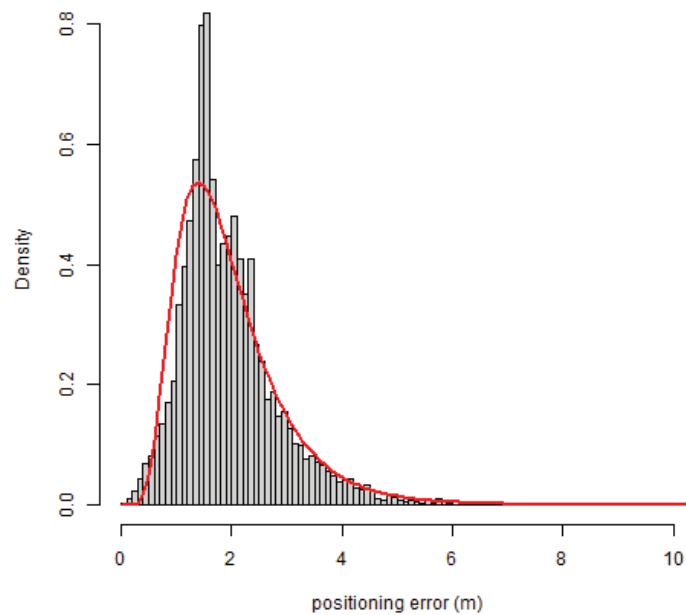


FIGURE 5.23 – Histogram of the distribution of the positioning error.

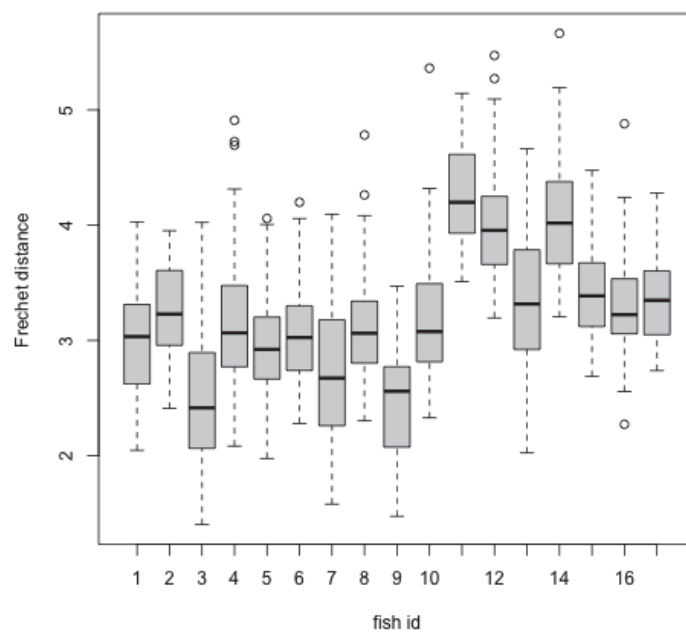


FIGURE 5.24 – Distribution per observed fish of the distribution of the Fréchet distance due to the effect of measurement noise.

5.6.5 Calibrating the random features of swimming direction angle

A study conducted in Ben Jebria et al. 2021, on the basis of the collected observations at Poutès, focused on the swimming orientations relative to behavioral state (Figure 5.25). This figure represents how hydraulic condition intensities influence smolt swimming orientation at every measured fish position (coming from acoustic telemetry), with fish positions all pooled together. This figure allows us to determine the a prior distribution of smolts swimming orientation described in Table 5.3.

Figure 5.25 showed that smolts swam with the head facing the flow direction in a passive swimming state for low hydraulic conditions intensities (very low to low) and oriented in the same direction as the flow direction in a passive swimming state at higher hydraulic conditions intensities (medium to high). In the endurance and burst swimming state, at low hydraulic conditions intensities, smolts did not have a preferred swimming orientation. Smolts swim with the head in the same direction as the water flow at medium hydraulic condition intensity and with the head facing the water flow at high hydraulic condition intensity in a burst swimming state. However, they mainly swim oriented against the flow in an endurance swimming state for higher hydraulic conditions intensities (medium to high).

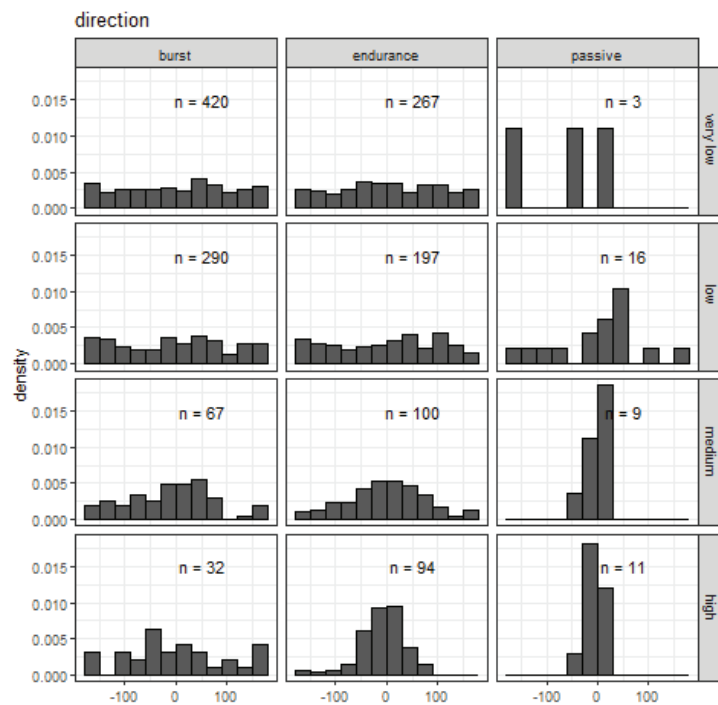


FIGURE 5.25 – Smolt swimming orientation according to behavioral state and hydraulic condition intensity (Ben Jebria et al., 2021).

Chapitre 6

Discussion générale

Afin de restaurer la continuité écologique et d'assurer la libre circulation des smolts, l'objectif consistait d'une part à apporter des connaissances supplémentaires sur leur comportement de nage dans des champs hydrauliques complexes tels que rencontrés à l'amont d'un barrage, plus particulièrement dans des retenues où les intensités des conditions hydrauliques sont assez faibles. D'autre part, nous avons développé un modèle de comportement biomécanique des smolts en dévalaison couplé à un modèle hydraulique à l'amont du barrage ; cela afin de concevoir un outil de simulation des trajectoires des smolts pour optimiser la conception d'ouvrages de franchissement efficaces.

Concernant la restauration de la libre circulation des poissons migrateurs et la compréhension de leur comportement de nage afin d'améliorer l'efficacité des ouvrages de franchissement, la plupart des études a principalement concerné la montaison. Au contraire, très peu ont porté sur la dévalaison des poissons (Larinier and Travade, 2002; Williams et al., 2012; Arenas et al., 2015; Silva et al., 2018, 2020).

Pour la dévalaison des smolts, un obstacle majeur au développement d'ouvrages de franchissement efficaces porte sur le manque de connaissances sur la façon dont les conditions hydrauliques dans les retenues et à proximité du barrage affectent les choix comportementaux des smolts (McCormick, 1998; McIlvenny et al., 2021). En particulier, dans des retenues où les intensités des conditions hydrauliques sont particulièrement faibles et engendrent un retard conséquent dans la migration (Coutant and Whitney, 2000; Ben Jebria et al., 2021). De plus, les liens entre l'hydraulique et le comportement des poissons à des échelles spatiales et temporelles fines restent peu explorés (Arenas et al., 2015; Silva et al., 2018, 2020; Nathan et al., 2022). Cela est en partie dû à des limitations techniques et à l'essor seulement récent de la télémétrie (Jonsen et al., 2003; Thorstad et al., 2012, 2017; Nathan et al., 2008, 2022) ainsi qu'à la complexité du développement de modèles hydrauliques (Khan et al., 2008; Ferrari et al., 2009).

Dans cette thèse, nous avons développé un modèle hydraulique tridimensionnel des écoulements à l'amont du barrage de Poutès. Cela nous a permis d'analyser l'influence des conditions hydrauliques sur le comportement de nage des smolts en dévalaison à l'amont du barrage à une échelle fine.

La majorité des études caractérisant le comportement de nage des poissons utilisent des méthodes de trajectométrie qui permettent de connaître la vitesse de nage et la direction de nage des poissons (Silva et al., 2020; Enders et al., 2009; Johnson et al., 2009; Vowles et al., 2014; Piper et al., 2015). Cependant, dans cette thèse, nous avons privilégié la caractérisation du comportement de nage des smolts de façon biomécanique afin de bien représenter l'interaction entre le poisson et l'écoulement

environnant. Cette approche nous a permis également d'apporter une connaissance sur l'orientation de nage du smolt, en plus de sa direction et de sa vitesse de nage (Ben Jebria et al., 2021).

La conception d'ouvrages de franchissement efficaces est très dépendante du site d'étude, de sa configuration et de l'hydraulique de la retenue du barrage (Larinier, 2001; Silva et al., 2018, 2020). Nous avons donc jugé important de concevoir dans un premier temps un outil de simulation, qui permet de prédire la trajectoire des smolts en prenant en compte leur comportement de nage vis-à-vis de l'hydraulique perçue dans la retenue. Cet outil de simulation doit pouvoir tester plusieurs configurations de l'ouvrage de franchissement, et renseigner l'intensité des conditions hydrauliques qui permet d'attirer les poissons et d'optimiser leur dévalaison. Il existe plusieurs modèles de mouvement de la faune et a fortiori de l'ichtyofaune (Michelot et al., 2019; Drouineau et al., 2017; Vermard et al., 2010; Patterson et al., 2007, 2009; Lamonica et al., 2020). Toutefois le développement de modèles de mouvement des poissons couplés à des modèles hydrauliques permettant l'élaboration d'outils prédictifs de trajectoires des poissons, demeure peu développé (Goodwin et al., 2006, 2014; Scheibe and Richmond, 2002).

Au cours de cette thèse nous avons, grâce à l'utilisation de méthodes complémentaires, apporté un éclairage nouveau sur les modalités de dévalaison des smolts à l'approche d'un barrage. Nous allons discuter chacune de ces démarches entreprises. Dans un premier temps, nous aborderons en quoi le développement d'un modèle hydraulique tridimensionnel est nécessaire pour comprendre l'influence des conditions hydrauliques sur le comportement de nage des smolts dans une retenue où les écoulements sont relativement faibles. Dans un deuxième temps, nous discuterons de la caractérisation du comportement de nage des smolts et de l'analyse de ce comportement vis-à-vis des conditions hydrauliques rencontrées à l'amont du barrage de Poutès. Pour terminer nous discuterons du développement du modèle de mouvement de nage des smolts et de l'outil de simulation permettant de prédire la trajectoire des smolts à l'approche d'ouvrages de franchissement, dans le but de les optimiser.

Apport du modèle hydraulique 3D dans l'amélioration des ouvrages de franchissement

Dans le chapitre 3, nous avons développé un modèle hydraulique tridimensionnel des écoulements à l'amont du barrage de Poutès. Ce modèle a été validé en comparaison avec des mesures de vitesses transversales mesurées par ADCP sur le terrain. Les résultats ont montré que le modèle représente bien les écoulements dans le réservoir à l'amont du barrage. De plus, la taille des mailles variant de 2 m dans le réservoir à 20 cm proche des parois, de l'exutoire de dévalaison et de la prise d'eau permet de produire des simulations à une échelle fine. Ainsi le développement du modèle CFD a permis d'obtenir des conditions hydrauliques à une échelle suffisamment fine pour être perceptibles par les smolts.

Il est nécessaire de développer un modèle hydraulique au préalable pour pouvoir étudier, comprendre et apporter des connaissances supplémentaires sur le comportement de nage des smolts à l'amont d'un barrage et pour à terme optimiser l'efficacité des ouvrages de franchissement. De nombreux paramètres environnementaux influencent la navigation des smolts, cependant ce sont les paramètres hydrauliques qui guident principalement le déplacement et le comportement de nage des poissons (Popper and Carlson, 1998; Pavlov et al., 2002; Goodwin et al., 2006; Williams et al., 2012). Il est bien admis que la vitesse du fluide, l'accélération de l'écoulement et l'énergie cinétique turbulente ont un impact sur le comportement de nage des smolts (Haro et al., 1998; Liao et al., 2003; Liao,

2007; Kemp et al., 2008; Tarrade et al., 2008; Enders et al., 2009; Johnson et al., 2009; Silva et al., 2011, 2012; Gao et al., 2016).

En effet, les smolts sont sensibles d'une part à la vitesse du fluide, car ils ont une préférence à nager dans la veine de courant principale où la vitesse est assez élevée (Faber et al., 2001; Liao, 2007; Evans et al., 2008; Williams et al., 2012), et d'autre part aux accélérations de l'écoulement. Ils n'apprécient généralement pas les brusques changements temporels et spatiaux de la vitesse du fluide, notamment à proximité de l'exutoire de dévalaison (Enders et al., 2012; Haro et al., 1998; Vowles and Kemp, 2012). Aussi, ils présentent une forte sensibilité à la turbulence, traduite par l'énergie cinétique turbulente; les smolts apprécient les intensités assez faibles de la turbulence qui leur permettent d'économiser de l'énergie mais évitent les turbulences trop élevées (Silva et al., 2020; Johnson et al., 2009; Scruton et al., 2008; Odeh et al., 2002). C'est pour cela que nous avons réalisé une analyse détaillée de l'hydraulique dans la retenue du barrage en termes de distributions spatiales de la vitesse d'écoulement, d'accélération de l'écoulement et d'énergie cinétique turbulente.

Toutes ces sensibilités aux conditions hydrauliques environnant les smolts sont captées par leurs organes sensoriels, en particulier l'oreille interne et la ligne latérale (Dijkgraaf, 1963; Kalmijn, 1989; Montgomery et al., 1997; Braun and Coombs, 2000; Montgomery et al., 2001; Bleckmann and Zelick, 2009; Mogdans, 2019). Il est donc important de simuler des conditions hydrauliques perceptibles par les smolts.

Malgré le développement des capacités des calculateurs, il existe encore très peu de modèles hydrauliques développés et encore moins de modèles simulant des écoulements tridimensionnels dans les retenues à l'amont des barrages (Meselhe and Odgaard, 1998; Meselhe et al., 2000; Blank and Weber, 2000; Li et al., 2006; Ferrari et al., 2009; Khan et al., 2008). Cela est dû à la complexité de la bathymétrie des retenues (Ferrari et al., 2009; Khan et al., 2008). La modélisation tridimensionnelle et la réalisation du maillage sont particulièrement complexes et requièrent beaucoup de temps de réalisations et de calcul. Les quelques modèles existants ont été développés aux Etats-Unis et modélisent essentiellement les écoulements dans une zone restreinte proche des ouvrages de franchissement de la Columbia River (car cela nécessite moins de temps de calcul et de modélisation de la bathymétrie; Meselhe and Odgaard 1998; Meselhe et al. 2000; Muste et al. 2001; Lai et al. 2003). Dans ce travail de thèse, nous avons pu développer un modèle hydraulique sur une assez grande zone de la retenue à l'amont du barrage de Poutès (200 m à l'amont), en plus de l'exutoire de dévalaison et de la prise d'eau. Aussi, la plupart des modèles hydrauliques développés concernent des ouvrages où les écoulements sont particulièrement intenses (Szabo-Meszaros et al., 2019; Arenas et al., 2015; Silva et al., 2020; Ferrari et al., 2009; Khan et al., 2008; Faber et al., 2001). Or, les intensités des écoulements à l'amont du barrage de Poutès sont particulièrement faibles, ce qui nous a contraint à représenter la surface libre à une hauteur d'eau constante.

Ainsi, à chaque simulation pour laquelle la hauteur d'eau change, un nouveau modèle est construit. L'idéal serait donc d'utiliser d'autres méthodes de mécanique des fluides qui permettent de modéliser des hauteurs d'eau variant dans le temps, comme la méthode VOF (Volum of fluid) qui prédit l'élévation de la surface libre. Cependant, très peu de modèles hydrauliques utilisant cette méthode sont développées pour étudier les écoulements dans les retenues en raison des ressources de calcul requises pour des simulations précises (Ferrari et al., 2009). Ces calculs de la surface libre donnent des informations plus précises sur les caractéristiques de l'écoulement, mais elles sont plus coûteuses en termes de calcul et exigent des maillages complexes (Ferrari et al., 2009). Ces modèles sont employés principalement à des applications hydrauliques pour simuler les écoulements sur des zones restreintes (par exemple au niveau des déversoirs; Johnson and Savage 2006; Turan et al. 2008).

Une autre composante importante de la conception et de l'optimisation des ouvrages de franchissement concerne la différence de comportement de nage des smolts d'un site à l'autre (Silva et al., 2018). En effet, la compréhension du comportement de nage des smolts en dévalaison dans un milieu fragmenté par les barrages est liée aux caractéristiques environnementales de celui-ci (Goodwin et al., 2014; Arenas et al., 2015; Williams et al., 2012; Nathan et al., 2008).

Dans notre site d'étude, les résultats de la modélisation du champ d'écoulement à l'amont du barrage montrent que la veine du courant principale se dirige majoritairement vers les turbines à cause de la géométrie du site. Ainsi, étant donné la prévalence des smolts à nager dans la veine principale du courant (Coutant and Whitney, 2000), ils risquent d'être entraînés vers les turbines. Nous avons également constaté que le passage des smolts vers l'exutoire de dévalaison ou les turbines dépend essentiellement de leur position initiale à l'entrée de la retenue (les smolts de la rive droite se dirigent vers l'exutoire de dévalaison tandis que ceux de la rive gauche tendent à se diriger vers les turbines). Cette information est importante car cela nous permet de pouvoir guider le smolt dans la retenue vers la voie de passage qui optimise sa dévalaison.

La simulation numérique des écoulements a également révélé qu'il n'y a pas de variations spatiales verticales des intensités des conditions hydrauliques dans la retenue à l'amont du barrage, excepté dans la colonne d'eau proche de l'exutoire de dévalaison et de la prise d'eau où nous observons de légères variations spatiales. De façon générale, les intensités des conditions hydrauliques restent suffisamment faibles pour ne pas affecter le comportement de nage des smolts (Johnson et al., 2009; Goodwin et al., 2014; Scruton et al., 2008; Odeh et al., 2002). Ceci est cohérent avec d'autres études expérimentales et numériques (Odeh et al., 2002; Scruton et al., 2008; Silva et al., 2020) qui ont démontré que les smolts arrivent à maintenir leur stabilité et leur capacité de nage lorsqu'ils rencontrent de faibles intensités de turbulence. L'intérêt de réaliser un couplage entre un modèle hydraulique 3D et un suivi de positions de smolts par télémétrie acoustique 3D ne semble donc pas primordial.

Toutefois, toute solution envisagée pour éviter de fortes mortalités des smolts doit reposer sur une bonne compréhension de leur comportement de nage en dévalaison à l'amont des ouvrages de franchissement. La modélisation des écoulements est une étape préliminaire. En plus de savoir quelles conditions environnementales influencent le déplacement des smolts, il faut comprendre précisément comment ils réagissent vis-à-vis de l'environnement qu'ils rencontrent. Ces résultats de modélisation constituent une donnée importante pour optimiser l'attractivité des ouvrages de franchissement et le guidage des poissons.

Influence des conditions hydrauliques sur le comportement de nage des smolts

Le couplage entre la télémétrie 2D et le modèle hydraulique 3D entrepris au cours de cette thèse a mis en évidence l'influence des conditions hydrauliques sur les mouvements des smolts. Nous avons identifié un seuil minimal de vitesse du fluide de 20 cm/s qui permet aux smolts de se déplacer rapidement dans la retenue, de les guider et d'optimiser leur dévalaison. Ce seuil leur permet de réduire le temps de résidence dans la retenue et par conséquent d'éviter les retards dans sa migration. Ces retards représentent une des causes du déclin des populations des poissons migrateurs (Marschall et al., 2011; Tétard et al., 2021). En effet, l'influence d'une centrale hydroélectrique isolée présente un risque sur la dévalaison du smolt (Coutant and Whitney, 2000; Scruton et al., 2008). Toutefois, c'est l'effet cumulé de l'ensemble des obstacles rencontrés qui induit un retard considérable de la

dévalaison avec un décalage de la fenêtre de migration et donc la perte des capacités d'adaptation physiologique au passage en eau de mer (Marschall et al., 2011; McCormick and Saunders, 1987; McCormick, 1998; Coutant and Whitney, 2000; Steinbach, 2001; Monnerjahn, 2011; Nyqvist et al., 2017b).

La caractérisation du comportement de nage des smolts à l'aide de la deuxième loi de Newton est particulièrement pertinente dans ce cas puisqu'elle permet de définir précisément l'interaction entre le poisson et le fluide et de savoir comment le poisson s'oriente. La force de poussée et l'orientation de la nage des poissons nous donnent une description précise du comportement des smolts, révélant si les smolts nagent avec la tête dans la même direction que l'écoulement ou avec la tête face à l'écoulement et dans quelle mesure ils résistent ou non à l'écoulement. De plus, cette approche révèle comment les poissons réagissent à ce qu'ils perçoivent. C'est une information indispensable au développement de modèles prédictifs de nage du poisson car c'est grâce à l'orientation que nous pouvons savoir dans quelle direction le poisson va se diriger.

Les résultats obtenus en appliquant cette méthode sur les smolts présentent des constats similaires à ceux d'Arenas et al. 2015. Dans leur étude sur l'effet de l'accélération du fluide sur les smolts dans le fleuve Columbia, aux États-Unis, ils ont constaté que les trois salmonidés étudiées (saumon quinnat, saumon rouge et truite arc-en-ciel) présentent des forces de poussée proche de celle du saumon atlantique (autour de 10^{-2} N), mesurées au barrage de Poutès.

Cette approche newtonienne permet d'établir des règles comportementales qui peuvent ensuite être utilisées dans des modèles de prédiction de la trajectoire des poissons, en utilisant des modèles à espaces d'état (SSM) comme ce que nous avons réalisé (détaillé au chapitre 5; Jonsen et al. 2005; Johnson et al. 2009; Patterson et al. 2007; Pedersen et al. 2008; McClintock et al. 2012; Jonsen et al. 2013; Auger-Méthé et al. 2021), ou les modèles de Markov cachés (HMM; Joo et al. 2013; McClintock et al. 2020; Auger-Méthé et al. 2021) afin d'optimiser la conception d'ouvrages de franchissement et de solutions de guidage.

Nos résultats ont montré que selon l'intensité des conditions hydrauliques, les smolts présentent un comportement de nage complètement différent. Lorsque les intensités des conditions hydrauliques sont relativement fortes, les smolts présentent une trajectoire quasi-rectiligne, ils parcourent une distance assez courte (distance moyenne : 228 m) en un temps assez court (temps moyen : 10 min). Les smolts sont principalement dans un état de nage d'endurance, ils ont tendance à se déplacer en dérive dans la même direction que l'écoulement, orientés contre le courant (Ben Jebria et al., 2021). Au contraire, lorsque les intensités des conditions hydrauliques sont plus faibles, les smolts présentent une plus grande force de poussée et un état de nage en sprint prévaut. Ils ne présentent pas d'orientation ou de direction de nage prédominante; ils semblent explorer la retenue. Par conséquent, les smolts se retrouvent désorientés, ils parcourent une plus grande distance (en moyenne 32 km), pendant des temps assez longs (en moyenne 15h) avant de passer par l'une des voies de passage du barrage (prise d'eau, exutoire de dévalaison ou déversoir). En effet, dans les grandes retenues, les champs de l'écoulement peuvent être à peine perceptibles pour les poissons, ce qui peut les désorienter (Schwinn et al., 2019; Tétard et al., 2019; Johnson et al., 2009; Goodwin et al., 2014; Ben Jebria et al., 2021). Ce phénomène engendre des retards de migration.

Nos résultats ont mis en évidence la nécessité d'avoir une vitesse minimale pour optimiser la dévalaison des smolts dans une large retenue où les conditions hydrauliques peuvent être de faible intensité. Cela peut constituer une solution pratique pour l'optimisation de la gestion des ouvrages de franchissement des retenues où les intensités des conditions hydrauliques sont faibles. Au contraire, les barrages où l'intensité des conditions hydrauliques est très élevée (Arenas et al., 2015; Silva et al.,

2020; Szabo-Meszaros et al., 2019; Haefner and Bowen, 2002; Scheibe and Richmond, 2002; Goodwin et al., 2006, 2014) conduisent à des recommandations des conditions hydrauliques plafonds à ne pas dépasser afin d'optimiser la dévalaison des smolts et d'améliorer la gestion des centrales hydroélectriques (Faber et al., 2001; Johnson et al., 2000, 2009; Enders et al., 2009).

Coutant and Whitney 2000 ont proposé que la turbulence des rivières est utilisée par les poissons anadromes pour accélérer leur dévalaison. Ils suggèrent que les smolts en migration peuvent rechercher des caractéristiques d'écoulement instables dans les rivières pour trouver des zones de vitesse plus élevées. En revanche, une turbulence très élevée peut être préjudiciable aux poissons (Odeh et al., 2002). Lorsque l'accélération du fluide est assez élevée, le poisson a tendance à s'orienter la tête face à l'écoulement, et à éviter les zones de fortes accélérations (Arenas et al., 2015; Johnson et al., 2009; Enders et al., 2012). Dans leur étude expérimentale sur la compréhension des effets de l'intensité de la turbulence hydraulique sur les poissons juvéniles, Odeh et al. 2002 ont créé différents niveaux d'intensité de turbulence qui ressemblent aux conditions de terrain. Ils ont en effet conclu que, à faible intensité de turbulence, les poissons ont maintenu leur capacité de nage et leur orientation. Plus tard, Scruton et al. 2008 ont constaté que les exutoires de dévalaison associés à une énergie cinétique turbulente moindre présentent une efficacité de franchissement plus élevée (80–87 %).

La présente étude apporte des éléments nouveaux sur la compréhension du comportement de nage des smolts en amont d'un barrage en fonction de plusieurs conditions hydrauliques. Puisque nous disposons seulement de données de télémétrie 2D, et des résultats des autres études sur le comportement des smolts – qui ont démontré que ces derniers ont tendance à nager proche de la surface libre (Coutant and Whitney, 2000; Scruton et al., 2002; Gao et al., 2016) –, nous avons supposé que les poissons nagent à deux mètres sous la surface de l'eau. De plus, d'après les simulations numériques en 3D des écoulements présentées au chapitre 3, il y a très peu voire pas de variations spatiales des intensités des conditions hydrauliques sur la verticale. Il n'est ainsi pas nécessaire de connaître la position verticale exacte du smolt dans la retenue de Poutès.

Malgré le nombre limité d'individus considérés dans l'analyse, la haute résolution temporelle de la détection nous a permis d'avoir un ensemble de données avec 1618 positions des smolts, ce qui correspond à un nombre suffisant pour avoir des résultats statistiquement significatifs. Comme chaque individu a été relâché dans des conditions environnementales spécifiques, il pourrait y avoir des confusions entre les différences inter-individuelles et les conditions environnementales. Mais le peu de donnée ne nous a pas permis d'analyser les variations inter-individuelles.

Idéalement, un plus grand nombre d'individus marqués aurait limité ce risque mais il n'a pas été possible de capturer plus de poissons sauvages en raison de l'état de la population (Dauphin and Prévost, 2013). Des saumons d'élevage avaient été alors utilisés dans l'étude de télémétrie pour augmenter le nombre d'individus. Nyqvist et al. 2017b et Tétard et al. 2021, n'ont pas détecté de différences comportementales de nage entre les saumons sauvages et d'élevage alors que de nombreuses études ont signalé des différences entre eux. Au contraire, Aarestrup et al. 1999; McCormick 1998; Thorstad et al. 2012 ont suggéré que les éventuelles différences observées entre les saumons sauvages et d'élevage dans le comportement migratoire étaient liées à la composante génétique.

La caractérisation du comportement de nage des smolts en dévalaison à l'amont d'obstacles physiques d'origine anthropique et l'analyse de ce comportement en réponse au champ hydraulique rencontré dans les retenues permettent d'améliorer les connaissances sur le mouvement des smolts. Cela permet aussi d'établir des règles comportementales pour l'élaboration de modèles prédictifs de comportement

de nage des smolts à l'approche d'ouvrage de franchissement.

Modèle statistique du comportement de nage des smolts dans une retenue de barrage

Concernant la problématique de dévalaison des smolts à l'approche d'un ouvrage de franchissement, il n'existe pas de solution générale, l'efficacité des dispositifs de franchissement est généralement spécifique à chaque site d'étude et dépend de facteurs morphologiques, hydrologiques, opérationnels et écologiques locaux (Larinier, 2001; Silva et al., 2018; Wilkes et al., 2018; Szabo-Meszaros et al., 2019).

La conception des solutions de dévalaison dépend souvent d'une approche par "essais et erreurs" (Katopodis and Williams, 2012), parfois suivie de révisions de la mesure. L'approche "essais, erreurs et révisions" est généralement coûteuse et longue en raison du suivi nécessaire avant et après la mise en œuvre. Pour réduire le temps et les coûts, il est nécessaire de disposer de meilleurs outils permettant de tester différentes mesures sans mise en œuvre effective (Szabo-Meszaros et al., 2019).

En raison de limitations techniques, les liens entre l'hydraulique et le comportement des poissons à des échelles spatiales et temporelles fines ont principalement été explorés dans des conditions de laboratoire ou à l'aide de modèles physiques réduits (Coutant and Whitney, 2000; Silva et al., 2011; Williams et al., 2012). Les modèles réduits constituent un moyen sûr de tester des solutions liées à la mécanique des fluides. Pourtant, la mise en place d'essais expérimentaux du comportement de nage des poissons en modèle réduit est limitant à petite échelle, car le comportement des poissons ne peut pas être mis à l'échelle du modèle réduit. En outre, lors de ces essais en conditions contrôlées, les poissons sont transportés et placés dans un environnement confiné, loin des repères et des horaires naturels, ce qui peut réduire leur capacité de nage ou modifier leur comportement en induisant un stress.

L'analyse et la gestion de l'impact de la fragmentation des cours d'eau sur la continuité écologique, ainsi que la planification de la restauration aquatique, nécessitent la disponibilité d'outils d'ingénierie simulant les mouvements complexes des poissons migrateurs (Goodwin et al., 2006; Scheibe and Richmond, 2002). Ces outils capables de relier l'impact des champs hydrauliques à l'amont d'un barrage au comportement de mouvement des poissons demeurent peu développés (Tischendorf, 1997; Steel et al., 2001).

Les récentes avancées technologiques en télémétrie acoustique ont transformé la compréhension de l'écologie du mouvement des animaux (Nathan et al., 2022). Les progrès récents des techniques de suivi des animaux permettent d'obtenir des informations détaillées sur les mouvements des espèces dans l'espace et dans le temps (Hussey et al., 2015; Nathan et al., 2022). Les données de suivi des animaux à haute résolution permettent d'évaluer directement la façon dont ils réagissent aux changements environnementaux et anthropiques.

Ces progrès récents dans les méthodes de télémétrie et la modélisation de la dynamique des fluides computationnelle (CFD) permettent donc d'acquérir la position des poissons et les propriétés du champ d'écoulement dans des conditions naturelles, à des résolutions spatio-temporelles élevées et avec une grande précision (Szabo-Meszaros et al., 2021; Nathan et al., 2022). Ces modèles sont des outils importants pour la compréhension et la prédiction du comportement de nage des poissons, et pour le développement de mesures de restauration de la continuité écologique (Szabo-Meszaros

et al., 2021).

Ainsi, à partir des mesures télémétriques et du modèle hydraulique du barrage de Poutès, nous avons donc développé un modèle mathématique prédisant le comportement de nage des smolts afin d'optimiser la conception d'ouvrages de franchissement. Nous avons utilisé une approche bayésienne de modèle à espace d'état pour modéliser le déplacement des smolts en fonction de l'intensité de la vitesse du fluide l'environnant.

Nous avons choisi de modéliser la dynamique des smolts à l'aide de la deuxième loi de Newton afin d'expliquer leur déplacement à l'aide de l'état comportemental de nage des smolts défini au chapitre 4 (passif, endurant, sprint). En effet, il est important d'apporter une meilleure compréhension du comportement de nage des smolts qui induit leur déplacement pour contribuer à améliorer la gestion des ouvrages de franchissement (McIlvenny et al., 2021).

Nous avons opté pour un modèle à espace d'état (SSM) car les données de positions provenant de mesures par télémétrie peuvent contenir de grandes quantités d'erreurs (Roy et al., 2014; Baktoft et al., 2017). Les SSM sont devenus un outil de plus en plus utilisé en écologie comportementale (Auger-Méthé et al., 2021), et se sont avérés particulièrement utiles pour prédire les emplacements réels à partir de données de déplacement bruitées (Auger-Méthé et al., 2021; Johnson et al., 2009; Jonsen et al., 2005; McClintock et al., 2012; Patterson et al., 2007; Pedersen et al., 2008).

L'approche bayésienne permet de prendre en compte les connaissances a priori sur le comportement de nage des smolts (état comportementale et orientation de nage relativement à la direction de l'écoulement) vis-à-vis de l'intensité de la vitesse du fluide rencontrée par les smolts dans les retenues à l'amont d'un barrage. Pour la construction de ce modèle, nous avons pris en compte les connaissances sur le comportement de nage des smolts provenant de l'analyse de leur comportement de nage en fonction des conditions hydrauliques au barrage de Poutès effectuée au chapitre 4. Etant donné que les conditions hydrauliques rencontrées restent relativement faibles comparées à d'autres retenues, comme sur le fleuve Columbia aux Etats-Unis ou la rivière Mandalselva en Norvège (Goodwin et al., 2014; Arenas et al., 2015; Silva et al., 2020), l'approche bayésienne permet également de prendre en compte des connaissances a priori venant d'autres études scientifiques sur le comportement de nage des smolts relativement aux fortes intensités des vitesses du fluide également. Ainsi, le modèle développé permet de prédire la trajectoire des smolts en réponse à une large gamme d'intensité de la vitesse du fluide rencontrée dans les retenues.

De nombreux facteurs influencent le mouvement des poissons, notamment la lumière (Popper and Carlson, 1998; Arnold, 1974; Haro et al., 1998), le son (Arnold, 1974), les prédateurs et l'hydraulique. Bien que nous ne présumions pas une réponse des poissons uniquement due à l'intensité de la vitesse du fluide, cette condition hydraulique fournie, reste un stimulus majeur pour identifier comment les poissons se comportent dans le champ hydraulique rencontré dans les retenues des barrages.

Nous avons démontré les capacités de ce modèle à identifier les états comportementaux des smolts (états de nage passive, d'endurance et de sprint) en comparant les trajectoires simulées avec celles mesurées au barrage de Poutès Mu et al. (2019); Silva et al. (2020); Ben Jebria et al. (2021).

Grâce à cet outil de simulation, il a été possible de déterminer l'intensité de la vitesse du fluide qui optimise la dévalaison des smolts. Une vitesse minimale de 18 cm/s est nécessaire pour guider les smolts dans la retenue du barrage de Poutès. Ce résultat permet d'appuyer les résultats obtenus dans l'analyse réalisée au chapitre 4.

Le modèle développé prévoit bien la réponse des smolts à l'intensité de la vitesse du fluide à l'amont du barrage de Poutès.

La comparaison entre les trajectoires observées et simulées des smolts au barrage de Poutès a montré

que le modèle reproduisait correctement leur comportement de nage. Pour les faibles intensités de vitesse du fluide, les smolts présentent majoritairement un comportement exploratoire, ils nagent principalement en état de sprint et se déplacent en décrivant des cercles dans la retenue. Pour des intensités de vitesse du fluide plus élevées, les smolts ont une trajectoire plus directe, parcourent une distance plus courte et sont essentiellement dans un état de nage endurante. Ces résultats sont confirmés par l'étude de l'influence des conditions hydrauliques sur le comportement de nage des smolts au barrage de Poutès (Ben Jebria et al., 2021).

Par conséquent, le couplage d'un modèle de dynamique des fluides avec un modèle de mouvement des smolts a permis de mieux comprendre leur comportement en relation avec l'hydraulique. De tels modèles couplés permettent de simuler les actions et interactions du smolt avec l'environnement pour comprendre et prédire son comportement, et ainsi faciliter sa dévalaison. Ce type de modèle constitue alors un outil utile pour l'ingénierie écologique. L'avantage d'un tel modèle, dit génératif, est la possibilité de calculer des indicateurs pratiques, telle que la probabilité de passage par l'exutoire de dévalaison du smolt dans des conditions hydrauliques spécifiques. Il permet également de déterminer la meilleure position pour un exutoire de dévalaison.

Ainsi à partir du modèle hydraulique, de l'analyse du comportement de nage vis-à-vis de la vitesse du fluide, nous avons élaboré un modèle de prédiction de nage des smolts dans une retenue à l'approche d'ouvrages de franchissement, qui permet de tester plusieurs configurations d'emplacement de l'exutoire de dévalaison ce qui est limité avec les modèles réduits.

De plus, cet outil de simulation est particulièrement utile car cela permet de réduire les temps et les coûts conséquents pour l'échantillonnage et le suivi des smolts. Par là même, il n'est plus nécessaire d'aller sur le terrain pour échantillonner et effectuer des mesures télémétriques. En effet, ce type d'outil de simulation permet de modifier et de tester directement les paramètres du modèle (en faisant varier la vitesse, la position de l'exutoire de dévalaison, *etc.*) afin d'analyser comment le smolt se comporte et se déplace ; pour à terme améliorer la gestion des ouvrages de franchissement, sans mise en œuvre expérimentale. Ainsi, ces modèles de comportement de nage des smolts contribuent à la restauration de la continuité écologique et au maintien des stocks des populations (Silva et al., 2018; Szabo-Meszaros et al., 2019).

Cependant, il semble prioritaire de pouvoir tirer parti d'observations de trajectoires plus variées dans la réalité environnementale, réalisées dans des conditions hydrauliques offrant un continuum entre les conditions de faible et de forte vitesse du fluide. Cela permettrait d'améliorer notre connaissance des transitions entre les états de comportement de nage des smolts, et ainsi contribuer à corriger l'incertitude du modèle par rapport à la réalité.

Par ailleurs, une autre limitation du modèle est que le comportement de nage des poissons ne dépend que de la vitesse d'écoulement. Or, faciliter la découverte d'une voie de passage n'est pas trivial dans des environnements complexes et peut dépendre de l'expérience passée du poisson. En effet, le mouvement d'un animal ne dépend plus seulement de l'état comportemental actuel, mais peut également dépendre d'un ou de plusieurs états antérieurs ; c'est ce qu'on appelle le principe d'instantanéité (Patterson et al., 2017). Mais aucune étude concernant le principe de l'instantanéité sur le mouvement des animaux n'a été documentée à ce jour (Whoriskey et al., 2022).

Chapitre 7

Conclusions générales

La restauration de la continuité écologique repose en partie sur la connaissance du comportement de nage des smolts pour optimiser l'efficacité des ouvrages de franchissement. Une première étape de la thèse pour répondre à cette problématique a consisté au développement d'un modèle hydraulique tridimensionnel qui représente bien les écoulements dans la retenue du barrage de Poutès. Ce modèle CFD est une étape préliminaire et nécessaire qui a permis d'obtenir les conditions hydrauliques à une échelle suffisamment fines pour être perceptibles par les smolts.

La grande particularité du barrage de Poutès repose sur les faibles intensités des conditions hydrauliques connues pour désorienter les smolts dans leur dévalaison. Ainsi, toute solution envisagée pour éviter de fortes mortalités des smolts doit reposer sur une bonne compréhension de leur comportement de nage en dévalaison, en réponse aux conditions hydrauliques rencontrées dans les retenues et en particulier dans de telles faibles intensités des conditions hydrauliques.

En deuxième étape, le couplage entre la télémétrie 2D et le modèle hydraulique 3D entrepris au cours de cette thèse a mis en évidence l'influence des conditions hydrauliques sur les mouvements des smolts. Nous avons identifié un seuil minimal de vitesse du fluide de 20 cm/s qui permet aux smolts de se déplacer rapidement dans la retenue, de les guider et d'optimiser leur dévalaison. Ce seuil permet aux smolts de réduire le temps de résidence dans la retenue et par conséquent d'éviter les retards dans leur migration. Ce résultat est une solution pratique pour l'optimisation de la conception d'ouvrages de franchissement attractifs pour les smolts.

En troisième étape, nous avons enfin développé un modèle prédictif du comportement de nage des smolts, à partir de la télémétrie, du modèle CFD et des connaissances a priori sur l'état comportemental de nage des smolts. Ce modèle bayésien a permis de concevoir un outil de simulation du déplacement des smolts dans des retenues ayant une large gamme d'intensité de la vitesse du fluide pour aider à optimiser l'efficacité des ouvrages de franchissement, en testant plusieurs configurations possibles.

Le modèle développé prévoit bien la réponse des smolts à l'intensité de la vitesse du fluide à l'amont du barrage de Poutès. Nous avons également démontré les capacités de ce modèle à identifier les états comportementaux des smolts (états de nage passive, d'endurance et de sprint) en comparant les trajectoires simulées avec celles observées au barrage de Poutès.

Le modèle couplé ainsi que le modèle bayésien permettent de simuler les actions et interactions du smolt avec l'hydraulique pour comprendre et prédire son comportement, et ainsi faciliter leur dévalaison. Ce type de modèle constitue alors un outil utile pour l'ingénierie écologique.

Chapitre 8

Perspectives scientifiques

A l’avenir, la compréhension du comportement de nage des smolts vis-à-vis des conditions hydrauliques rencontrées à l’amont d’un barrage pourraient être approfondies par les actions suivantes :

- Augmenter le nombre d’individus par télémétrie pour réaliser une analyse de l’influence des conditions hydrauliques sur chaque individu de façon indépendante et ainsi comparer la variabilité inter-individuelle du comportement de nage des smolts.
- Augmenter également le nombre d’individus sauvages et restreindre l’étude à des smolts provenant de la même période de migration afin d’avoir un jeu de donnée uniforme et de distinguer les différents effets des conditions hydrauliques sur le comportement de nage des smolts.
- Restreindre la zone d’étude à celle proche des ouvrages de franchissement, où les conditions hydrauliques sont plus fortes, notamment l’accélération du fluide et l’énergie cinétique turbulente. Cela nous donnerait de nouvelles règles de comportement de nage des smolts car les intensités des conditions hydrauliques à proximité de la prise d’eau et de l’exutoire de dévalaison sont plus fortes que dans le reste de la retenue. Ces connaissances devraient permettre d’améliorer la compréhension du comportement de nage des smolts à l’approche du barrage et d’optimiser l’efficacité des ouvrages de franchissement. Afin d’effectuer cette analyse du comportement vis-à-vis des conditions hydrauliques, il faudrait également avoir des mesures télémétriques tridimensionnelles, pour connaître l’effet des conditions hydrauliques se trouvant dans la colonne d’eau sur les smolts, à proximité des ouvrages de franchissement. En effet, dans les retenues en amont des centrales hydroélectriques, les entrées des prises d’eau et les sorties des déversoirs sont généralement situées plus profondément dans la colonne d’eau (Arenas et al., 2015). Par conséquent, pour les smolts nageant dans les retenues proches des turbines, les conditions hydrauliques élevées coïncident généralement avec les écoulements descendants. Arenas et al. 2015 ont constaté que lorsque l’accélération du fluide augmente, les smolts ont tendance à nager dans la direction opposée à l’écoulement, non seulement dans le plan horizontal mais aussi dans la direction verticale. Silva et al. 2020 ont également constaté que les smolts se déplacent en direction de la prise d’eau immergée.
- Elargir l’analyse de l’influence des paramètres hydrauliques à celle des paramètres environnementaux. Il serait également intéressant d’explorer l’influence des paramètres environnementaux sur le comportement de nage des smolts, telle que la lumière. En effet, des études ont montré que le changement de comportement des smolts semble influencé par l’éclairage de l’exutoire de dévalaison, ce qui a un impact sur l’attractivité de l’ouvrage de franchissement

- (Larinier, 2001; Kemp et al., 2005; Vowles and Kemp, 2012; Tétard et al., 2019), ou encore la température (Castro-Santos and Perry, 2012).
- Elargir la compréhension du comportement de nage à d'autres espèces diadromes en dévalaison, telles que les anguilles à l'amont d'ouvrages de franchissement. La fragmentation des rivières a également un impact sur la dévalaison des anguilles argentées (Acou et al., 2008; Piper et al., 2013; Buysse et al., 2014), qui engendre un effondrement de sa population (Dekker, 2003; Åström and Dekker, 2007; Drouineau et al., 2016, 2017). Cela permettrait de développer des outils de simulation de trajectoires pour optimiser les ouvrages de franchissement sur d'autres espèces, de comparer les résultats obtenus et de proposer des solutions de gestion d'ouvrages de franchissement efficaces.
 - Valider le modèle de simulation du comportement de nage des smolts sur d'autres retenues de barrages où les intensités des conditions hydrauliques sont plus fortes que celles rencontrées à l'amont du barrage de Poutès. Pour cela il faudrait comparer les trajectoires simulées des smolts avec celles observées et mesurées par télémétrie sur la retenue du barrage choisie.
 - Elaborer un nouveau modèle du comportement de nage des smolts. En effet, le modèle de comportement de nage développé dans cette thèse ne dépend que de la vitesse d'écoulement. Or le mouvement d'un animal peut également dépendre de son état comportemental passé (Parton and Blackwell, 2017; Whoriskey et al., 2022). Par conséquent, un modèle autorégressif du comportement de nage pourrait être développé. Puisque la vérification rigoureuse de cette hypothèse en ce qui concerne le mouvement des animaux n'a pas été documentée (Whoriskey et al., 2022), la vérification de l'importance de la partie autorégressive devrait faire l'objet d'un travail futur, qui devrait également intégrer une réflexion plus élaborée sur la nature du modèle de régression.
 - Améliorer les approches numériques utilisées pour l'estimation. Comme expliqué dans l'article du chapitre 5, nous pensons que l'utilisation de techniques de type ABC peut ouvrir la voie à des recherches affinées sur l'utilisation de techniques de filtrage ou d'estimations de densité de noyaux pondérés (De Valpine and Hilborn, 2005) adaptées à la nature complexe de la modélisation de l'espace d'état, tout en évitant certaines hypothèses structurelles sur la vraisemblance. Un autre avantage de ces méthodes est d'exploiter la vaste littérature sur l'appariement de trajectoires, qui connaît aujourd'hui de nombreuses améliorations dans la communauté de l'apprentissage automatique. Si les méthodes de type ABC méritent, selon nous, quelques améliorations, ces dernières devraient d'abord s'appuyer sur les choix de divergences populaires pour les problèmes de séries temporelles multivariées / appariement de trajectoires. Citons la Disparité Moyenne Maximale au Carré (MMD; Briol et al. 2019), la distance de Hausdorff (Taha and Hanbury, 2015) ou les distances de Wasserstein (Muskulus and Verduyn-Lunel, 2011), qui peuvent être utilisées pour définir les mesures de dissimilarité des sous-trajectoires étudiées par (Buchin et al., 2011; Wang et al., 2019; Tao et al., 2021), entre autres. Elles pourraient être étudiées en alternative ou en coopération avec l'utilisation de la distance de Fréchet. En particulier, la méthodologie de bootstrap postérieur MMD, prometteuse et robuste, récemment proposée par (Dellaporta et al., 2022), semble être une bonne approche candidate.

Bibliographie

- K. Aarestrup and A. Koed. Survival of migrating sea trout (*salmo trutta*) and atlantic salmon (*salmo salar*) smolts negotiating weirs in small danish rivers. *Ecology of Freshwater Fish*, 12(3) : 169–176, 2003.
- K. Aarestrup, N. Jepsen, G. Rasmussen, and F. Okland. Movements of two strains of radio tagged atlantic salmon, *salmo salar* l., smolts through a reservoir. *Fisheries Management and Ecology*, 6 (2) :97–107, 1999.
- A. Acou, P. Laffaille, A. Legault, and E. Feunteun. Migration pattern of silver eel (*anguilla anguilla*, l.) in an obstructed river system. *Ecology of Freshwater Fish*, 17(3) :432–442, 2008.
- A. Agresti. *Categorical data analysis*, volume 482. John Wiley & Sons, 2003.
- H. Alt and M. Godau. Computing the fréchet distance between two polygonal curves. *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 05(01n02) :75–91, 1995. doi : 10.1142/S0218195995000064. URL <https://doi.org/10.1142/S0218195995000064>.
- D. J. Anderson. The home range : A new nonparametric estimation technique. *Ecology*, 63(1) :103–112, 1982. doi : <https://doi.org/10.2307/1937036>. URL <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2307/1937036>.
- J. J. Anderson. A vitality-based model relating stressors and environmental properties to organism survival. *Ecological monographs*, 70(3) :445–470, 2000.
- A. Arenas, M. Politano, L. Weber, and M. Timko. Analysis of movements and behavior of smolts swimming in hydropower reservoirs. *Ecological Modelling*, 312 :292–307, 2015.
- G. Arnold. Rheotropism in fishes. *Biological reviews*, 49(4) :515–576, 1974.
- A. Astreinidi Blandin, I. Bernardeschi, and L. Beccai. Biomechanics in soft mechanical sensing : from natural case studies to the artificial world. *Biomimetics*, 3(4) :32, 2018.
- M. Åström and W. Dekker. When will the eel recover ? a full life-cycle model. *ICES Journal of Marine Science*, 64(7) :1491–1498, 2007.
- M. Auger-Méthé, K. Newman, D. Cole, F. Empacher, R. Gryba, A. A. King, V. Leos-Barajas, J. Mills Flemming, A. Nielsen, G. Petris, et al. A guide to state-space modeling of ecological time series. *Ecological Monographs*, 91(4) :e01470, 2021.
- J. Bach, F. Bruyère, P. Poupard, and J. Rancon. Etude du franchissement (dévalaison- montaison) du complexe hydroélectrique de poutès- monistrol par les saumons en 1999. *LOGRAMI, Saint Pourçain sur Sioule*, 2000.

- J. Bach, C. Leon, T. Parouty, A. Defours, and A. Baisez. Suivi de la dévalaison 2014 des saumoneaux au droit du barrage de poutès. *LOGRAMI, Saint Pourçain sur Sioule*, 2015.
- J.-L. Baglinière, G. Maisse, and A. Nihouarn. Migratory and reproductive behaviour of female adult atlantic salmon, *salmo salar* l., in a spawning stream. *Journal of Fish Biology*, 36(4) :511–520, 1990.
- J.-L. Baglinière, M. R. Sabatié, E. Rochard, P. Alexandrino, and M. W. Aprahamian. The allis shad *alosa alosa* : Biology, ecology, range, and status of populations. In *American Fisheries Society Symposium*, volume 35, pages 85–102, 2003.
- H. Baktoft, K. Ø. Gjelland, F. Økland, and U. H. Thygesen. Positioning of aquatic animals based on time-of-arrival and random walk models using yaps (yet another positioning solver). *Scientific reports*, 7(1) :1–10, 2017.
- E. Baras and M. C. Lucas. Impacts of man’s modifications of river hydrology on the migration of freshwater fishes : a mechanistic perspective. *International Journal of Ecohydrology & Hydrobiology*, 1(3) :291–304, 2001.
- A. Bardonnet and J.-L. Baglinière. Freshwater habitat of atlantic salmon (*salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(2) :497–506, 2000.
- P. S. Barton, P. E. Lentini, E. Alacs, S. Bau, Y. M. Buckley, E. L. Burns, D. A. Driscoll, L. K. Guja, H. Kujala, J. J. Lahoz-Monfort, et al. Guidelines for using movement science to inform biodiversity policy. *Environmental management*, 56(4) :791–801, 2015.
- F. W. Beamish. Swimming capacity. *Fish physiology*, 7 :101–187, 1978.
- M. Beaumont, W. Zhang, and D. J. Balding. Approximate bayesian computation in population genetics. *Genetics*, 162 :2025–2035, 2002.
- M. Beaumont, J. Cornuet, J. Marin, and C. Robert. Adaptive approximate bayesian computation. 96 :983–990, 2009.
- M. Béguer-Pon, J. Benchetrit, M. Castonguay, K. Aarestrup, S. E. Campana, M. J. Stokesbury, and J. J. Dodson. Shark predation on migrating adult american eels (*anguilla rostrata*) in the gulf of st. lawrence. 2012.
- N. Ben Jebria, R. Carmigniani, H. Drouineau, E. De Oliveira, S. Tétard, and H. Capra. Coupling 3d hydraulic simulation and fish telemetry data to characterize the behaviour of migrating smolts approaching a bypass. *Journal of Ecohydraulics*, pages 1–14, 2021.
- J. Bergé, H. Capra, H. Pella, T. Steig, M. Ovidio, E. Bultel, and N. Lamouroux. Probability of detection and positioning error of a hydro acoustic telemetry system in a fast-flowing river : intrinsic and environmental determinants. *Fisheries Research*, 125 :1–13, 2012.
- G. Bergkamp, M. McCartney, P. Dugan, J. McNeely, M. Acreman, et al. Dams, ecosystem functions and environmental restoration. *Thematic review II*, 1 :1–187, 2000.
- P. Besse, B. Guillouet, J.-M. Loubes, and R. François. Review and perspective for distance based trajectory clustering. *arXiv preprint arXiv :1508.04904*, 2015.

- S. Bestley, I. D. Jonsen, M. A. Hindell, C. Guinet, and J.-B. Charrassin. Integrative modelling of animal movement : incorporating in situ habitat and behavioural information for a migratory marine predator. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 280(1750) :20122262, 2013.
- N. Bez, E. Walker, D. Gaertner, J. Rivoirard, and P. Gaspar. Fishing activity of tuna purse seiners estimated from vessel monitoring system (vms) data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 68(11) :1998–2010, 2011.
- J. C. Blank and L. J. Weber. Numerical simulations of the fish passage facilities at lower granite dam. Technical report, IOWA INST OF HYDRAULIC RESEARCH IOWA CITY, 2000.
- H. Bleckmann and R. Zelick. Lateral line system of fish. *Integrative zoology*, 4(1) :13–25, 2009.
- M. Blum, M. Nunes, D. Prangle, and S. Sisson. A comparative review of dimension reduction methods in approximate bayesian computation. *Statistical Science*, 28 :189–208, 2012.
- G. Boeuf. Salmonid smolting : a pre-adaptation to the oceanic environment. In *Fish ecophysiology*, pages 105–135. Springer, 1993.
- M.-C. Bourque, P. H. LeBlond, and P. F. Cummins. Effects of tidal currents on pacific salmon migration : results from a fine-resolution coastal model. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56(5) :839–846, 1999.
- C. B. Braun and S. Coombs. The overlapping roles of the inner ear and lateral line : the active space of dipole source detection. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 355(1401) :1115–1119, 2000.
- N. Brevé, H. Vis, I. Spierts, G. de Laak, F. Moquette, and A. Breukelaar. Exorbitant mortality of hatchery-reared atlantic salmon smolts salmo salar l., in the meuse river system in the netherlands. *Journal of coastal conservation*, 18(2) :97–109, 2014.
- F.-X. Briol, A. Barp, A. B. Duncan, and M. A. Girolami. Statistical inference for generative models with maximum mean discrepancy. *ArXiv*, abs/1906.05944, 2019.
- J. J. Brown, K. E. Limburg, J. R. Waldman, K. Stephenson, E. P. Glenn, F. Juanes, and A. Jordaan. Fish and hydropower on the us atlantic coast : failed fisheries policies from half-way technologies. *Conservation Letters*, 6(4) :280–286, 2013.
- K. Buchin, M. Buchin, M. van Kreveld, and J. Luo. Finding long and similar parts of trajectories. *Computational Geometry*, 44(9) :465–476, 2011. ISSN 0925-7721. doi : <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2011.05.004>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925772111000344>.
- C. Bunt, T. Castro-Santos, and A. Haro. Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration. *River Research and Applications*, 28(4) :457–478, 2012.
- B. J. Burke and M. A. Jepson. Performance of passive integrated transponder tags and radio tags in determining dam passage behavior of adult chinook salmon and steelhead. *North American Journal of Fisheries Management*, 26(3) :742–752, 2006.
- N. J. Burnett, S. G. Hinch, D. C. Braun, M. T. Casselman, C. T. Middleton, S. M. Wilson, and S. J. Cooke. Burst swimming in areas of high flow : delayed consequences of anaerobiosis in wild adult sockeye salmon. *Physiological and Biochemical Zoology*, 87(5) :587–598, 2014.

- D. Buysse, A. Mouton, M. Stevens, T. Van den Neucker, and J. Coeck. Mortality of european eel after downstream migration through two types of pumping stations. *Fisheries Management and Ecology*, 21(1) :13–21, 2014.
- F. Cagnacci, L. Boitani, R. A. Powell, and M. S. Boyce. Animal ecology meets gps-based radiotelemetry : a perfect storm of opportunities and challenges, 2010.
- O. Calles, I. Olsson, C. Comoglio, P. Kemp, L. Blunden, M. Schmitz, and L. Greenberg. Applied issues : Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea. *Freshwater Biology*, 55(10) :2167–2180, 2010.
- O. Calles, P. Rivinoja, and L. Greenberg. A historical perspective on downstream passage at hydroelectric plants in swedish rivers. *Ecohydraulics : An Integrated Approach. John Wiley & Sons, Ltd*, pages 309–321, 2013.
- T. Castro-Santos and A. Haro. Biomechanics and fisheries conservation. *Fish physiology*, 23 :469–523, 2005.
- T. Castro-Santos and R. W. Perry. Time-to-event analysis as a framework for quantifying fish passage performance. *Telemetry techniques : a user guide for fisheries research. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland*, pages 427–452, 2012.
- T. Castro-Santos, A. Cotel, and P. Webb. Fishway evaluations for better bioengineering : an integrative approach. In *Challenges for diadromous fishes in a dynamic global environment. American Fisheries Society, Symposium*, volume 69, pages 557–575, 2009.
- C. C. Caudill, M. L. Keefer, T. S. Clabough, G. P. Naughton, B. J. Burke, and C. A. Peery. Indirect effects of impoundment on migrating fish : temperature gradients in fish ladders slow dam passage by adult chinook salmon and steelhead. *PloS one*, 8(12) :e85586, 2013.
- K. Chaloner and I. Verdine. Bayesian experimental design : a review. *Statistical Science*, 10(3) : 273–304, 1995.
- E. W. Chambers, É. Colin de Verdière, J. Erickson, S. Lazard, F. Lazarus, and S. Thite. Homotopic fréchet distance between curves or, walking your dog in the woods in polynomial time. *Computational Geometry*, 43(3) :295–311, 2010. ISSN 0925-7721. doi : <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2009.02.008>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925772109000637>. Special Issue on 24th Annual Symposium on Computational Geometry (SoCG'08).
- A. Chouakria-Douzal and P. Nagabhushan. Improved fréchet distance for time series. In B. V., B. H.E., F. A., and Z. A., editors, *Data Science and Classification*. Springer, 2006.
- P. Cignoni, M. Callieri, M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ganovelli, and G. Ranzuglia. MeshLab : an Open-Source Mesh Processing Tool. In V. Scarano, R. D. Chiara, and U. Erra, editors, *Eurographics Italian Chapter Conference*. The Eurographics Association, 2008. ISBN 978-3-905673-68-5. doi : 10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136.
- I. Cleasby, E. Wakefield, and B. e. a. Morrissey. Using time-series similarity measures to compare animal movement trajectories in ecology. *Behav Ecol Sociobiol*, 73 :151, 2019.
- F. Cohendet. Le saumon de l’allier. *Son histoire, sa vie, son devenir. Compagnie générale des Eaux, Association Internationale de Défense du Saumon Atlantique*. p, 795, 1993.

- S. J. Cooke, S. Hinch, M. C. LuCaS, and M. Lutcavage. Biotelemetry and biologging. *Fisheries techniques, 3rd edition*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, pages 819–860, 2012.
- C. C. Coutant and R. R. Whitney. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines : a review. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129(2) :351–380, 2000.
- C. C. Coutant and R. R. Whitney. Hydroelectric system development : effects on juvenile and adult migration. *Williams, RN (Ed)*, pages 249–324, 2005.
- K. Csilléry, M. Blum, O. Gaggiotti, and O. François. Approximate bayesian computation (abc) in practice. *Trends in Ecology and Evolution*, 25 :410–418, 2010.
- R. Cuinat. Atlantic salmon in extensive french river system : Theb loire-allier. In *Atlantic Salmon*, pages 389–399. Springer, 1988.
- G. Dauphin and E. Prévost. Viability analysis of the natural population of atlantic salmon (*salmo salar* l.) in the allier catchment analyse de la viabilite d’une population naturelle de saumon atlantique. 2013.
- J. Davidsen, M.-A. Svenning, P. Orell, N. Yoccoz, J. B. Dempson, E. Niemelä, A. Klemetsen, A. Lamberg, and J. Erkinaro. Spatial and temporal migration of wild atlantic salmon smolts determined from a video camera array in the sub-arctic river tana. *Fisheries Research*, 74(1-3) :210–222, 2005.
- P. De Valpine and R. Hilborn. State-space likelihoods for nonlinear fisheries time-series. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62 :1937–1952, 2005.
- D. L. DeAngelis and V. Grimm. Individual-based models in ecology after four decades. *F1000prime reports*, 6, 2014.
- W. Dekker. Status of the european eel stock and fisheries. In *Eel biology*, pages 237–254. Springer, 2003.
- C. Dellaporta, J. Knoblauch, T. Damoulas, and F.-X. Briol. Robust bayesian inference for simulator-based models via the mmd posterior bootstrap. *ArXiv*, 2202.04744, 2022.
- H. Deng and H. Wickham. Density estimation in R. <http://vita.had.co.nz/papers/density-estimation.pdf>, 2014.
- T. Devogele, M. Esnault, and L. Etienne. Distance discrète de fréchet optimisée. *Proceedings of the Spatial Analysis and Geomatics (SAGEO)*, 2016.
- S. Dijkgraaf. The functioning and significance of the lateral-line organs. *Biological reviews*, 38(1) : 51–105, 1963.
- A. Driemel and A. Krivošija. Probabilistic embeddings of the fréchet distance. In E. T. Epstein L., editor, *Approximation and Online Algorithms. WAOA 2018. Lecture Notes in Computer Science*, volume 11312. Springer, 2018.
- A. Driemel, A. Krivosija, and C. Sohler. Clustering time series under the fréchet distance. In *Proceedings of the ACM/SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*, 2016.
- H. Drouineau, C. Briand, P. Lambert, and L. Beaulaton. Gerem (glass eel recruitment estimation model) : A model to estimate glass eel recruitment at different spatial scales. *Fisheries Research*, 174 :68–80, 2016.

- H. Drouineau, F. Bau, A. Alric, N. Deligne, P. Gomes, and P. Sagnes. Silver eel downstream migration in fragmented rivers : use of a bayesian model to track movements triggering and duration. *Aquatic Living Resources*, 30 :5, 2017.
- E. C. Enders, D. Boisclair, and A. G. Roy. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile atlantic salmon (*salmo salar*). *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 60(9) : 1149–1160, 2003.
- E. C. Enders, M. H. Gessel, and J. G. Williams. Development of successful fish passage structures for downstream migrants requires knowledge of their behavioural response to accelerating flow. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66(12) :2109–2117, 2009.
- E. C. Enders, M. H. Gessel, J. J. Anderson, and J. G. Williams. Effects of decelerating and accelerating flows on juvenile salmonid behavior. *Transactions of the American Fisheries Society*, 141 (2) :357–364, 2012.
- M. Espinoza, T. J. Farrugia, D. M. Webber, F. Smith, and C. G. Lowe. Testing a new acoustic telemetry technique to quantify long-term, fine-scale movements of aquatic animals. *Fisheries Research*, 108(2-3) :364–371, 2011.
- European Commission. European Project Regional Policy Project :. https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/France/a-dam-reconfigured-to-promote-salmon-migration-in-allier-in-auvergne-rhone-alpes, 2020. Online ; accessed 04 April 2022.
- S. D. Evans, N. S. Adams, D. W. Rondorf, J. M. Plumb, and B. D. Ebberts. Performance of a prototype surface collector for juvenile salmonids at bonneville dam’s first powerhouse on the columbia river, oregon. *River Research and Applications*, 24(7) :960–974, 2008.
- R. Eymard, T. Gallouët, and R. Herbin. Finite volume methods. *Handbook of numerical analysis*, 7 :713–1018, 2000.
- D. M. Faber, M. A. Weiland, R. Moursund, T. J. Carlson, N. Adams, and D. Rhondorf. Evaluation of the fish passage effectiveness of the bonneville i prototype surface collector using three-dimensional ultrasonic fish tracking. Technical report, Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2001.
- G. E. Farin and G. Farin. *Curves and surfaces for CAGD : a practical guide*. Morgan Kaufmann, 2002.
- G. E. Ferrari, M. Politano, and L. Weber. Numerical simulation of free surface flows on a fish bypass. *Computers & Fluids*, 38(5) :997–1002, 2009.
- H. Fjeldstad, I. Uglem, O. Diserud, P. Fiske, T. Forseth, E. Kvingedal, N. Hvidsten, F. Økland, and J. Järnegren. A concept for improving atlantic salmon *salmo salar* smolt migration past hydro power intakes. *Journal of Fish Biology*, 81(2) :642–663, 2012.
- H.-P. Fjeldstad, K. Alfredsen, and T. Boissy. Optimising a tlantic salmon smolt survival by use of hydropower simulation modelling in a regulated river. *Fisheries Management and Ecology*, 21(1) : 22–31, 2014.
- K. Fokianos and B. Kedem. Regression Theory for Categorical Time Series. *Statistical Science*, 18(3) : 357 – 376, 2003. doi : 10.1214/ss/1076102425. URL <https://doi.org/10.1214/ss/1076102425>.

- F. Fry. The effect of environmental factors on the physiology of fish. *Fish physiology*, pages 1–98, 1971.
- T. Fu, Z. D. Deng, J. P. Duncan, D. Zhou, T. J. Carlson, G. E. Johnson, and H. Hou. Assessing hydraulic conditions through francis turbines using an autonomous sensor device. *Renewable Energy*, 99 :1244–1252, 2016.
- J. F. Fuentes-Pérez, A. T. Silva, J. A. Tuhtan, A. García-Vega, R. Carbonell-Baeza, M. Musall, and M. Kruusmaa. 3d modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways. *Environmental modelling & software*, 99 :156–169, 2018.
- M. Fukushima, S. Kameyama, M. Kaneko, K. Nakao, and E. Ashley Steel. Modelling the effects of dams on freshwater fish distributions in hokkaido, japan. *Freshwater Biology*, 52(8) :1511–1524, 2007.
- Z. Gao, H. I. Andersson, H. Dai, F. Jiang, and L. Zhao. A new eulerian–lagrangian agent method to model fish paths in a vertical slot fishway. *Ecological Engineering*, 88 :217–225, 2016.
- D. C. Gisen, R. B. Weichert, and J. M. Nestler. Optimizing attraction flow for upstream fish passage at a hydropower dam employing 3d detached-eddy simulation. *Ecological Engineering*, 100 :344–353, 2017.
- P. Good. *Permutation, Parametric and Bootstrap Tests of Hypotheses*. Springer, 2005.
- R. A. Goodwin, J. M. Nestler, J. J. Anderson, L. J. Weber, and D. P. Loucks. Forecasting 3-d fish movement behavior using a eulerian–lagrangian–agent method (elam). *Ecological Modelling*, 192 (1-2) :197–223, 2006.
- R. A. Goodwin, M. Politano, J. W. Garvin, J. M. Nestler, D. Hay, J. J. Anderson, L. J. Weber, E. Dimperio, D. L. Smith, and M. Timko. Fish navigation of large dams emerges from their modulation of flow field experience. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(14) : 5277–5282, 2014.
- A. Gretton, K. Fukumizu, Z. Harchaoui, and B. K. Sriperumbudur. A Fast, Consistent Kernel Two-Sample Test. In Y. Bengio, D. Schuurmans, J. Lafferty, C. Williams, and A. Culotta, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems*, volume 22. Curran Associates, Inc., 2009. URL <https://proceedings.neurips.cc/paper/2009/file/9246444d94f081e3549803b928260f56-Paper.pdf>.
- F. Groux, J. Therrien, M. Chanseau, D. Courret, and S. Tétard. Shad upstream migration : Fishway design and efficiency. 2017.
- N. Guo, M. Ma, W. Xiong, L. Chen, and N. Jing. An efficient query algorithm for trajectory similarity based on fréchet distance threshold. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11) :326, 2017.
- J. W. Haefner and M. D. Bowen. Physical-based model of fish movement in fish extraction facilities. *Ecological Modelling*, 152(2-3) :227–245, 2002.
- K. Harada and E. Nakamae. Application of the bézier curve to data interpolation. *Computer-Aided Design*, 14(1) :55–59, 1982. ISSN 0010-4485. doi : [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(82\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0010-4485(82)90013-6). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010448582900136>.

- A. Haro, M. Odeh, J. Noreika, and T. Castro-Santos. Effect of water acceleration on downstream migratory behavior and passage of atlantic salmon smolts and juvenile american shad at surface bypasses. *Transactions of the American Fisheries Society*, 127(1) :118–127, 1998.
- T. Havn, S. Sæther, E. Thorstad, M. Teichert, L. Heermann, O. Diserud, J. Borcharding, M. Tambets, and F. Økland. Downstream migration of atlantic salmon smolts past a low head hydropower station equipped with archimedes screw and francis turbines. *Ecological Engineering*, 105 :262–275, 2017.
- M. Heusel, H. Ramsauer, T. Unterthiner, B. Nessler, and S. Hochreiter. Gans trained by a two time-scale update rule converge to a local nash equilibrium. In *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, NIPS’17*, page 6629–6640, Red Hook, NY, USA, 2017. Curran Associates Inc. ISBN 9781510860964.
- S. Hinckley, A. Hermann, and B. Megrey. Development of a spatially explicit, individual-based model of marine fish early life history. *Marine Ecology Progress Series*, 139 :47–68, 1996.
- C. H. Hocutt and J. E. Edinger. Fish behavior in flow fields. *Power plants : effects on fish and shellfish behavior, editors, Charles H. Hocutt...[et al.]*, 1980.
- X. Huan and Y. Marzouk. Simulation-based optimal bayesian experimental design for nonlinear systems. *Journal of Computational Physics.*, 232 :288–317, 2013.
- R. Hug, W. Hübner, and M. Arens. Introducing Probabilistic Bézier Curves for N –Step Sequence Prediction. *Proceedings of the 34th AAAI Conference on Artificial Intelligence*, pages 10162–10169, 2020.
- N. E. Hussey, S. T. Kessel, K. Aarestrup, S. J. Cooke, P. D. Cowley, A. T. Fisk, R. G. Harcourt, K. N. Holland, S. J. Iverson, J. F. Kocik, et al. Aquatic animal telemetry : a panoramic window into the underwater world. *Science*, 348(6240) :1255642, 2015.
- A. Ibbotson, W. Beaumont, A. Pinder, S. Welton, and M. Ladle. Diel migration patterns of atlantic salmon smolts with particular reference to the absence of crepuscular migration. *Ecology of Freshwater Fish*, 15(4) :544–551, 2006.
- H. Imbert, P. Martin, J. Rancon, V. Graffin, and S. Dufour. Evidence of late migrant smolts of atlantic salmon (*salmo salar*) in the loire-allier system, france. *Cybium*, 37(1-2) :5–14, 2013.
- H. I. Jager and B. T. Smith. Sustainable reservoir operation : can we generate hydropower and preserve ecosystem values? *River Research and Applications*, 24(3) :340–352, 2008. doi : <https://doi.org/10.1002/rra.1069>. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rra.1069>.
- H. I. Jager, J. A. Chandler, K. B. Lepla, and W. Van Winkle. A theoretical study of river fragmentation by dams and its effects on white sturgeon populations. *Environmental Biology of Fishes*, 60(4) :347–361, 2001.
- H. M. Jansen, H. V. Winter, M. C. Bruijs, and H. J. Polman. Just go with the flow ? route selection and mortality during downstream migration of silver eels in relation to river discharge. *ICES Journal of marine Science*, 64(7) :1437–1443, 2007.
- T. Järvi. Synergistic effect on mortality in atlantic salmon, *salmo salar*, smolt caused by osmotic stress and presence of predators. *Environmental Biology of Fishes*, 26(2) :149–152, 1989.

- N. Jepsen, K. Aarestrup, F. Økland, and G. Rasmussen. Survival of radiotagged atlantic salmon (*salmo salar* l.)–and trout (*salmo trutta* l.) smolts passing a reservoir during seaward migration. *Hydrobiologia*, 371 :347–353, 1998.
- G. E. Johnson and D. D. Dauble. Surface flow outlets to protect juvenile salmonids passing through hydropower dams. *Reviews in Fisheries Science*, 14(3) :213–244, 2006.
- G. E. Johnson, N. S. Adams, R. L. Johnson, D. W. Rondorf, D. D. Dauble, and T. Y. Barila. Evaluation of the prototype surface bypass for salmonid smolts in spring 1996 and 1997 at lower granite dam on the snake river, washington. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129 (2) :381–397, 2000.
- G. E. Johnson, M. C. Richmond, J. Hedgepeth, G. R. Ploskey, M. G. Anderson, Z. Deng, F. Khan, R. P. Mueller, C. L. Rakowski, N. K. Sather, et al. Smolt responses to hydrodynamic conditions in forebay flow nets of surface flow outlets, 2007. Technical report, Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2009.
- M. C. Johnson and B. M. Savage. Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater. *Journal of hydraulic engineering*, 132(12) :1353–1357, 2006.
- I. Jonsen, M. Basson, S. Bestley, M. Bravington, T. Patterson, M. W. Pedersen, R. Thomson, U. H. Thygesen, and S. Wotherspoon. State-space models for bio-loggers : A methodological road map. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 88 :34–46, 2013.
- I. D. Jonsen, R. A. Myers, and J. M. Flemming. Meta-analysis of animal movement using state-space models. *Ecology*, 84(11) :3055–3063, 2003. doi : <https://doi.org/10.1890/02-0670>. URL <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/02-0670>.
- I. D. Jonsen, J. M. Flemming, and R. A. Myers. Robust state–space modeling of animal movement data. *Ecology*, 86(11) :2874–2880, 2005.
- B. Jonsson and N. Jonsson. Early environment influences later performance in fishes. *Journal of Fish Biology*, 85(2) :151–188, 2014.
- B. Jonsson and J. Ruud-Hansen. Water temperature as the primary influence on timing of seaward migrations of atlantic salmon (*salmo salar*) smolts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42(3) :593–595, 1985.
- R. Joo, S. Bertrand, J. Tam, and R. Fablet. Hidden markov models : the best models for forager movements? *PloS one*, 8(8) :e71246, 2013.
- A. J. Kalmijn. Functional evolution of lateral line and inner ear sensory systems. In *The mechano-sensory lateral line*, pages 187–215. Springer, 1989.
- C. Katopodis and L. Aadland. Effective dam removal and river channel restoration approaches. *International Journal of River Basin Management*, 4(3) :153–168, 2006.
- C. Katopodis and J. G. Williams. The development of fish passage research in a historical context. *Ecological Engineering*, 48 :8–18, 2012.
- M. Keefer, C. Peery, and M. Heinrich. Temperature-mediated en route migration mortality and travel rates of endangered snake river sockeye salmon. *Ecology of Freshwater Fish*, 17(1) :136–145, 2008.

- P. S. Kemp. Bridging the gap between fish behaviour, performance and hydrodynamics : an eco-hydraulics approach to fish passage research. *River Research and Applications*, 28(4) :403–406, 2012.
- P. S. Kemp, M. H. Gessel, and J. G. Williams. Fine-scale behavioral responses of pacific salmonid smolts as they encounter divergence and acceleration of flow. *Transactions of the American Fisheries Society*, 134(2) :390–398, 2005.
- P. S. Kemp, M. H. Gessel, and J. G. Williams. Response of downstream migrant juvenile pacific salmonids to accelerating flow and overhead cover. *Hydrobiologia*, 609(1) :205–217, 2008.
- F. Khan, G. E. Johnson, I. M. Royer, N. R. Phillips, J. S. Hughes, E. S. Fischer, K. D. Ham, and G. R. Ploskey. Acoustic imaging evaluation of juvenile salmonid behavior in the immediate forebay of the water temperature control tower at cougar dam, 2010. Technical report, Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2012.
- L. A. Khan, E. W. Roy, and M. Rashid. Computational fluid dynamics modelling of forebay hydrodynamics created by a floating juvenile fish collection facility at the upper baker river dam, washington. *River research and applications*, 24(9) :1288–1309, 2008.
- C. Kim, M. Kim, S. Jung, and E. Hwang. Simplified fréchet distance for generative adversarial nets. *Sensors*, 20 :1548, 2020.
- H. Kingre. Bézier curves for metamodeling of simulation output, 2004.
- G. Kitagawa. Monte carlo filter and smoother for non-gaussian nonlinear state space models. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5 :1–25, 1996.
- G. M. Kondolf. Profile : hungry water : effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental management*, 21(4) :533–551, 1997.
- M. Kraabøl, J. V. Arnekleiv, and J. Museth. Emigration patterns among trout, salmo trutta (l.), kelts and smolts through spillways in a hydroelectric dam. *Fisheries Management and Ecology*, 15(5-6) :417–423, 2008.
- R. T. Lackey. Challenges to sustaining diadromous fishes through 2100 : lessons learned from western north america. 2009.
- Y. G. Lai, L. J. Weber, and V. Patel. Nonhydrostatic three-dimensional method for hydraulic flow simulation. ii : Validation and application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(3) :206–214, 2003.
- D. Lamonica, H. Drouineau, H. Capra, H. Pella, and A. Maire. A framework for pre-processing individual location telemetry data for freshwater fish in a river section. *Ecological Modelling*, 431 : 109190, 2020.
- M. Larinier. Environmental issues, dams and fish migration. *FAO fisheries technical paper*, 419 : 45–89, 2001.
- M. Larinier and S. Boyer-Bernard. Dévalaison des smolts et efficacité d’un exutoire de dévalaison à l’usine hydroélectrique d’halsou sur la nive. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (321) :72–92, 1991.
- M. Larinier and D. Couret. Guide pour la conception de prises d’eau «ichtyocompatibles» pour les petites centrales hydroélectriques. *RAPPORT GHAAPE RA08*, 4, 2008.

- M. Larinier and F. Travade. Downstream migration : problems and facilities. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (364) :181–207, 2002.
- M. Larinier, J. Porcher, F. Travade, and C. Gosset. Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement. CSP, 1994.
- B. H. Lemasson, J. W. Haefner, and M. D. Bowen. The effect of avoidance behavior on predicting fish passage rates through water diversion structures. *Ecological Modelling*, 219(1-2) :178–188, 2008.
- R. J. Lennox, K. Aarestrup, S. J. Cooke, P. D. Cowley, Z. D. Deng, A. T. Fisk, R. G. Harcourt, M. Heupel, S. G. Hinch, K. N. Holland, et al. Envisioning the future of aquatic animal tracking : technology, science, and application. *BioScience*, 67(10) :884–896, 2017.
- S. Li, L. J. Weber, and G. Constantinescu. Three-dimensional hydrodynamic simulation of flows for fish passage at the dalles dam. In *World Environmental and Water Resource Congress 2006 : Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns*, pages 1–10, 2006.
- X. Li, Z. D. Deng, T. Fu, R. S. Brown, J. J. Martinez, G. A. McMichael, B. A. Trumbo, M. L. Ahmann, J. F. Renholds, J. R. Skalski, et al. Three-dimensional migration behavior of juvenile salmonids in reservoirs and near dams. *Scientific Reports*, 8(1) :1–12, 2018.
- J. C. Liao. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 362(1487) :1973–1993, 2007.
- J. C. Liao, D. N. Beal, G. V. Lauder, and M. S. Triantafyllou. Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science*, 302(5650) :1566–1569, 2003.
- K. E. Limburg and J. R. Waldman. Dramatic declines in north atlantic diadromous fishes. *BioScience*, 59(11) :955–965, 2009.
- K. E. Limburg, K. A. Hattala, and A. Kahnle. American shad in its native range. In *American Fisheries Society Symposium*, volume 35, pages 125–140, 2003.
- S. Low Choy, R. O’Leary, and K. Mengersen. Elicitation by design in ecology : using expert opinion to inform priors for bayesian statistical models. *Ecology*, 90 :265–277, 2009.
- H. R. MacCrimmon and B. L. Gots. World distribution of atlantic salmon, *salmo solar*. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 36(4) :422–457, 1979.
- B. Malmqvist and S. Rundle. Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental conservation*, pages 134–153, 2002.
- J. Marin, P. Pudlo, and R. Robert, C.P. Ryder. Approximate Bayesian computational methods. *Statistics and Computing*, 22 :1167–1180, 2012.
- G. Marmulla. *Dams, fish and fisheries : opportunities, challenges and conflict resolution*. Number 419. Food & Agriculture Org., 2001.
- E. A. Marschall, M. E. Mather, D. L. Parrish, G. W. Allison, and J. R. McMenemy. Migration delays caused by anthropogenic barriers : modeling dams, temperature, and success of migrating salmon smolts. *Ecological Applications*, 21(8) :3014–3031, 2011.

- P. Martin, J. Rancon, G. Segura, J. Laffont, G. Boeuf, and S. Dufour. 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, 2012.
- B. T. McClintock, R. King, L. Thomas, J. Matthiopoulos, B. J. McConnell, and J. M. Morales. A general discrete-time modeling framework for animal movement using multistate random walks. *Ecological Monographs*, 82(3) :335–349, 2012.
- B. T. McClintock, R. Langrock, O. Gimenez, E. Cam, D. L. Borchers, R. Glennie, and T. A. Patterson. Uncovering ecological state dynamics with hidden markov models. *Ecology letters*, 23(12) : 1878–1903, 2020.
- M. I. McCormick. Behaviorally induced maternal stress in a fish influences progeny quality by a hormonal mechanism. *Ecology*, 79(6) :1873–1883, 1998.
- S. D. McCormick and R. L. Saunders. Preparatory physiological adaptations for marine life of salmonids : osmoregulation, growth, and metabolism. In *Am. Fish. Soc. Symp*, volume 1, pages 1–229, 1987.
- P. McCullagh and J. Nelder. *Generalized Linear Models II*. Chapman and Hall, London, 1989.
- J. McIlvenny, A. Youngson, B. Williamson, N. Gauld, L. Goddijn-Murphy, and D. Del Villar-Guerra. Combining acoustic tracking and hydrodynamic modelling to study migratory behaviour of atlantic salmon (*salmo salar*) smolts on entry into high-energy coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, 78(7) :2409–2419, 2021.
- E. Meselhe and A. Odgaard. 3d numerical flow model for fish diversion studies at wanapum dam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(12) :1203–1214, 1998.
- E. Meselhe, L. Weber, A. Odgaard, and T. Johnson. Numerical modeling for fish diversion studies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(5) :365–374, 2000.
- T. Michelot, P. Gloaguen, P. G. Blackwell, and M.-P. Étienne. The langevin diffusion as a continuous-time model of animal movement and habitat selection. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(11) : 1894–1907, 2019. doi : <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13275>. URL <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/2041-210X.13275>.
- D. Mills. *Ecology and management of Atlantic salmon*. Springer Science & Business Media, 1991.
- J. Mogdans. Sensory ecology of the fish lateral-line system : Morphological and physiological adaptations for the perception of hydrodynamic stimuli. *Journal of Fish Biology*, 95(1) :53–72, 2019.
- U. Monnerjahn. Atlantic salmon (*salmo salar* l.) re-introduction in germany : a status report on national programmes and activities. *Journal of Applied Ichthyology*, 27 :33–40, 2011.
- J. C. Montgomery, C. F. Baker, and A. G. Carton. The lateral line can mediate rheotaxis in fish. *Nature*, 389(6654) :960–963, 1997.
- J. C. Montgomery, S. Coombs, and C. F. Baker. The mechanosensory lateral line system of the hypogean form of *astyanax fasciatus*. In *The biology of hypogean fishes*, pages 87–96. Springer, 2001.
- A. Moore, E. Potter, N. Milner, and S. Bamber. The migratory behaviour of wild atlantic salmon (*salmo salar*) smolts in the estuary of the river conwy, north wales. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52(9) :1923–1935, 1995.

- U. Mori, A. Mendiburu, and J. A. Lozano. Distance Measures for Time Series in R : The TSdist Package. *The R Journal*, 8(2) :451–459, 2016. doi : 10.32614/RJ-2016-058. URL <https://doi.org/10.32614/RJ-2016-058>.
- M. L. Moser, D. A. Ogden, and C. A. Peery. Migration behavior of adult pacific lamprey in the lower columbia river and evaluation of bonneville dam modifications to improve passage, 2002. *Final Report to the US Army Corps of Engineers, Portland District, Portland, OR*, 2005.
- T. Moysiadis and K. Fokianos. On binary and categorical time series models with feedback. *Journal of Multivariate Analysis*, 131(C) :209–228, 2014. doi : 10.1016/j.jmva.2014.07.00. URL <https://ideas.repec.org/a/eee/jmvana/v131y2014icp209-228.html>.
- X. Mu, P. Cao, L. Gong, B. Baiyin, and X. Li. A classification method for fish swimming behaviors under incremental water velocity for fishway hydraulic design. *Water*, 11(10) :2131, 2019.
- P. Müller. Simulation-based optimal design. *Bayesian statistics*, 6 :459–474, 1999.
- M. Muskulus and S. Verduyn-Lunel. Wasserstein distances in the analysis of time series and dynamical systems. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 240(1) :45–58, 2011. ISSN 0167-2789. doi : <https://doi.org/10.1016/j.physd.2010.08.005>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167278910002368>.
- M. Muste, E. A. Meselhe, L. J. Weber, and A. A. Bradley. Coupled physical-numerical analysis of flows in natural waterways. *Journal of Hydraulic Research*, 39(1) :51–60, 2001.
- J. B. Nagel and B. Sudret. A unified framework for multilevel uncertainty quantification in bayesian inverse problems. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 43 :68–84, 2016. ISSN 0266-8920. doi : <https://doi.org/10.1016/j.pro bengmech.2015.09.007>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266892015300266>.
- R. Nathan, W. M. Getz, E. Revilla, M. Holyoak, R. Kadmon, D. Saltz, and P. E. Smouse. A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(49) :19052–19059, 2008.
- R. Nathan, C. T. Monk, R. Arlinghaus, T. Adam, J. Alós, M. Assaf, H. Baktoft, C. E. Beardsworth, M. G. Bertram, A. I. Bijleveld, et al. Big-data approaches lead to an increased understanding of the ecology of animal movement. *Science*, 375(6582) :eabg1780, 2022.
- T. M. Neeson, M. C. Ferris, M. W. Diebel, P. J. Doran, J. R. O’Hanley, and P. B. McIntyre. Enhancing ecosystem restoration efficiency through spatial and temporal coordination. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19) :6236–6241, 2015.
- J. Nestler, R. Goodwin, D. Smith, J. Anderson, and S. Li. Optimum fish passage and guidance designs are based in the hydrogeomorphology of natural rivers. *River Research and Applications*, 24(2) :148–168, 2008.
- M. J. Noonan, J. W. Grant, and C. D. Jackson. A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries*, 13(4) :450–464, 2012.
- D. Nyqvist, L. A. Greenberg, E. Goerig, O. Calles, E. Bergman, W. R. Ardren, and T. Castro-Santos. Migratory delay leads to reduced passage success of atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. *Ecology of Freshwater Fish*, 26(4) :707–718, 2017a.

- D. Nyqvist, S. D. McCormick, L. Greenberg, W. Ardren, E. Bergman, O. Calles, and T. Castro-Santos. Downstream migration and multiple dam passage by atlantic salmon smolts. *North American Journal of Fisheries Management*, 37(4) :816–828, 2017b.
- M. Odeh. *Advances in fish passage technology : engineering design and biological evaluation*. Amer Fisheries Society, 2000.
- M. Odeh, J. F. Noreika, A. Haro, A. Maynard, T. Castro-Santos, and G. F. Cada. Evaluation of the effects of turbulence on the behavior of migratory fish. *Final Report to the Bonneville Power Administration, Contract*, 22, 2002.
- C. on Hydropower Intakes. Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants. American Society of Civil Engineers, 1995.
- M. Ovidio, A. Dierckx, J.-P. Benitez, B. Nzau Matondo, J.-C. Philippart, B. Bernard, R. Mandiki, A. Evrard, and P. Kestemont. Convention relative à la réhabilitation du saumon atlantique dans le bassin de la meuse (rapport 2015-2016). 2016.
- M. Ovidio, A. Dierckx, S. Bunel, L. Grandry, C. Spronck, and J.-P. Benitez. Poor performance of a retrofitted downstream bypass revealed by the analysis of approaching behaviour in combination with a trapping system. *River Research and Applications*, 33(1) :27–36, 2017.
- A. Parton and P. G. Blackwell. Bayesian inference for multistate ‘step and turn’ animal movement in continuous time. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 22(3) :373–392, 2017.
- A. Parton, P. G. Blackwell, and A. Skarin. Bayesian inference for continuous time animal movement based on steps and turns. In *International conference on Bayesian statistics in action*, pages 223–230. Springer, 2016.
- T. Patterson, L. Thomas, C. Wilcox, O. Ovaskainen, and J. Matthiopoulos. State–space models of individual animal movement. *Trends in Ecology and Evolution*, 23 :87–94, 2007.
- T. A. Patterson, M. Basson, M. V. Bravington, and J. S. Gunn. Classifying movement behaviour in relation to environmental conditions using hidden markov models. *Journal of Animal Ecology*, 78(6) :1113–1123, 2009.
- T. A. Patterson, A. Parton, R. Langrock, P. G. Blackwell, L. Thomas, and R. King. Statistical modelling of individual animal movement : an overview of key methods and a discussion of practical challenges. *ASTA Advances in Statistical Analysis*, 101(4) :399–438, 2017.
- D. S. Pavlov, A. I. Lupandin, and V. Kostin. *Downstream migration of fish through dams of hydroelectric power plants*. Oak Ridge National Laboratory Oak Ridge, 2002.
- S. Peake and R. McKinley. A re-evaluation of swimming performance in juvenile salmonids relative to downstream migration. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(3) :682–687, 1998.
- L.-F. Pedersen, A. Koed, and H. Malte. Swimming performance of wild and fl-hatchery-reared atlantic salmon (*salmo salar*) and brown trout (*salmo trutta*) smolts. *Ecology of Freshwater Fish*, 17(3) :425–431, 2008.
- M. I. Pedersen, N. Jepsen, K. Aarestrup, A. Koed, S. Pedersen, and F. Økland. Loss of european silver eel passing a hydropower station. *Journal of Applied Ichthyology*, 28(2) :189–193, 2012.

- G. E. Petts. *Impounded rivers : perspectives for ecological management*. Wiley, 1984.
- A. T. Piper, R. M. Wright, A. M. Walker, and P. S. Kemp. Escapement, route choice, barrier passage and entrainment of seaward migrating european eel, *anguilla anguilla*, within a highly regulated lowland river. *Ecological Engineering*, 57 :88–96, 2013.
- A. T. Piper, C. Manes, F. Siniscalchi, A. Marion, R. M. Wright, and P. S. Kemp. Response of seaward-migrating european eel (*anguilla anguilla*) to manipulated flow fields. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 282(1811) :20151098, 2015.
- A. N. Popper and T. J. Carlson. Application of sound and other stimuli to control fish behavior. *Transactions of the American Fisheries Society*, 127(5) :673–707, 1998.
- J. Porcher and F. Travade. Les dispositifs de franchissement : bases biologiques, limites et rappels réglementaires. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (326-327) :5–14, 1992.
- H. Prautzsch, W. Boehm, and M. Paluszny. *Bézier and B-splines Techniques*. Springer, 2002.
- W. Qian, M. D. Riedel, and I. Rosenberg. Uniform approximation and bernstein polynomials with coefficients in the unit interval. *European Journal of Combinatorics*, 32(3) :448–463, 2011. ISSN 0195-6698. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ejc.2010.11.004>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195669810001666>.
- R Core Team. *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. URL <https://www.R-project.org/>.
- S. F. Railsback, R. H. Lamberson, B. C. Harvey, and W. E. Duffy. Movement rules for individual-based models of stream fish. *Ecological Modelling*, 123(2-3) :73–89, 1999.
- B. H. Ransom, T. W. Steig, and P. A. Nealson. Comparison of hydroacoustic and net catch estimates of pacific salmon smolt (*oncorhynchus* spp.) passage at hydropower dams in the columbia river basin, usa. *ICES Journal of Marine Science*, 53(2) :477–481, 1996.
- E. R&D. Code_Saturne 4.1.1 theory guide. <http://code-saturne.org/cms/documentation>, 2015. [Online ; accessed 14-November-2016].
- O. Reynolds. Iv. on the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Philosophical transactions of the royal society of london.(a.)*, (186) :123–164, 1895.
- W. Riley, B. Bendall, M. Ives, N. Edmonds, and D. Maxwell. Street lighting disrupts the diel migratory pattern of wild atlantic salmon, *salmo salar* l., smolts leaving their natal stream. *Aquaculture*, 330 :74–81, 2012.
- C. Robert. *The Bayesian Choice. From Decision-Theoretic Foundations to Computational Implementation (2nd edition)*. Springer, 2007.
- D. Roscoe, S. Hinch, S. Cooke, and D. Patterson. Fishway passage and post-passage mortality of up-river migrating sockeye salmon in the seton river, british columbia. *River Research and Applications*, 27(6) :693–705, 2011.
- G. Rote. Computing the fréchet distance between piecewise smooth curves. *Computational Geometry*, 37(3) :162–174, 2007. ISSN 0925-7721. doi : <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2005.01.004>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925772106000769>. Special Issue on the 20th European Workshop on Computational Geometry.

- C. L. Roy, C. M. Herwig, M. C. Zicus, D. P. Rave, W. L. Brininger Jr, and M. K. McDowell. Refuge use by hatching-year ring-necked ducks : an individual-based telemetry approach. *The Journal of Wildlife Management*, 78(7) :1310–1317, 2014.
- C. Ruggles, D. Robinson, and R. Stira. The use of floating louvers for guiding atlantic salmon (*salmo salar*) smolts from hydroelectric turbine intakes. Technical report, 1993.
- J. Scales and L. Tenorio. Prior information and uncertainty in inverse problems. *Geophysics*, 66 : 389–397.
- T. D. Scheibe and M. C. Richmond. Fish individual-based numerical simulator (fins) : a particle-based model of juvenile salmonid movement and dissolved gas exposure history in the columbia river basin. *Ecological Modelling*, 147(3) :233–252, 2002.
- T. Schön, F. Gustafsson, and P.-J. Nordlund. Marginalized particle filters for mixed linear/nonlinear state-space models. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53 :2279–2289, 2005.
- M. Schwinn, H. Baktoft, K. Aarestrup, and A. Koed. Artificial lakes delay the migration of brown trout *salmo trutta* smolts : a comparison of migratory behaviour in a stream and through an artificial lake. *Journal of fish biology*, 94(5) :745–751, 2019.
- D. W. Scott. *Multivariate Density Estimation : Theory, Practice, and Visualization*. New York : Wiley, 1992.
- D. Scruton, R. McKinley, N. Kouwen, W. Eddy, and R. Booth. Use of telemetry and hydraulic modeling to evaluate and improve fish guidance efficiency at a louver and bypass system for downstream-migrating atlantic salmon (*salmo salar*) smolts and kelts. In *Aquatic telemetry*, pages 83–94. Springer, 2002.
- D. Scruton, C. Pennell, C. Bourgeois, R. Goosney, T. Porter, and K. Clarke. Assessment of a retrofitted downstream fish bypass system for wild atlantic salmon (*salmo salar*) smolts and kelts at a hydroelectric facility on the exploits river, newfoundland, canada. In *Developments in Fish Telemetry*, pages 155–169. Springer, 2007.
- D. Scruton, C. Pennell, L. Ollerhead, K. Alfredsen, M. Stickler, A. Harby, M. Robertson, K. Clarke, and L. LeDrew. A synopsis of ‘hydropeaking’ studies on the response of juvenile atlantic salmon to experimental flow alteration. *Hydrobiologia*, 609(1) :263, 2008.
- T. W. Sederberg and R. T. Farouki. Approximation by interval bézier curves. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 12(5) :87–95, 1992.
- A. T. Silva, J. M. Santos, M. T. Ferreira, A. N. Pinheiro, and C. Katopodis. Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of iberian barbel (*luciobarbus bocagei*, steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway. *River Research and Applications*, 27(3) :360–373, 2011.
- A. T. Silva, C. Katopodis, J. M. Santos, M. T. Ferreira, and A. N. Pinheiro. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecological Engineering*, 44 :314–328, 2012.
- A. T. Silva, M. C. Lucas, T. Castro-Santos, C. Katopodis, L. J. Baumgartner, J. D. Thiem, K. Aarestrup, P. S. Pompeu, G. C. O’Brien, D. C. Braun, et al. The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries*, 19(2) :340–362, 2018.
- A. T. Silva, K. M. Bærum, R. D. Hedger, H. Baktoft, H.-P. Fjeldstad, K. Ø. Gjelland, F. Økland, and T. Forseth. The effects of hydrodynamics on the three-dimensional downstream migratory movement of atlantic salmon. *Science of the Total Environment*, 705 :135773, 2020.

- B. Silverman. *Density estimation for statistics and data analysis*. Chapman and Hall/CRC, 1986.
- K. Smith and A. Smith. Conditional gan for time series generation. *ArXiv :2006.16477v1*, 2020.
- D. Sonny, S. Jorry, X. Wattiez, and J.-C. Philippart. Inter-annual and diel patterns of the drift of cyprinid fishes in a small tributary of the river meuse. *Folia Zoologica*, 55(1) :75–85, 2006.
- E. A. Steel, P. Guttorp, J. J. Anderson, and D. C. Caccia. Modeling juvenile salmon migration using a simple markov chain. *Journal of agricultural, biological, and environmental statistics*, 6(1) :80–88, 2001.
- T. W. Steig and S. V. Johnston. Behavioral results from acoustically tagged fish using innovative techniques for analyzing three-dimensional data. In *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE*, pages 1–11. IEEE, 2010.
- P. Steinbach. Effets cumulés sur les poissons migrateurs, état et restauration des grands axes de migration du bassin de la loire. *Hydroécologie Appliquée*, 13 :115–130, 2001.
- D. Stich, M. Bailey, and J. D. Zydlewski. Survival of atlantic salmon salmo salar smolts through a hydropower complex. *Journal of Fish Biology*, 85(4) :1074–1096, 2014.
- D. L. Strayer and D. Dudgeon. Freshwater biodiversity conservation : recent progress and future challenges. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(1) :344–358, 2010.
- A. e. a. Sturbois. Extending community trajectory analysis : New metrics and representation. *Ecological Modelling*, 440 :109400, 2021.
- J. C. Svendsen, K. Aarestrup, H. Malte, U. H. Thygesen, H. Baktoft, A. Koed, M. G. Deacon, K. F. Cubitt, and R. S. McKinley. Linking individual behaviour and migration success in salmo salar smolts approaching a water withdrawal site : implications for management. *Aquatic Living Resources*, 24(2) :201–209, 2011.
- A. Svensson and T. Schön. A flexible state space model for learning nonlinear dynamical systems. *Automatica*, 80 :189–199, 2017.
- A. Svensson, T. B. Schön, and M. Kok. Nonlinear state space smoothing using the conditional particle filter**this work was supported by the project probabilistic modelling of dynamical systems (contract number : 621-2013-5524) and cadics, a linnaeus center, both funded by the swedish research council (vr). *IFAC-PapersOnLine*, 48(28) :975–980, 2015. ISSN 2405-8963. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.257>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315028815>. 17th IFAC Symposium on System Identification SYSID 2015.
- M. Szabo-Meszaros, T. Forseth, H. Baktoft, H.-P. Fjeldstad, A. T. Silva, K. Ø. Gjelland, F. Økland, I. Uglem, and K. Alfredsen. Modelling mitigation measures for smolt migration at dammed river sections. *Ecohydrology*, 12(7) :e2131, 2019.
- M. Szabo-Meszaros, A. T. Silva, K. M. Bærum, H. Baktoft, K. Alfredsen, R. D. Hedger, F. Økland, K. Ø. Gjelland, H.-P. Fjeldstad, O. Calles, et al. Validation of a swimming direction model for the downstream migration of atlantic salmon smolts. *Water*, 13(9) :1230, 2021.
- A. A. Taha and A. Hanbury. An efficient algorithm for calculating the exact hausdorff distance. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37(11) :2153–2163, 2015. doi : 10.1109/TPAMI.2015.2408351.

- J. Tang and C. Wardle. Power output of two sizes of atlantic salmon (*salmo salar*) at their maximum sustained swimming speeds. *Journal of Experimental Biology*, 166(1) :33–46, 1992.
- Y. Tao, A. Both, R. I. Silveira, K. Buchin, S. Sijben, R. S. Purves, P. Laube, D. Peng, K. Toohey, and M. Duckham. A comparative analysis of trajectory similarity measures. *GIScience & Remote Sensing*, 58(5) :643–669, 2021. doi : 10.1080/15481603.2021.1908927. URL <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1908927>.
- L. Tarrade, A. Texier, L. David, and M. Larinier. Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia*, 609(1) :177, 2008.
- S. Tetard, M. Lemaire, E. De Oliveira, and P. Martin. Use of 2d acoustic telemetry to study the behaviour of atlantic salmon smolts (*salmo salar*) approaching poutès dam (allier river, france). In *Proceedings of the 11th International Symposium on Ecohydraulics*, pages 7–12, 2016.
- S. Tétard, A. Maire, M. Lemaire, E. De Oliveira, P. Martin, and D. Courret. Behaviour of atlantic salmon smolts approaching a bypass under light and dark conditions : Importance of fish development. *Ecological Engineering*, 131 :39–52, 2019.
- S. Tétard, R. Roy, N. Teichert, J. Rancon, and D. Courret. Temporary turbine and reservoir level management to improve downstream migration of juvenile salmon through a hydropower complex. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2021.
- J. D. Thiem, J. W. Dawson, D. Hatin, A. J. Danylchuk, P. Dumont, A. C. Gleiss, R. P. Wilson, and S. J. Cooke. Swimming activity and energetic costs of adult lake sturgeon during fishway passage. *Journal of Experimental Biology*, 219(16) :2534–2544, 2016.
- E. Thorstad, F. Whoriskey, I. Uglem, A. Moore, A. Rikardsen, and B. Finstad. A critical life stage of the atlantic salmon *salmo salar* : Behaviour and survival during the smolt and initial post-smolt migration. *Journal of fish biology*, 81(2) :500–542, 2012.
- E. Thorstad, T. Havn, S. Sæther, L. Heermann, M. Teichert, O. Diserud, M. Tambets, J. Borcharding, and F. Økland. Survival and behaviour of atlantic salmon smolts passing a run-of-river hydropower facility with a movable bulb turbine. *Fisheries Management and Ecology*, 24(3) :199–207, 2017.
- E. B. Thorstad, F. Økland, K. Aarestrup, and T. G. Heggberget. Factors affecting the within-river spawning migration of atlantic salmon, with emphasis on human impacts. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 18(4) :345–371, 2008.
- M. A. Timko, L. S. Brown, C. D. Wright, R. O’Connor, C. A. Fitzgerald, M. Meager, S. Rizor, P. Nealson, and S. Johnston. Analysis of juvenile chinook, steelhead, and sockeye salmon behavior using acoustic tags at wanapum and priest rapids dams, 2006. *Final report by Hydroacoustic Technology, Inc., Seattle, Washington for Public Utility District*, (2), 2007.
- L. Tischendorf. Modelling individual movements in heterogeneous landscapes : potentials of a new approach. *Ecological modelling*, 103(1) :33–42, 1997.
- S. Tomanova, D. Courret, and A. Alric. Protecting fish from entering turbines : the efficiency of a low-sloping rack for downstream migration of atlantic salmon smolts. *La houille blanche*, (1) : 11–13, 2017.
- F. Travade. Le franchissement des aménagements hydroélectriques par les poissons migrateurs : l’expérience edf. *La houille blanche*, 91(3) :60–68, 2005.

- F. Travade and M. Larinier. La migration de dévalaison : problèmes et dispositifs. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (326-327) :165–176, 1992.
- F. Travade, M. Larinier, S. B. Bernard, and J. Dartiguelongue. Performance of four fish pass installations recently built on two rivers in south-west france. In *Fish migration and fish bypass channels*, Vienne, AUT, 24-26 septembre 1996, pages 146–170, 1998.
- F. Travade, M. Larinier, S. Subra, P. Gomes, and E. De-Oliveira. Behaviour and passage of european silver eels (*anguilla anguilla*) at a small hydropower plant during their downstream migration. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, (398) :01, 2010.
- C. Turan, P. M. Carrica, T. Lyons, D. Hay, and L. Weber. Study of the free surface flow on an ogee-crested fish bypass. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(8) :1172–1175, 2008.
- P. Tytler, J. Thorpe, and W. Shearer. Ultrasonic tracking of the movements of atlantic salmon smolts (*salmo salar* l) in the estuaries of two scottish rivers. *Journal of Fish Biology*, 12(6) : 575–586, 1978.
- Y. Vermard, E. Rivot, S. Mahévas, P. Marchal, and D. Gascuel. Identifying fishing trip behaviour and estimating fishing effort from vms data using bayesian hidden markov models. *Ecological Modelling*, 221(15) :1757–1769, 2010.
- J. J. Videler. *Fish swimming*, volume 10. Springer Science & Business Media, 1993.
- A. S. Vowles and P. S. Kemp. Effects of light on the behaviour of brown trout (*salmo trutta*) encountering accelerating flow : Application to downstream fish passage. *Ecological Engineering*, 47 :247–253, 2012.
- A. S. Vowles, J. J. Anderson, M. H. Gessel, J. G. Williams, and P. S. Kemp. Effects of avoidance behaviour on downstream fish passage through areas of accelerating flow when light and dark. *Animal Behaviour*, 92 :101–109, 2014.
- H. Wang, Y. Du, J. Yi, Y. Sun, and F. Liang. A new method for measuring topological structure similarity between complex trajectories. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 31(10) :1836–1848, 2019. doi : 10.1109/TKDE.2018.2872523.
- P. W. Webb. The effect of size on the fast-start performance of rainbow trout *salmo gairdneri*, and a consideration of piscivorous predator-prey interactions. *Journal of Experimental Biology*, 65(1) : 157–177, 1976.
- P. W. Webb and D. Weihs. *Fish biomechanics*. Praeger, 1983.
- P. W. Webb, P. T. Kostecki, and E. D. Stevens. The effect of size and swimming speed on locomotor kinematics of rainbow trout. *Journal of Experimental Biology*, 109(1) :77–95, 1984.
- K. Whoriskey. Statistical advancements to modelling animal movement in aquatic environments. 2021.
- K. Whoriskey, H. Baktoft, C. Field, R. Lennox, R. Babyn, E. Lawler, and J. Mills Flemming. Predicting aquatic movements and behavioural states from acoustic telemetry arrays. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022.
- M. A. Wilkes, M. Mckenzie, and J. A. Webb. Fish passage design for sustainable hydropower in the temperate southern hemisphere : an evidence review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 28 (1) :117–135, 2018.

- J. G. Williams. Mitigating the effects of high-head dams on the columbia river, usa : experience from the trenches. *Hydrobiologia*, 609(1) :241–251, 2008.
- J. G. Williams, G. Armstrong, C. Katopodis, M. Larinier, and F. Travade. Thinking like a fish : a key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions. *River Research and Applications*, 28(4) :407–417, 2012.
- S. P. Windsor and M. J. McHenry. The influence of viscous hydrodynamics on the fish lateral-line system. *Integrative and comparative biology*, 49(6) :691–701, 2009.
- J. Winter. Advances in underwater biotelemetry. *Fisheries techniques*, pages 555–590, 1996.