



HAL
open science

Étude des grilles de prises d'eau ichtyocompatibles

Fatma Lemkecher

► **To cite this version:**

Fatma Lemkecher. Étude des grilles de prises d'eau ichtyocompatibles. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de Poitiers, 2020. Français. NNT : 2020POIT2275 . tel-03255290

HAL Id: tel-03255290

<https://theses.hal.science/tel-03255290>

Submitted on 9 Jun 2021

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.

THÈSE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS
Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées
Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016

Ecole Doctorale SIMME : Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique et Énergétique
Domaine de recherche : Mécanique des Milieux Fluides

Présentée par
Fatma Lemkecher

Étude des grilles des prises d'eau ichtyocompatibles

Directeurs de thèse :
Laurent David
Ludovic Chatellier

Thèse soutenue le : 4 décembre 2020
devant la Commission d'Examen

JURY

R. BOES	<i>Professeur, ETH Zurich, Laboratoire VAW</i>	Rapporteur
F. LARRARTE	<i>Directrice de recherches, Université Gustave Eiffel, Laboratoire St Venant</i>	Rapporteur
S. ABADIE	<i>Professeur, Université de Pau et des pays de l'Adour, Laboratoire SIAME</i>	Examineur
D. COURRET	<i>Ingénieur de recherches, OFB, Pôle R&D Ecohydraulique IMFT</i>	Examineur
L. DAVID	<i>Professeur, Université de Poitiers, Institut Pprime</i>	Examineur
L. CHATELLIER	<i>Maître de Conférences HDR, Université de Poitiers, Institut Pprime</i>	Examineur

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée au sein de l'équipe Hydée du département Fluide-Thermique-Combustion de l'Institut Pprime, à l'université de Poitiers dans le cadre du projet européen FITHydro.

Je commence par remercier Stéphane Abadie pour avoir accepté de présider le jury et mes deux rapporteurs Frédérique Larrarte et Robert Boes pour avoir relu avec attention ma thèse dans ces conditions sanitaires difficiles.

Je tiens à remercier mes deux directeurs de thèse Laurent David et Ludovic Chatellier pour leurs conseils précieux, leur rigueur scientifique et leur soutien et aide nécessaires pour mener à bien ces travaux.

J'adresse également mes remerciements à Gérard Pineau qui m'a donné le goût de la recherche à travers le stage de fin d'étude et toute l'équipe pour la bonne ambiance de travail. Je remercie Dominique Courret pour ses conseils, ses remarques pertinentes et pour son aide précieuse lors des mesures dans les centrales. Toutes les mesures en laboratoire ou in-situ ne se seraient pas faites sans le support incontesté de tous les ingénieurs et techniciens qui m'ont aidée (notamment pour monter des grilles de 300 kg dans un canal en verre!). Je remercie donc Christian Refin (notamment pour son humour indéfectible et les mesures à Las Rives avec de la grêle en plein juillet à Foix!), Laurent Dupuis, Jean-Marc Mougenot, Richard Tessier, Romain Bellanger, Francis Boissoneau, Pierre-François Laplaceta et Anthony Bernard pour m'avoir donné les moyens techniques et pour s'être rendu disponibles quand j'en avais besoin lors des manipulations expérimentales.

Je suis ravie d'avoir fait parti et d'avoir contribué au projet FITHydro dans lequel ma thèse a été financée et lors duquel j'ai eu la chance de côtoyer différents chercheurs européens et eu des échanges fructueux notamment lors des congrès, tant sur le plan professionnel qu'humain.

Il va sans dire que je remercie mes collègues de bureau: Clément (merci pour tes conseils et tes encouragements pendant les moments les plus difficiles), Thomas, Pierre, Anthony et Anne-fleur. Mais aussi tous les doctorant(e)s que j'ai connus lors de ces trois

années: Lahna (remerciement spécial pour ton accueil lors de mon premier jour à Poitiers), Anastasios, Mélissa, Ugo, Ayoub, Gros B, Prashant, Rawaa, Michelle, Larbi, Etienne, Nishant, Yann, Johan, Hervé, Gwenaël, Thomas, Gad, Srikar, Umesh et Sachin. La liste est encore longue, j'en ai peut-être oublié quelques uns mais je pense à vous!

Pour finir, Je voudrais remercier mes parents pour m'avoir toujours encouragé dans ma vie et mes choix et poussé à être meilleure et plus forte dans tout ce que j'entreprends. Leur soutien m'a été d'un grand réconfort malgré la distance et je leur dédie mon travail. Je remercie également mes deux soeurs et ma tante pour leur support et également mes ami(e)s: Ameni, Houma, Waf et Hmed. En dernier mais pas des moindres, je remercie Thibaud et sa famille, pour m'avoir soutenu pendant les moments difficiles (et pas que!). Je suis très reconnaissante de ses efforts sans lesquels je n'aurais pas achevé ce travail avec succès.

Financement

Cette thèse a été financée dans le cadre du projet Européen Horizon 2020 FITHYDRO (www.fithydro.eu) sous le numéro de contrat 727830 et les simulations numériques ont été réalisées sur la plateforme nationale de calcul GENCY sur laquelle un nombre d'heures nous a été alloué.

Table des matières

Introduction	1
1 Etat de l'art	5
1.1 L'ichtyologie	5
1.2 La migration des poissons	6
1.3 Les solutions pour la dévalaison des poissons	7
1.3.1 Les barrières physiques	7
1.3.2 Les barrières comportementales (mécaniques)	9
1.3.3 Les barrières comportementales (sensorielles)	11
1.3.4 La collecte et le transport	11
1.3.5 Les turbines ichtyocompatibles	12
1.3.6 L'arrêt ciblé des turbines	12
1.4 Les grilles ichtyocompatibles à faible espacement entre les barreaux	13
1.4.1 Définition des critères ichtyocompatibles	13
1.4.2 Pertes de charges	14
1.4.3 Les grilles inclinées	16
1.4.4 Les grilles orientées	23
1.4.5 Simulations numériques des grilles ichtyocompatibles	32
1.5 Bilan	32
2 Outils expérimentaux et numériques	35
2.1 Mécanique des fluides d'un écoulement à surface libre	35
2.2 Outils expérimentaux	37
2.2.1 Mesure de laboratoire	37
2.2.2 Mesure de terrain	46
2.3 Simulation numérique du plan de grille	53
2.3.1 Présentation de l'outil numérique	54

2.3.2	Paramètres numériques	54
2.3.3	Validation d'un modèle numérique de l'écoulement à travers une grille	59
2.4	Bilan	62
3	Les grilles inclinées	64
3.1	Mesure et modélisation des pertes de charge en laboratoire	65
3.1.1	Coefficient de forme du barreau	65
3.1.2	Coefficient des supports transversaux	72
3.2	Modélisation numérique de la vitesse à travers les grilles inclinées avec des supports	77
3.3	Mesure et modélisation numérique de la vitesse in situ	82
3.3.1	Conditions de fonctionnement de la prise d'eau au moment des mesures	82
3.3.2	Courantologie en amont des grilles	82
3.3.3	Attractivité des exutoires	88
3.4	Bilan	91
4	Les nouvelles solutions de barrières physiques	94
4.1	Les grilles orientées à barreaux horizontaux	94
4.1.1	Pertes de charge	95
4.1.2	Vitesse	104
4.2	Les plaques perforées	111
4.2.1	Pertes de charge	113
4.2.2	Vitesse	119
4.3	Bilan	124
	Conclusion	126
	Références	136
	Annexes	138

Table des figures

1.1	Cycle de migration du saumon à gauche adapté de Cooke, Crossin et Hinch (2011) de l'anguille à droite adapté de Béguyer-pon et Dodson (2015).	7
1.2	Types de barrières physiques (de gauche à droite: inclinée, orientée avec barreaux verticaux modifiés dans le sens de l'écoulement, orientée avec barreaux verticaux perpendiculaires au support de la grille, orientée avec barreaux horizontaux).	9
1.3	Schéma du Louver (Schwevers et Adam, 2020) avec V_a la vitesse d'approche.	9
1.4	Types de configurations des grilles testées par Albayrak et al. (2017) (a) louver, (b) grille orientée, (c) grille orientée à barreaux modifiés et (d) le canal testé.	10
1.5	Louver avec barreaux incurvés (Beck et al., 2019a).	10
1.6	Barrière comportementale électrique (Schwevers et Adam, 2020).	11
1.7	Processus de développement des turbines ichtyocompatibles MGR et Alden schématisés par <i>Voith hydro</i> (Dewitte et David, 2018).	12
1.8	Décomposition de la vitesse d'approche V_a le long de la grille en vitesse tangentielle V_t et normale V_n quelque soit l'orientation α ou l'inclinaison β de grille.	13
1.9	Schéma d'un exemple du dispositif de dévalaison composé d'une grille inclinée, d'exutoires, d'une goulotte et d'un canal de dévalaison.	14
1.10	Schéma explicatif de l'application du théorème de Bernoulli dans un canal à surface libre et la position des points de mesure de la hauteur d'eau en amont (S_1) et en aval (S_2) de la grille, en vue longitudinale du canal dans le plan (x,z).	15
1.11	Définitions des types de colmatage classés par deux groupes selon Meusburger (2002).	18
1.12	Représentation des plans de vitesse sur une coupe longitudinale de la grille pour plusieurs inclinaisons de la grille ($\beta = 15^\circ$ à 45°) par Raynal et al. (2013a).	20

1.13 Comparaison des profils de vitesses normalisées ($V_1 = 0.7ms^{-1}$ étant sa vitesse d'approche): V_n/V_1 , V_t/V_1 et V_t/V_n pour une grille inclinée ($\beta = 25^\circ$) avec et sans colmatage par Raynal (2013).	21
1.14 Représentation de la vitesse axiale normalisée en vue de dessus dans le plan (x,y) de la courantologie en fonction du nombre d'exutoires (représentés en blanc) associés à une grille inclinée à 25° par Raynal (2013).	22
1.15 Représentation des configurations de barreaux des grilles orientées testées par Raynal (2013) : à droite les barreaux perpendiculaire à l'axe de la grille (VPB) et à gauche les barreaux placés dans le sens de l'écoulement (VSB). . .	26
1.16 Comparaison des vitesses axiales normalisées par Raynal et al. (2014) pour les deux configuration de grilles orientées pour différents angles d'orientations ($\alpha=30^\circ$ à 60°) avec V_1 la vitesse en amont et V_2 la vitesse en aval.	27
1.17 Schéma et dimensions des barreaux incurvés proposés par Beck et al. (2019a).	28
1.18 Représentation du ratio des vitesses tangentielle et normale, de la vitesse normale adimensionnée et de la vitesse axiale adimensionnée des différentes configurations de grilles testées par Beck et al. (2019b).	28
1.19 Schéma des barreaux testés par Meister et al. (2020a).	29
1.20 Comparaison des profils de vitesse normale adimensionnée et du ratio des vitesses tangentielle et normale avec et sans colmatage des grilles orientées réalisés par Raynal (2013).	30
1.21 Représentation de la vitesse axiale adimensionnée sur une grille de type <i>Curved Bar Racks</i> colmatée réalisée par Beck et al. (2019b).	30
1.22 Représentation de la norme de la vitesse adimensionnée pour une grille propore en haut et une grille colmatée en bas testées par Meister et al. (2020b). .	31
1.23 Représentation de la norme de vitesse adimensionnée et des lignes de courant d'une grille orientée associée à un exutoire latéral en berge en amont simulé par Raynal (2013).	31
2.1 Canal hydraulique à surface libre de l'institut Pprime.	38
2.2 Composants des grilles et notations des paramètres caractéristiques.	38
2.3 Evolution du coefficient de pertes de charge ξ des grilles inclinées en fonction du nombre de Reynolds du barreau (à gauche)et de Froude Fr (à droite) pour différentes séries de mesures. Chaque série correspond à une augmentation du débit Q à hauteur d'eau H_1 constante de l'étude (Raynal et al., 2013a) notée SR et de l'étude actuelle notée FL pour le profil de barreau Plétina. (PR: profil rectangulaire, PH: profil hydrodynamique, PL: Plétina, β : l'angle d'inclinaison).	39

2.4	Schéma de la méthode de mesure de la sonde (à gauche) et de son volume de mesure (à droite).	40
2.5	Position schématique des sondes dans le canal des grilles inclinées (en haut) et des grilles orientées (en bas).	41
2.6	Sondes ADV utilisées (à gauche sonde de type droite et à droite sonde de type coudée).	44
2.7	Maillage en amont et en aval des grilles orientées.	45
2.8	Localisation de la centrale hydroélectrique de Las Rives.	46
2.9	Visualisation du site de Las Rives : (a) vue aérienne, (b) plan de grille hors d'eau vue depuis l'amont, (c) plan de grille en eau vue depuis l'amont, (d) vue de la goulotte transversale de collecte des exutoires et son élargissement progressif et (e) débouché de la goulotte de dévalaison dans le tronçon court-circuité.	47
2.10	Photo de l'ADCP StreamPRo monté sur son trimaran et de la sonde avec un détail des 4 capteurs.	48
2.11	Support et chariot de déplacement ayant permis de déployer la sonde ADCP.	49
2.12	Positionnement des transects de mesures ADCP à Las Rives en 2018.	50
2.13	Positionnement des jaugeages réalisés dans la goulotte de Las Rives.	51
2.14	Exemple d'un courantomètre électro-magnétique.	51
2.15	Découpage d'une section lors d'une mesure au courantomètre, en rouge les verticales, les points noirs correspondent aux point de mesure.	52
2.16	Géométrie du modèle numérique du canal avec la grille inclinée à 25°(à gauche dans le plan (y,z) et à droite dans le plan en vue de côté (x,z)).	55
2.17	Géométrie du modèle numérique du canal avec la paroi poreuse surfacique à 90°(à gauche), le bloc de porosité incliné à 25°dans le plan en vue de côté (x,z) (à droite).	56
2.18	Maillage zoomé de la grille inclinée dans le plan (x,z) avec la zone de raffinement.	57
2.19	Maillage zoomé du bloc de porosité dans le plan vertical (x,z).	57
2.20	Comparaison des profils expérimentaux et numériques des vitesses normalisées: axiale V_x , normale V_n , tangentielle V_t et du ratio V_t/V_n , situés à 50 mm en amont de la grille.	60
2.21	Comparaison des profils expérimentaux et numériques des vitesses normalisées axiale V_x ,situé à 400 mm en aval de la grille.	60
3.1	Composants des grilles (barreaux, entretoises, supports transversaux et longitudinaux) et profils de barreaux testés.	65

3.2	Dimensions des barreaux: largeur (b) et profondeur (p) (Goutte d'eau: GE, Plétina: PL, Têtard 8: T8, Têtard 10: T10, Rectangulaire: REC, Hydrodynamique: HYD).	66
3.3	Comparaison des coefficients de pertes de charge mesurés ξ pour les 4 profils de barreaux((a) Goutte d'eau, (b) Plétina, (c) Têtard 8, (d) Têtard 10) et pour les deux espacements entre les barreaux, en fonction de l'angle d'inclinaison β . 67	67
3.4	Régression linéaire entre le coefficient des barreaux ξ_{barreaux} pour les 4 formes de barreaux ((a) Goutte d'eau, (b) Plétina, (c) Têtard 8, (d) Têtard 10) en fonction de $K_b \times K_\beta$	69
3.5	Profils de barreaux testés par Meister et al. (2020a).	70
3.6	Régression linéaire entre le coefficient de pertes de charge mesuré $\xi_{\text{mesuré}}$ et le coefficient de pertes de charge modélisé $\xi_{\text{modélisé}}$ à partir de la formule de Meister et al. (2020a) : (a) Goutte d'eau et (b) Têtard 10 (c) Têtard 8 (d) Plétina de 30 ° à 45 °.	70
3.7	Régression linéaire entre le coefficient de pertes de charge mesuré $\xi_{\text{mesuré}}$ et coefficient de pertes de charge modélisé $\xi_{\text{modélisé}}$ à partir de la formule de Meister et al. (2020a) : (a) Goutte d'eau et (b) Têtard 10 (c) Têtard 8 (d) Plétina pour les angles de 30° à 45 °.	71
3.8	Dimensions des supports transversaux: en U à gauche et profilé à droite placée derrière une rangée d'entretoises.	73
3.9	Les supports utilisées dans l'écoulement (à gauche la forme en U et à droite la forme profilée).	73
3.10	Comparaison du coefficient de pertes de charge ξ sans et avec 1 ou 2 supports en U pour (a) profil rectangulaire (PR) et un espacement entre les barreaux de 10 mm, (b) profil rectangulaire (PR) et un espacement entre les barreaux de 15 mm, (c) profil hydrodynamique (PH) et un espacement entre les barreaux de 10 mm et (d) profil hydrodynamique (PH) et un espacement entre les barreaux de 15 mm, en fonction de l'angle d'inclinaison β	74
3.11	Comparaison du coefficient de pertes de charge ξ sans et avec support profilé pour (a) profil rectangulaire (PR) et un espacement entre les barreaux de 10 mm, (b) profil rectangulaire (PR) et un espacement entre les barreaux de 15 mm, (c) profil hydrodynamique (PH) et un espacement entre les barreaux de 10 mm et (d) profil hydrodynamique (PH) et un espacement entre les barreaux de 15 mm, en fonction de l'angle d'inclinaison β	75
3.12	Projection verticale du support pour estimer le blocage frontal.	76

3.13 Régression linéaire entre le coefficient de pertes de charge mesuré $\xi_{mesuré}$ et coefficient de pertes de charge modélisé $\xi_{modélisé}$ (a) le support en U et (b) le support profilé.	77
3.14 Représentation de la vitesse axiale normalisée (V_x/V_o) de l'écoulement en coupe transversale à travers une grille inclinée à 25°, munie de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, sans entretoises.	78
3.15 Représentation de la vitesse axiale normalisée (V_x/V_o) de l'écoulement en coupe trasversale à travers une grille inclinée à 25°, munie de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, avec 5 barres d'entretoise.	78
3.16 Représentation de la vitesse axiale normalisée (V_x/V_o) de l'écoulement en coupe transversale à travers une grille inclinée à 25°, munie de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, avec le support en U, sans entretoises.	79
3.17 Représentation de la vitesse axiale normalisée (V_x/V_o) de l'écoulement en coupe transversale à travers une grille inclinée à 25°, munie de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, avec le support profilé, sans entretoises.	79
3.18 Comparaison des profils expérimentaux et numériques des vitesses normalisées: axiale V_x (a), tangentielle V_t (b), normale V_n (c) et du ratio V_t/V_n (d), situés à 50 mm en amont de la grille inclinée à 25°, de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, avec et sans barres d'entretoise pour $V_o = 0.7 \text{ ms}^{-1}$, et avec et sans les supports en U et profilé.	80
3.19 Comparaison des profils de vitesse axiale normalisée aval à travers une grille inclinée à 25°, de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, sans et avec 5 barres d'entretoises, et avec et sans le support en U ou le support profilé.	81
3.20 Cartographies des vitesses adimensionnées V_x/V_o (à gauche) et V_z/V_o (à droite) mesurées à Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	82
3.21 Cartographies des vitesses adimensionnées V_y/V_o Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	83
3.22 Cartographies de V_t/V_o (à gauche) et V_n/V_o (à droite) mesurées à Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	84
3.23 Cartographie du rapport V_t/V_n mesurées à Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	85
3.24 Vue de dessus des vecteurs des vitesses moyennées sur la hauteur, au niveau des quatre transects à Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	85
3.25 Cartographies des vitesses adimensionnées V_x/V_o (à gauche) et V_z/V_o (à droite) modélisées de Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	86
3.26 Cartographies des vitesses adimensionnées V_y/V_o modélisées de Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	86
3.27 Cartographies de V_t/V_o (à gauche) et V_n/V_o (à droite) modélisées de Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	87

3.28	Cartographie du rapport V_t/V_n modélisées de Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	88
3.29	Cartographie de V_y/V_o du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille. Le sens positif est orienté de la rive droite vers la rive gauche. La position des exutoires est délimitée par les traits verticaux, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$	89
3.30	Plan (x,y) en vue de dessus de la norme de la vitesse et des vecteurs de vitesse de la simulation numérique avec les positions de mesure in situ en flèches rouges.	90
4.1	Schéma des grilles orientées à barreaux horizontaux avec les différents pa- ramètres et dimensions des barreaux.	95
4.2	Vue de dessus de l'orientation de la grille selon les 4 angles: 30° , 45° , 60° , 90°	96
4.3	Vue de côté du canal avec l'emplacement des sondes de mesure (0, 1) en amont de la grille et (2, 3) en aval de la grille.	97
4.4	Comparaison du coefficient de pertes de charge (a) Profil Rectangulaire (PR), (b) Profil hydrodynamique (PH), pour les trois espacements (e) en fonction de l'angle d'orientation (α).	98
4.5	Comparaison du coefficient de pertes de charge (a) Profil Rectangulaire (PR), (b) Profil hydrodynamique (PH), pour les 4 angles d'orientation (α) en fonc- tion du ratio entre l'espacement entre les barreaux et la largeur du barreau (e/b).	98
4.6	Comparaison du coefficient de pertes de charge mesuré avec ceux de la lit- térature, en fonction de l'angle d'orientation (α); (a) pour e/b=1 ou 1.25 et (b) pour e/b=2 ou 1.87; PC: Profil Cylindrique, PR: Profil Rectangulaire, PH: Profil Hydrodynamique, PH2: Profil Hydrodynamique de l'étude de Albay- rak, Maager et Boes (2019).	99
4.7	Comparaison du coefficient de pertes de charge modélisé avec ceux de la lit- térature, en fonction de e/b; (a) pour $\alpha = 30^\circ$; (b) pour $\alpha = 45^\circ$; (c) pour $\alpha =$ 60° ; (d) pour $\alpha = 90^\circ$; pour le profil de barreau rectangulaire (PR).	101
4.8	Grilles orientées avec: (a) barreaux horizontaux (HB), (b) barreaux verticaux perpendiculaires (VPB), (c) barreaux dans le sens de l'écoulement (VSB).	103
4.9	Comparaison du coefficient de pertes de charge en fonction de l'angle d'orien- tation (α) pour VPB, VSB et HB avec des barreaux rectangulaires et e/b=2.	104
4.10	Comparaison des profils de vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante amont pour Profil Rectangulaire (PR), e =10 mm et les différents angles (α). (a) vitesse axiale amont, (b) vitesse axiale avale normalisée par V_2 la vitesse débitante avale, (c) vitesse normale amont, (d) ratio des vitesses tangentielle et normale.	105

4.11 Comparaison des profils de vitesse tangentielle normalisée par V_o la vitesse débitante amont pour $e = 10$ mm et les différents angles (α). (a) Profil Hydrodynamique (PH), (b) Profil Rectangulaire (PR).	105
4.12 Profils transversaux de vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante amont en fonction des deux formes de barreau et les différents espacements entre les barreaux (e) pour un angle $\alpha = 30^\circ$. (a) vitesse axiale amont, (b) vitesse axiale avale normalisée par V_2 la vitesse débitante avale, (c) vitesse normale amont, (d) ratio des vitesses tangentielle et normale.	106
4.13 Profils de vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante amont en fonction des grilles VPB, VSB and HB, pour un espacement entre les barreaux $e = 10$ mm, les deux formes de barreaux et un angle $\alpha = 30^\circ$. (a) vitesse tangentielle amont, (b) vitesse normale amont, (c) ratio des vitesses tangentielle et normale.	107
4.14 Profils de vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante amont en fonction des grilles VPB, VSB and HB, pour un espacement entre les barreaux $e = 10$ mm, les deux formes de barreaux et un angle $\alpha = 45^\circ$. (a) vitesse tangentielle amont, (b) vitesse normale amont, (c) ratio des vitesses tangentielle et normale.	108
4.15 Profils de vitesse axiale avale normalisée par la vitesse débitante avale V_2 en fonction des grilles VPB, VSB and HB, pour un espacement entre les barreaux $e = 10$ mm, PR et un angle $\alpha = 45^\circ$	108
4.16 Grille Eicher (EPRI, 1987).	112
4.17 Diagramme de la prise d'eau Lépine (en haut) et exemple de la prise d'eau Brides les Bains (d'altitude 695 m) sur la rivière du Doron des Allues – France (en bas et sans eau) (Dewitte et David, 2018).	112
4.18 Exemple d'une prise d'eau tyrolienne classique: Saint Marcel sur le Doron de la rivière de Belleville (d'altitude 1437 m) (à gauche) et Bocognano sur la rivière du Gravone (d'altitude 890 m) (à droite) – France (Dewitte et David, 2018).	113
4.19 Diagramme d'une prise d'eau Coanda et exemple de la prise d'eau Coanda d'Escouloubre (d'altitude 977 m) sur la rivière de l'Aude – France (Dewitte et David, 2018).	113
4.20 Exemple de mise en place de plaques perforées associées à des exutoires, inclinée (à gauche) et orientée (à droite).	114
4.21 Dimensions des orifices des plaques perforées.	114
4.22 Types des plaques perforées: (a) avec des orifices parallèles, (b) avec des orifices en quinconce verticaux et (c) avec des orifices en quinconce horizontaux	115

4.23	Plaques perforées testées avec les supports longitudinaux et les tiges transversales.	116
4.24	Vue de côté du canal à surface libre avec la plaque perforée inclinée. L'emplacement des profils de vitesse est repéré en rouge à 50 mm en amont et à 400 mm en aval de la plaque. Les sondes de la hauteur d'eau sont repérées par S_0, S_1, S_2, S_3	116
4.25	Coefficient de pertes de charge mesurés des plaques perforées en fonction de l'angle d'inclinaison. Pour les orifices (verticaux V et horizontaux H) en quinconce (à gauche), pour les orifices parallèles (à droite) et les différentes largeurs a_1 et hauteurs a_2	117
4.26	Comparaison des vitesses normalisées sur V_o la vitesse débitante en amont, (a) de la composante axiale, (b) de la composante tangentielle, (c) de la composante normale et (d) du ratio des vitesses tangentielles et normales des plaques perforées à orifices verticaux en quinconce, pour des différentes largeurs a_1 et hauteurs a_2 , en fonction de Z/H	119
4.27	Comparaison des vitesses normalisées sur V_o la vitesse débitante en amont, (a) de la composante axiale, (b) de la composante tangentielle, (c) de la composante normale et (d) du ratio des vitesses tangentielles et normales des plaques perforées à orifices verticaux parallèles, pour des différentes largeurs a_1 et hauteurs a_2 , en fonction de Z/H	120
4.28	Comparaison des vitesses normalisées sur V_o la vitesse débitante en amont, (a) de la composante normale et (b) du ratio des vitesses tangentielles et normales des plaques perforées à orifices en quinconce verticaux (V) et parallèles verticaux (V) et les orifices en quinconce horizontaux (H), pour $a_1 = 15$ mm et $a_2 = 100$ mm, en fonction de Z/H , pour deux angles d'inclinaison $\beta = 25^\circ$ et 35°	120
4.29	Comparaison des vitesses normalisées sur V_o la vitesse débitante en amont, (a) de la composante normale et (b) du ratio des vitesses tangentielles et normales des plaques perforées à orifices en quinconce verticaux (V) et parallèles verticaux (V) et les grilles inclinées (GI) ($e/b=2$; PR), pour $a_1 = 15$ mm et $a_2 = 100$ mm, en fonction de Z/H , pour deux angles d'inclinaison $\beta = 25^\circ$ et 35°	121
4.30	Comparaison des vitesses normalisées sur V_2 la vitesse débitante en aval, de la composante axiale des plaques perforées à orifices en quinconce verticaux (a) et parallèles verticaux (b) pour différents a_1 et a_2 , en fonction de Z/H , pour un angle d'inclinaison $\beta = 25^\circ$	122

- 4.31 Comparaison des vitesses normalisées sur V_2 la vitesse débitante en aval, de la composante axiale des plaques perforées à orifices en quinconce et parallèles verticaux et en quinconce horizontaux pour différents $a_1 = 15$ mm et $a_2 = 100$ mm, en fonction de Z/H , pour deux angle d'inclinaison $\beta = 25^\circ$ et 35° . . . 122
- 4.32 Comparaison des vitesses normalisées sur V_2 la vitesse débitante en aval, de la composante axiale des plaques perforées à orifices en quinconce et parallèles verticaux et une grille inclinée pour différents $a_1 = 15$ mm et $a_2 = 100$ mm, en fonction de Z/H , pour deux angle d'inclinaison $\beta = 25^\circ$ et 35° 123

Liste des tableaux

1.1	Classification des différentes solutions pour la dévalaison des poissons.	8
1.2	Comparaison des coefficients K_C modélisant l'effet du colmatage pour différentes configurations. Les configurations GD, GI et GO représentent respectivement les grilles droites, inclinées à 25° et orientées à 45° . Toutes les grilles sont munies de barreaux rectangulaires espacés de $e = 10$ mm (Raynal, 2013). 19	19
1.3	Tableau récapitulatif des premières formules du coefficient de pertes de charges ξ des grilles orientées.	23
1.4	Tableau récapitulatif des récentes formules du coefficient de pertes de charges ξ des grilles orientées propres.	24
1.5	Tableau récapitulatif des différentes études sur les formules de pertes de charges des grilles ichtyocompatibles. (Rec: rectangulaire, Hyd: hydrodynamique)	26
1.6	Tableau récapitulatif des différentes études sur les champs de vitesses de grilles ichtyocompatibles. (Rec: rectangulaire, Hyd: hydrodynamique)	29
2.1	Position des mesures de hauteur d'eau amont (L_1) et aval (L_2) et du rapport de ces positions à la hauteur d'eau amont (H_1) des récentes études.	41
2.2	Comparaison des contributions en pourcentage des différents termes de calcul de l'incertitude liée au coefficient de pertes de charge ξ	44
2.3	Tableau récapitulatif des conditions aux limites pour les simulations diphasiques. (α : Fraction de l'eau; k : énergie cinétique turbulente; ω : taux de dissipation spécifique; Valeur fixe (Dirichlet) : D; NG: Non glissement; ES: Entrée-sortie; Flux fixe: FF; Gradient nul (Neuman homogène): N; Loi de paroi: LP) 58	58
2.4	Tableau récapitulatif des conditions aux limites pour les simulations monophasiques. (k : énergie cinétique turbulente; ω : taux de dissipation spécifique; Valeur fixe (Dirichlet): D; NG: Non glissement; ES: Entrée-sortie; Gradient nul (Neuman homogène): N; Loi de paroi: LP)	58

2.5	Paramètres hydrauliques imposés. (Hauteur d'eau:HE)	59
2.6	Tableau récapitulatif du coefficient de pertes de charges numérique obtenu pour les configurations testées: ξ_{num1} pour l'emplacement à la surface libre, ξ_{num2} pour la pression au fond du canal, ξ_{num3} pour la pression à la surface libre.	61
2.7	Tableau récapitulatif du coefficient de pertes de charges numérique obtenu pour les configurations testées: ξ_{num1} pour la pression au fond du canal, ξ_{num2} pour la pression à la surface libre.	62
3.1	Formes de barreaux testées dans l'écoulement et poids de la grille associée pour les deux espacements (e).	66
3.2	Paramètres des barreaux (b et p) pour les différents profils de barreaux. . . .	66
3.3	Coefficient de forme des barreaux testés (Goutte d'eau: GE; Plétina: PL; Têtard 8: T8; Têtard 10: T10; Hydrodynamique: HYD; Rectangulaire: REC). . . .	68
3.4	Coefficient A_i déterminé à partir de la formule de Meister et al. (2020a) des formes de barreaux testés (Goutte d'eau: GE; Plétina: PL; Têtard 8: T8; Têtard 10: T10).	70
3.5	Coefficient A_i déterminé à partir de la formule de Meister et al. (2020a) des formes de barreaux testés de 30 ° à 45 °.	71
3.6	Coefficient de forme des barreaux testés par Meister et al. (2020a), calculé avec la formule de Raynal et al. (2013a) avec les barreaux testés lors de cette étude.	72
3.7	Répartition des débits dans les exutoires mesurés et simulés à Las Rives. . . .	90
4.1	Dimensions des constituants de la grille et paramètres hydrauliques des expériences.	96
4.2	Moyenne des écarts absolus entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites du coefficient de pertes de charge ξ à partir des différentes formules en fonction de l'angle d'orientation (α).	102
4.3	Paramètres des plaques perforées testées.	115
4.4	Coefficient A_i modélisé pour les différentes configurations des plaques.	118
4.5	Comparaison des pertes de charge ΔH (mm) pour une grille inclinée à barreaux hydrodynamique et Têtard 8 et pour une plaque perforée pour trois espacements e (10, 15 et 20 mm), une largeur de barreau $b = 7$ mm et deux angles d'inclinaison β (15 et 25°) et une vitesse de 0.7 ms^{-1} et 11 barres d'entretoises pour 15° et 7 barres pour 25°.	118
A	Matrice d'essais des mesures expérimentales des grilles inclinées avec les différentes formes de barreau. (PDC: Pertes de charge)	139

B	Matrice d'essais des mesures expérimentales des grilles inclinées avec les supports. (PDC: Pertes de charge)	142
C	Matrice d'essais des mesures expérimentales des grilles orientées à barreaux horizontaux. (PDC: Pertes de charge; Profil de vitesse amont et aval: VAA) . .	144
D	Matrice d'essais des mesures expérimentales des plaques perforées. (PDC: Pertes de charge; Profil de vitesse amont et aval: VAA)	146

Notations

Acronymes

<i>GD</i>	Grille Droite
<i>GE</i>	Profil Goutte d'eau
<i>GHO</i>	Grille Orientée à barreaux Horizontaux
<i>GI</i>	Grille Inclinée
<i>GO</i>	Grille Orientée
<i>HB</i>	Barreaux Horizontaux
<i>HYD</i>	Hydrodynamique
<i>PB</i>	Grille à barreaux Perpendiculaires
<i>PH</i>	Profil Hydrodynamique
<i>PL</i>	Profil Plétina
<i>PR</i>	Profil Rectangulaire
<i>RANS</i>	Reynolds Averaged Navier Stokes
<i>REC</i>	Rectangulaire
<i>SB</i>	Grille à barreaux dans le Sens de l'écoulement
<i>T10</i>	Profil Têtard 10
<i>T8</i>	Profil Têtard 8
<i>VPB</i>	Barreaux Verticaux Perpendiculaires
<i>VSB</i>	Barreaux Verticaux dans le Sens de l'écoulement

Constantes

ν	Viscosité cinématique de l'eau (10^{-6})	m^2s^{-1}
-------	--	---------------------------

ρ	Masse volumique de l'eau (998)	kgm^{-3}
g	Accélération de la pesanteur (9.81)	ms^{-2}

Paramètres géométriques

α	Angle d'orientation de la grille	$^{\circ}$
β	Angle d'inclinaison de la grille	$^{\circ}$
A_i	Coefficient de forme du barreau	-
B	Largeur du canal	m
b	Largeur du barreau	m
C	Degré de colmatage de la grille	-
C_0	Degré de colmatage initial dû aux plaques	-
D_{sp}	Diamètre des entretoises	m
e	Espacement entre les barreaux	m
h	Projection de la diagonale du support	m
K_C	Coefficient de colmatage	-
K_f	Coefficient de forme du barreau de Kirschmer	-
L_g	Largeur de la grille	m
L_C	Longueur de la grille recouverte par la plaque	m
$L_{g,im}$	Longueur de la grille immergée	m
N_b	Nombre de barreaux	-
N_{sp}	Nombre de barres d'entretoises	-
O_b	Coefficient d'obstruction dû aux barreaux	-
O_g	Coefficient d'obstruction total	-
$O_{sp}, O_{sp,H}$	Coefficient d'obstruction dû aux entretoises par rapport à la largeur du canal et à la hauteur d'eau	-
p	Profondeur du barreau	m

Paramètres de l'écoulement

$\Delta H, \Delta H_o$	Pertes de charge dues à la grille et sans la grille	m
ω	Taux de dissipation turbulente	s^{-1}

σ_1, σ_2	Coefficients définis par Idel'cik	-
ξ	Coefficient de pertes de charge	-
ξ_{barreaux}	Coefficient de pertes de charge dues aux barreaux	-
$\xi_{\text{entretoises}}$	Coefficient de pertes de charge dues aux entretoises	-
ξ_{support}	Coefficient de pertes de charge dues au support	-
A_{AH}	Aire totale des entretoises selon Meusburger	m^2
A_{RF}	Aire totale des barreaux selon Meusburger	m^2
A_{RS}	Aire totale de la grille selon Meusburger	m^2
C_k	Degré d'immersion de la grille	-
C_L	Influence de la profondeur du barreau	-
F_r	Nombre de Froude	-
H_0, H_1	Hauteurs d'eau amont	m
H_2, H_3	Hauteurs d'eau avale	m
k	Énergie cinétique turbulente	m^2s^{-2}
K_f	Coefficient de forme du barreau	-
K_V, C_{ov}	Coefficient de colmatage de Beck et Meister	-
K_β	Coefficient de pertes de charge dues à l'angle d'inclinaison	-
K_{Berez}	Coefficient utilisé par Berez	-
K_b	Coefficient de pertes de charge par rapport à la largeur du barreau	-
K_e	Coefficient de pertes de charge par rapport à l'épaisseur des entretoises	-
$K_{P\text{-support}}$	Coefficient de forme du support profilé	-
K_{support}	Coefficient de forme du support	-
$K_{U\text{-support}}$	Coefficient de forme du support en U	-
N_{support}	Nombre de support	-
O_{support}	Coefficient d'obstruction dû au support	-
P	Degré d'obstruction de Meusburger	-
Q	Débit	m^3s^{-1}
Re_b	Nombre de Reynolds du barreau	-

R_{et}	Nombre de Reynolds turbulent	-
R_e	Nombre de Reynolds global	-
V	Ratio entre l'aire totale de la grille et l'aire de la partie colmatée de Meusburger	-
V_2	Vitesse débitante avale	ms^{-1}
V_o, V_1	Vitesses débitantes amont	ms^{-1}

Introduction

L'énergie issue de centrales hydroélectriques représente dans le monde une production qui s'élève au rang de sixième mondial des sources de production. Elle est de plus en plus encouragée dans une logique de transition énergétique verte. En Europe, la directive cadre (2009/28/CE) appelée également Directive EnR (Énergie Renouvelable) a pour objectif une part d'énergie renouvelable, dont l'hydroélectricité, atteignant 20% de la production en l'année 2020. En France, ces centrales hydroélectriques (au nombre de 2300 pour les petites centrales selon France Hydro Electricité) et plus largement les seuils (recensés à 70 000 en 2013 par le référentiel des obstacles à l'écoulement sur les cours d'eau) ont mené à la dégradation des cours d'eau et des habitats aquatiques et à des difficultés de passage des sédiments et des poissons migrateurs. En raison de ces impacts, une deuxième directive cadre sur l'eau (2000/60/EC) a été instaurée pour notamment prévenir toute dégradation supplémentaire, préserver et améliorer l'état des écosystèmes aquatiques (article 1). La préservation du bon état du cours d'eau englobe la restauration de la continuité écologique (article 4 et annexe 5).

La conciliation de la problématique de production hydroélectrique et de continuité écologique est un besoin et un des objectifs du projet «Fishfriendly Innovative Technologies for Hydropower» (FITHydro) du programme Horizon 2020 EU Research and Innovation program. Le principal dessein de FITHydro est de promouvoir le développement de technologies pour une exploitation durable et respectueuse des poissons dans les centrales hydroélectriques en Europe. Le laboratoire Pprime est un des partenaires d'une équipe de recherche interdisciplinaire composée de divers instituts et participants européens. Cette thèse s'inscrit donc dans le cadre de ce projet et plus précisément dans l'étude des grilles de prises d'eau ichtyocompatibles. Ce type de solution vise à protéger les poissons lors de la migration vers l'aval.

A ce propos, plusieurs dispositifs ont été aménagés dans les centrales hydroélectriques afin d'assurer la dévalaison des poissons. En France, les bases de conception et de dimensionnement de ces dispositifs, dénommés "prises d'eau ichtyocompatibles", ont été définies

en 2008 par Courret & Larinier à partir des retours d'expérience acquis en France et à l'étranger.

Pour les petites centrales d'un débit allant jusqu'à $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, des études hydrauliques sur modèle réduit ont ensuite permis de confirmer ou préciser certains critères concernant l'implantation des plans de grille et la conception des exutoires et de produire des formules d'évaluation des pertes de charge adaptées à ces configurations (Raynal, 2013). Diverses configurations de grilles ont été proposées (orientée, inclinée) avec des arrangements de barreaux différents. L'étude a permis aussi de confirmer les critères proposés par l'Office Français de la Biodiversité sur l'espacement entre les barreaux et les angles d'inclinaison ou d'orientation des grilles. Des essais expérimentaux ont ensuite permis d'analyser l'écoulement en fonction du nombre et de l'emplacement des exutoires. Néanmoins, quelques perspectives ont découlé de ce travail.

Cette thèse vient donc dans un premier temps compléter ce travail et dans un deuxième temps explorer de nouveaux concepts de grilles ichtyocompatibles qui minimisent les pertes de charges pour les producteurs et qui sont adaptées à la dévalaison des poissons. Dans le premier chapitre, un état de l'art de l'ensemble des solutions existantes et des travaux précédents effectués autour des grilles en particulier est dressé. Le second chapitre introduit les équations de la mécanique des fluides dans le cadre d'un écoulement à surface libre et le choix des échelles ainsi que les outils expérimentaux et numériques qui ont été employés dans le laboratoire et in situ, durant cette thèse. Le troisième chapitre aborde les grilles inclinées. Ces grilles ont été étudiées en laboratoire par Raynal et al. (2013a) puis implémentées dans les centrales hydroélectriques en France avec succès selon Tomanova et al. (2018). Cependant, l'étude réalisée durant cette thèse concerne l'amélioration et l'optimisation de ces grilles. Dans ce sens, le barreau, constituant essentiel de la grille, est testé pour différentes formes puis les pertes de charge associées sont modélisées. La présence de structures de maintien derrière la grille provoque des pertes d'énergie supplémentaires. Nous avons donc mesuré et modélisé la perte générée par ces structures et proposé de la réduire avec une structure profilée. L'influence des différents éléments sur les champs de vitesse est étudiée numériquement en amont et en aval des grilles. Parallèlement, la grille implantée dans la centrale de Las Rives, sur la rivière Ariège, a fait l'objet de mesures in situ dans le but de valider la courantologie en amont de celle-ci ainsi que les préconisations faites par l'OFB. Ces mesures sont ensuite comparées à un modèle numérique en trois dimensions de la centrale, destiné au développement d'outils de prédiction. Dans le dernier chapitre, de nouvelles solutions de barrières physiques sont présentées. Les solutions testées dans le cadre de cette thèse sont les grilles orientées à barreaux horizontaux et les plaques perforées. Ces alternatives sont peu élaborées en France par manque de connaissance et sont rarement implémentées. L'objectif est de prédire la perte de charge au travers

de ces dispositifs et de caractériser les vitesses en amont et en aval de ces structures pour ensuite voir comment elles peuvent être installées avec des exutoires et si elles respectent les critères proposés par Courret et Larinier (2008). Enfin, une conclusion générale présentant les analyses des résultats obtenus au cours de cette thèse ainsi que les perspectives possibles sont présentées.

Etat de l'art

Sommaire

1.1 L'ichtyologie	5
1.2 La migration des poissons	6
1.3 Les solutions pour la dévalaison des poissons	7
1.3.1 Les barrières physiques	7
1.3.2 Les barrières comportementales (mécaniques)	9
1.3.3 Les barrières comportementales (sensorielles)	11
1.3.4 La collecte et le transport	11
1.3.5 Les turbines ichtyocompatibles	12
1.3.6 L'arrêt ciblé des turbines	12
1.4 Les grilles ichtyocompatibles à faible espacement entre les barreaux	13
1.4.1 Définition des critères ichtyocompatibles	13
1.4.2 Pertes de charges	14
1.4.3 Les grilles inclinées	16
1.4.4 Les grilles orientées	23
1.4.5 Simulations numériques des grilles ichtyocompatibles	32
1.5 Bilan	32

1.1 L'ichtyologie

L'ichtyologie du grec «étude des poissons» naît avec Aristote (384-322 av. J.-C.) avec la publication de son ouvrage « Histoire des animaux » vers 343 av. J.-C. Ce savoir est approfondi des millénaires plus tard avec Petri Artedi (1705-1735) dans les ouvrages «Bibliotheca Ichthyologica» et «Philosophia Ichthyologia», qui font l'apologie de la vie des espèces aquatiques. Nous y retrouvons notamment la description détaillée des espèces de poissons et leurs synonymes ainsi qu'un système de classification inédit utilisé par la suite par d'autres scientifiques tel que Carolus Linnæus. L'étude de la migration des poissons

vient seulement au XX siècle, avec les travaux de Meek en 1916, dans la mesure où les travaux précédents ne concernent que la classification et l'identification des poissons. Depuis, plusieurs auteurs, notamment : Roule (1933), Hasler (1966), Harden Jones (1968), Nakamura (1969), McCleave et al. (1984), McKeown (1984), McDowal (1988) et Lucas et Baras (2001) ont proposé des recherches sur le sujet avec plusieurs points de vue sur la nature migratoire du poisson. Cela est détaillé dans l'ouvrage de Morais et Daverat (2016).

1.2 La migration des poissons

La migration constitue un déplacement nécessaire pour rejoindre les habitats propices aux différentes étapes du cycle de vie des poissons (Havn et al., 2020). Elle peut être effectuée dans un seul milieu, en mer elle est dite océanodrome, en eau douce elle est dite potamodrome, et dans les deux elle est dite diadrome. La diadromie est la capacité de certaines espèces à vivre tantôt dans l'eau douce, tantôt dans l'eau salée, afin de se reproduire dans un habitat et de se développer dans l'autre habitat (Gross, Coleman et McDowall, 1988). Les poissons catadromes ou thalassotoques, vivent en eau douce mais naissent et se reproduisent en mer et les poissons anadromes ou potamotoques, vivent en mer mais naissent et se reproduisent en eau douce et les poissons amphidromes se déplacent dans les deux. Les poissons diadromes, qui migrent d'un milieu à un autre, ont souvent une valeur économique, culturelle et récréative élevée, comme les espèces de salmonidés comme le saumon atlantique (*salmo salar*), d'anguille comme l'anguille d'Europe (*Anguilla anguilla*) et d'esturgeon (*Acipenseridae*).

La dévalaison

La dévalaison est la migration des poissons de l'amont vers l'aval des cours d'eau jusqu'à la mer pour les espèces diadromes. Les poissons en question sont les juvéniles des espèces potamotoques (saumon, truite de mer, truite de lac, truite, alose), les adultes d'espèces potamotoques après la reproduction (salmonidés, alose feinte) et les adultes d'espèces thalassotoques avant la reproduction (anguille) (Travade et Larinier, 1992).

Comme le présente la Figure 1.1, pour le saumon, le frai se produit de novembre à janvier, suivi par l'éclosion des alevins en mars. Le développement des juvéniles en eau douce dure de 1 à 3 ans et c'est après cette première phase de croissance que s'effectue la descente des smolts. Pour l'anguille, le cycle de vie s'effectue par la reproduction des adultes en mer Sargasses, le transport des larves par les courants océaniques vers les côtes européennes, la métamorphose en civelles puis anguille jaune lors de la colonisation des cours d'eau et la dévalaison au stade adulte (anguille argentée).

La montaison

La montaison est la migration des poissons par la montée des cours d'eau. Les mêmes espèces citées pour la dévalaison sont concernées mais cette fois ci dans le chemin inverse. Les anguilles remontent les cours d'eau pour se développer et les saumons pour se reproduire (Figure 1.1).

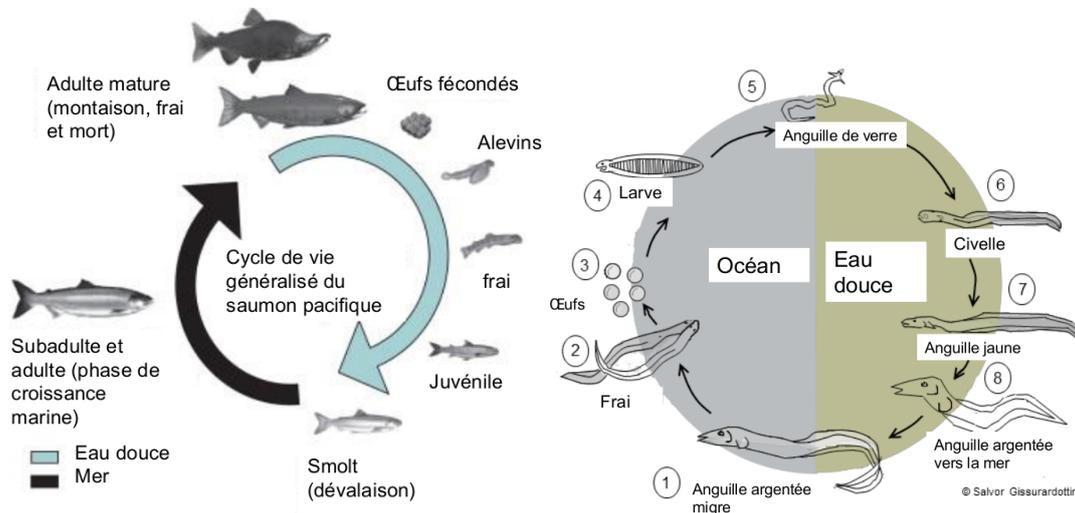


FIGURE 1.1 – Cycle de migration du saumon à gauche adapté de Cooke, Crossin et Hinch (2011) de l'anguille à droite adapté de Béguer-pon et Dodson (2015).

1.3 Les solutions pour la dévalaison des poissons

La dévalaison des poissons est sujette à des difficultés suite aux aménagements anthropiques des cours d'eau (centrales hydroélectriques et barrages). En effet, cette problématique impacte au stade juvénile et/ou adulte les populations de poissons. La migration peut être retardée et une mortalité accrue peut être engendrée par plusieurs contraintes au niveau des centrales hydroélectriques suite au passage des poissons par les turbines. Parmi ces causes, il y a les accélérations brutales, les gradients de vitesse et de cisaillement, les variations brutales de pression (dépressions en sortie de roue), la cavitation et les risques de chocs contre les parties fixes ou mobiles de la turbine mais aussi la désorientation du poisson et sa prédation. De multiples solutions pour assurer la dévalaison ont été adaptées dans les centrales (Ebel, 2013 ; Schwevers et Adam, 2020). Les solutions et technologies les plus utilisées sont décrites dans le Tableau 1.1 et vont être détaillées par la suite.

1.3.1 Les barrières physiques

Les barrières physiques initialement installées devant les prises d'eau, étaient destinées à éviter l'intrusion de débris et ainsi assurer le bon fonctionnement de la turbine

TABLEAU 1.1 – Classification des différentes solutions pour la dévalaison des poissons.

Type	Solution
Barrières physiques	Grille "Eicher"
	Grille à fils métallique
	Grille immergée
Barrières physiques ou comportementales	Grille inclinée à faible espacement
	Grille orientée à faible espacement
Barrières comportementales (mécaniques)	Plaque perforée
	Grille de type 'Louver'
	Grille de type 'Louver' avec barreaux incurvés (<i>Curved Bar Racks</i>)
Barrières comportementales (sensorielles)	Masque de surface 'Skimming walls'
	Système de dissuasion acoustique
	Système de dissuasion électrique
	Système de dissuasion visuelle
	Rideaux de chaînes suspendues
	Rideaux à bulles d'air
	Rideaux de jets d'eau
Systèmes de collection et de circulation	Barrières comportementales hybrides
	Pompe à poisson
	Conduite de collection
	Collecte et transport
Turbines ichtyocompatibles	Ecluses
	Turbine Alden
	Turbine <i>Minimum Gap Runner</i>
	Turbine Kaplan modifiée
	Turbine VLH
Opérations ichtyocompatibles	Vis d'Archimède
	Arrêt ciblé des turbines

(Schwevers et Adam, 2020). Celles ci ont été adaptées par la réduction de l'espacement entre les barreaux à de faibles valeurs pour empêcher les poissons de traverser la grille, et par la modification de leur implantation, afin de les guider vers un ou plusieurs exutoires de contournement. De ce fait, les barrières physiques doivent toujours être équipées de dispositifs assurant le nettoyage, pour en éviter le colmatage. Parmi ces barrières physiques, on trouve les grilles inclinées, c'est à dire inclinées par rapport au fond du canal et les grilles orientées, qui sont orientées par rapport aux côtés du canal. Ces grilles sont

composées de barreaux disposés de manières variées: verticalement (parallèles aux côtés du canal), ou horizontalement (parallèles au fond du canal), comme le montre la Figure 1.2. Ce type de grille a prouvé son efficacité dans plusieurs études sur des installations réelles (Calles et al., 2013 ; Tomanova, Courret et Alric, 2017 ; Tomanova et al., 2018) réduisant le taux de mortalité des poissons lors de leur passage par les centrales hydroélectriques de plus de 70%. Étant l'objet d'étude principal de cette thèse, l'état de l'art des grilles inclinées et orientées est réalisé dans la section suivante.

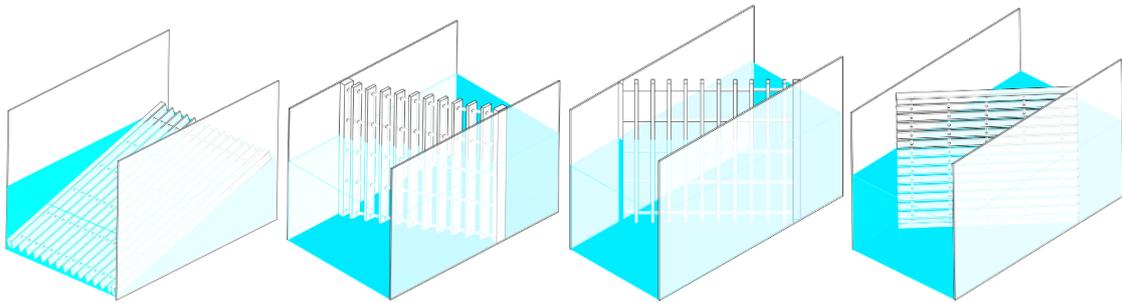


FIGURE 1.2 – Types de barrières physiques (de gauche à droite: inclinée, orientée avec barreaux verticaux modifiés dans le sens de l'écoulement, orientée avec barreaux verticaux perpendiculaires au support de la grille, orientée avec barreaux horizontaux).

1.3.2 Les barrières comportementales (mécaniques)

En fonction de l'espacement des barreaux et des espèces cibles de poisson, les grilles citées dans le dernier paragraphe peuvent être aussi considérées comme barrières comportementales. Un autre type de barrière comportementale sont les louvers (EPRI et DML, 2001). Ce type de barrière est peu employé dans les centrales hydroélectriques moyennes à grandes, d'une production de plus de 10 MW. Les louvers sont constitués de barreaux verticaux placés à un angle égal à 90° par rapport à la direction de l'écoulement comme le schématise la Figure 1.3.

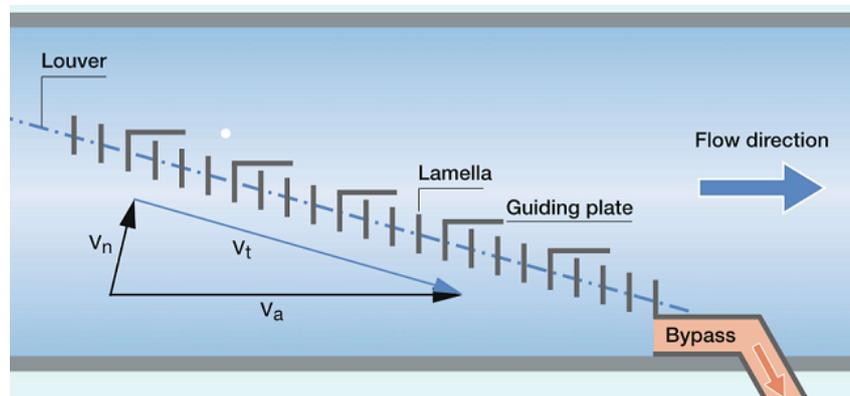


FIGURE 1.3 – Schéma du Louver (Schwevers et Adam, 2020) avec V_a la vitesse d'approche.

Ils sont placés dans un canal d'admission ou un bassin orientée d'un angle par rapport à la direction d'écoulement de 10° à 30° . Ils sont utilisés avec succès pour protéger les poissons anadromes et les guider vers un contournement sans causer de retard, d'effroi, d'épuisement ou de choc par les centrales hydroélectriques dans le nord-est des États-Unis (Amaral et al., 2003; Bates et Vinsonhaler, 1957; EPRI, 1998; Schuler et Larson, 1975; Taft et al., 1976) mais posent des problèmes d'exploitation de part une perte de charge importante et une longue structure compliquée à entretenir.

Kriewitz (2015) et Albayrak et al. (2017) ont étudié les louvers mais également des grilles orientées à barreaux modifiés par rapport à l'écoulement (Figure 1.4). Ce type d'aménagement suggère un guidage acceptable des poissons mais provoque une perte de charge conséquente et un profil de vitesse en aval asymétrique pour les turbines.

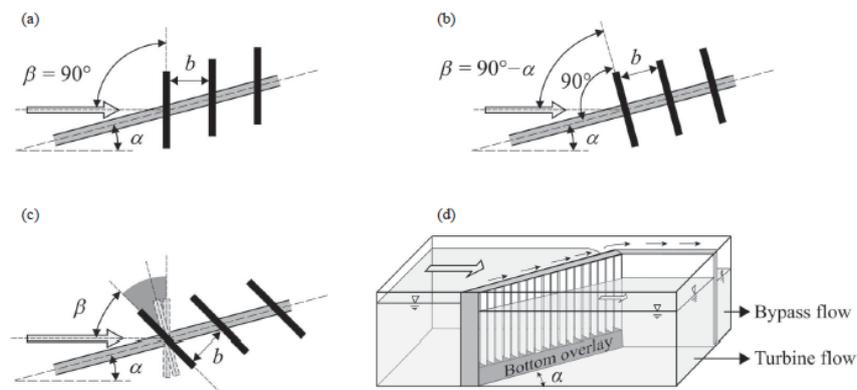


FIGURE 1.4 – Types de configurations des grilles testées par Albayrak et al. (2017) (a) louver, (b) grille orientée, (c) grille orientée à barreaux modifiés et (d) le canal testé.

Récemment, Beck et al. (2019a, 2019b) ont étudié un concept innovant de louver à barreaux incurvés *Curved Bar Racks* (Figure 1.5). Ce type de louver réduit d'un facteur 4.2 la perte de charge induite par rapport au même type de grille orientée à barreaux modifiés avec des barreaux rectangulaires et permet de conserver des profils de vitesse en aval homogènes pour les turbines.

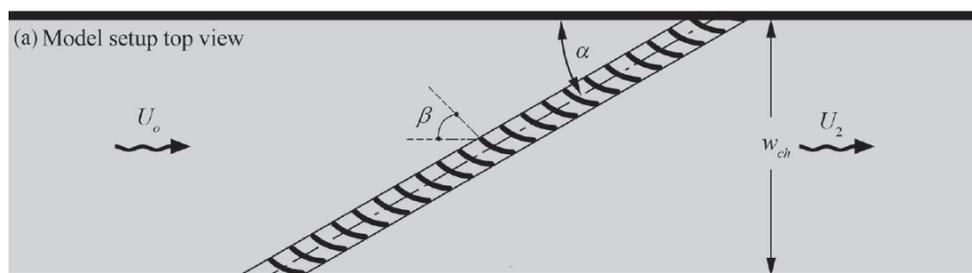


FIGURE 1.5 – Louver avec barreaux incurvés (Beck et al., 2019a).

1.3.3 Les barrières comportementales (sensorielles)

Les barrières comportementales sensorielles ont pour but de stimuler une réponse chez le poisson en les attirant ou en les guidant vers des exutoires. Le processus est tel que le poisson reçoit un stimulus (électricité, son, éclairage, etc), le localise et s'éloigne de la source du stimulus avec des mouvements non dirigés (Figure 1.6). Cependant, les barrières comportementales ne sont utilisables qu'à des vitesses d'approche très faibles, et leur efficacité réelle dépend de la perceptibilité du stimulus et de la réaction spécifique à l'espèce, d'après Schwevers et Adam (2020). Cela a été confirmé par l'étude de Beck (2020) avec une barrière électrique où l'auteur a mis en évidence l'efficacité de ce type de barrière sur les anguilles mais une efficacité moindre sur le spiralin.

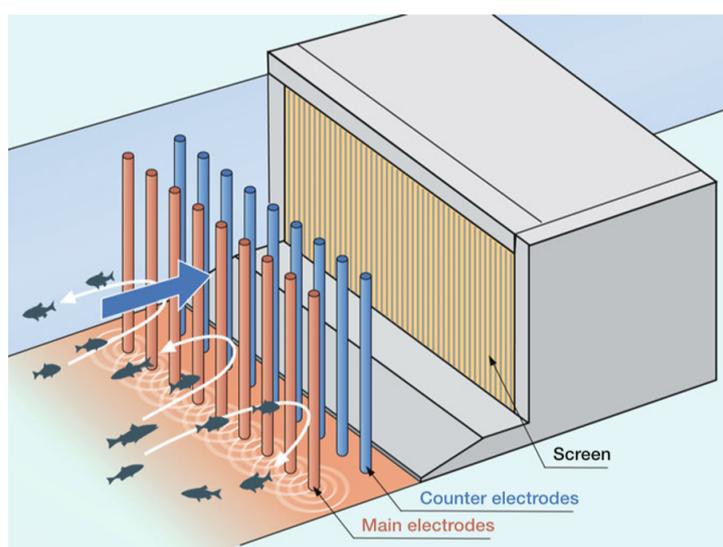


FIGURE 1.6 – Barrière comportementale électrique (Schwevers et Adam, 2020).

1.3.4 La collecte et le transport

Cette solution consiste à collecter les poissons en dévalaison en amont de la centrale hydroélectrique et à les transporter en aval. Ils sont acheminés à l'aval à l'aide de camions ou de bateaux. Ils sont ensuite relâchés dans l'eau afin qu'ils puissent continuer leur migration. Le plus grand soin doit être pris pour éviter toutes blessures aux poissons lors des procédures de capture, de maintien, de transport et de libération du poisson. La capture et le transport sont une option viable, en particulier dans le cas des chaînes de barrages, et en tant que solution provisoire tant que les installations de protection du poisson ne sont pas construites. Selon l'effort impliqué, les coûts de fonctionnement peuvent être importants. Ce type de solution est mis en œuvre exclusivement pour les espèces diadromes, à savoir les saumoneaux et les anguilles argentées (Schwevers et Adam, 2020).

1.3.5 Les turbines ichtyocompatibles

Les turbines ichtyocompatibles sont des turbines spécifiquement conçues pour limiter, voire éviter les dommages lors du passage des poissons au travers et satisfont les critères suivants: des pales longues pour maintenir un taux de variation de pression au minimum, une cavitation restreinte par des vitesses de rotation réduites, des bords d'attaque épais réduisant le risque de dommages lors d'une collision et des interstices réduits entre les parties fixes et mobiles des machines, réduisant le risque de pincement des poissons. De plus, les surfaces de toutes les parties de la construction doivent être aussi lisses que possible (Odeh, 1999). Les différents types de turbines ichtyocompatibles sont: la turbine Alden, la vis d'Archimède, la turbine VLH (*Very Low Head*) et la turbine *Minimum Gap Runner*, illustrées dans la Figure 1.7 selon leur type et année d'apparition.

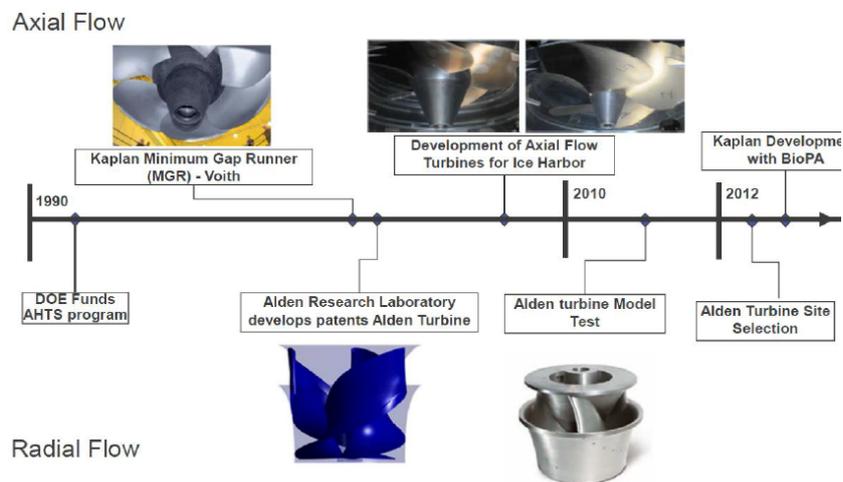


FIGURE 1.7 – Processus de développement des turbines ichtyocompatibles MGR et Alden schématisés par Voith hydro (Dewitte et David, 2018).

1.3.6 L'arrêt ciblé des turbines

L'arrêt ciblé des turbines constitue un moyen efficace pour faciliter le passage des poissons et diminuer le taux de mortalité. Cependant, cette solution est coûteuse pour l'opérateur hydroélectrique. Elle nécessite aussi une étude afin de cibler et d'anticiper les événements de migration en aval. En France, cette opération est envisagée pour les anguilles argentées (qui migrent la nuit lors des pics de flux) mais pas pour les smolts en raison de leur période de migration trop longue. Les différentes méthodes utilisées pour déterminer les événements de migration sont le biomonitor type Migromat et l'utilisation de modèle basé sur les paramètres environnementaux (débit en particulier) (Dewitte et David, 2018).

1.4 Les grilles ichtyocompatibles à faible espacement entre les barreaux

Les grilles à faible espacement entre les barreaux sont une des solutions proposées précédemment et qui font l'objet d'étude de cette thèse. Nous allons donc dans ce qui suit détailler l'état de l'art de cette solution pour les deux types de grilles: inclinées et orientées.

1.4.1 Définition des critères ichtyocompatibles

Les trois fonctions fondamentales que doit satisfaire une grille ichtyocompatible sont: l'arrêt, le guidage et le transfert des poissons (Courret et Larinier, 2008).

- L'arrêt des poissons s'opère par un espacement entre les barreaux inférieur à la largeur du poisson. Pour les smolts de saumons et les truites de mer un espacement maximal de 25 mm est préconisé et l'effet de la grille est donc comportemental. Pour les anguilles argentées et compte tenu de leur capacité à vouloir franchir la grille entre les barreaux, l'espacement maximal préconisé est baissé de 20 à 15 mm, constituant une barrière physique.
- Il s'en suit donc le guidage de ces poissons. Les vitesses d'écoulement doivent permettre aux poissons de se diriger vers les exutoires sans être plaqués sur la grille et sans fatigue. La vitesse normale V_n à la grille ne doit pas dépasser leur vitesse de croisière. Cette vitesse est définie par la décomposition de la vitesse d'approche V_a en vitesses normale V_n et tangentielle V_t comme l'explique le schéma de la Figure 1.8.

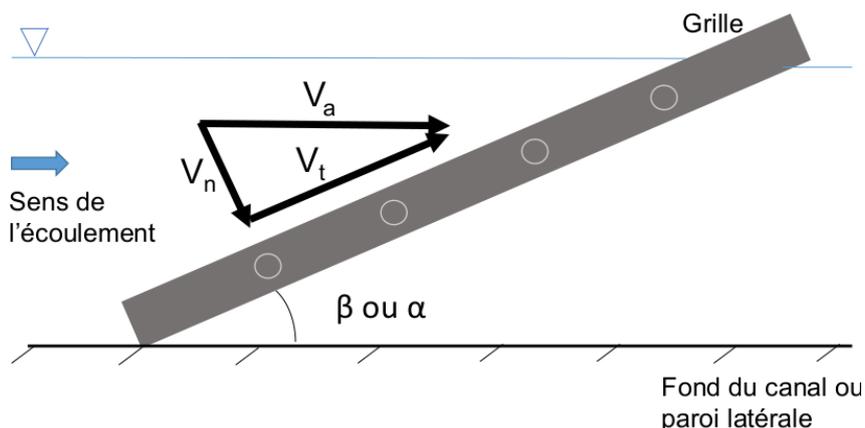


FIGURE 1.8 – Décomposition de la vitesse d'approche V_a le long de la grille en vitesse tangentielle V_t et normale V_n quelque soit l'orientation α ou l'inclinaison β de grille.

Ces vitesses sont donc fonctions de l'inclinaison (β) ou de l'orientation (α) de la grille par les projections suivantes:

$$V_n = V_a \times \cos(\alpha) \text{ (ou } \beta) \quad (1.1)$$

$$V_t = V_a \times \sin(\alpha) \text{ (ou } \beta) \quad (1.2)$$

La vitesse normale maximale V_n préconisée est de 0.5 ms^{-1} pour les juvéniles de salmonidés à partir la formule de Videler (Videler, 1993) et les anguilles à partir des observations de (Adam, Schwevers et Dumont, 1999) et de (EPRI, 2001) selon Courret et Larinier (2008).

- Conjointement au critère de la vitesse normale, le ratio des vitesses tangentielle et normale V_t/V_n doit être supérieur à 1 pour les grilles orientées afin d'inciter les poissons à aller vers le coin aval et à 2 pour les grilles inclinées afin d'inciter les poissons à changer de position dans la colonne d'eau. Cette troisième et dernière fonction a pour dessein de créer un courant tangential qui dirige le poisson vers l'exutoire (Figure 1.9).

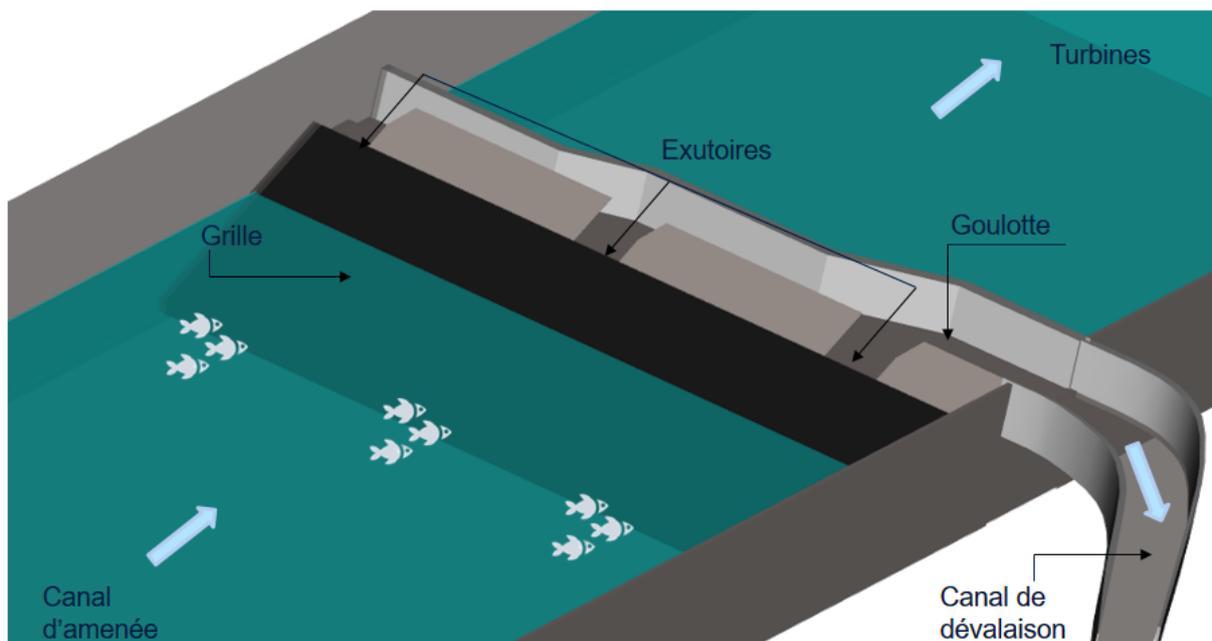


FIGURE 1.9 – Schéma d'un exemple du dispositif de dévalaison composé d'une grille inclinée, d'exutoires, d'une goulotte et d'un canal de dévalaison.

1.4.2 Pertes de charges

Les grilles ichtyocompatibles nécessitent un faible espacement entre les barreaux pour arrêter les poissons. Par conséquent, et d'un point de vue économique, ce resserrement des

barreaux induit une perte de charge considérable pour les producteurs des centrales hydroélectriques. Les pertes de charges sont des pertes d'énergie qui s'opèrent à la rencontre d'un obstacle dans un écoulement. Ces pertes proviennent de plusieurs phénomènes: turbulence, frottements, restriction, etc. Le calcul de la perte de charge se fait par le théorème de Bernoulli généralisé pour un écoulement à surface libre, incompressible et irrotationnel au travers d'une grille sur une ligne de courant schématisée dans la Figure 1.10.

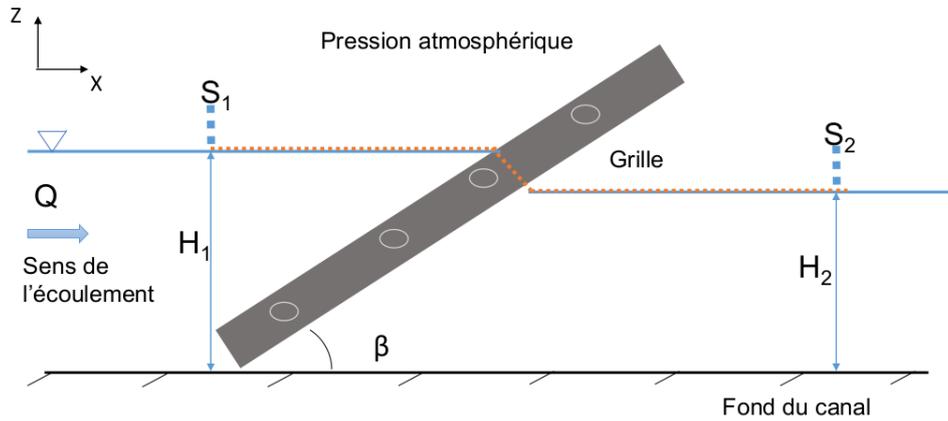


FIGURE 1.10 – Schéma explicatif de l'application du théorème de Bernoulli dans un canal à surface libre et la position des points de mesure de la hauteur d'eau en amont (S_1) et en aval (S_2) de la grille, en vue longitudinale du canal dans le plan (x, z) .

Ce théorème se traduit par l'équation suivante:

$$\frac{p_1}{\rho g} + H_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + H_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (1.3)$$

Comme la pression est atmosphérique et que les vitesses proviennent du même débit Q , on peut faire les simplifications suivantes $p_1 = p_2 = p_{atm}$; $V_1 = \frac{Q}{B \times H_1}$ et $V_2 = \frac{Q}{B \times H_2}$. L'équation 1.3 devient:

$$\Delta H = H_1 - H_2 + \frac{Q^2}{2 \times g \times B^2} \times \left(\frac{1}{H_1^2} - \frac{1}{H_2^2} \right) \quad (1.4)$$

avec ΔH (m) la perte de charge à travers la grille, H_1 (m) et H_2 (m) les hauteurs d'eau en amont et en aval de la grille, Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) le débit de l'écoulement, V_1 (m s^{-1}) et V_2 (m s^{-1}) les vitesses en amont et en aval de la grille, g (m s^{-2}) l'accélération de la pesanteur, B (m) la largeur du canal.

La perte de charge est donc identifiée par la mesure des hauteurs d'eau en amont et en aval de la grille ainsi que du débit. Par suite, la division des pertes de charges par une pression dynamique permet d'obtenir un coefficient de pertes de charge sans dimension, défini par cette équation:

$$\xi = \frac{\Delta H}{V_1^2/2g} \quad (1.5)$$

Plusieurs auteurs ont étudié ce coefficient afin de prédire les pertes de charge à travers les grilles. Parmi ces auteurs, nous trouvons Kirschmer (1926); Fellenius et Lindquist (1929); Spangler (1928); Escande (1947); Berezinski (1958); Mosonyi (1966); Zimmermann (1969) et Idel'cik (1979). Depuis, d'autres formulations ont vu le jour à partir de données expérimentales récentes avec Meusbürger (2002); Raynal (2013); Kriewitz (2015); Albayrak et al. (2017); Böttcher, Gabl et Aufleger (2019); Beck et al. (2019a, 2019b) et Meister et al. (2020a, 2020b).

1.4.3 Les grilles inclinées

Les grilles inclinées sont destinées à guider le poisson jusqu'à l'exutoire de surface. Conjointement, les exutoires dirigent les poissons vers un chenal de sortie afin qu'ils continuent leur migration. La disposition des grilles est telle qu'elles sont inclinées par rapport au fond du canal. Ce sont généralement des grilles à faible espacement afin de prévenir le passage du poisson dans la turbine. Les études hydrauliques sur ces grilles ont commencé vers les années 20. Nous allons détailler les études concernant cette configuration de grille.

Pertes de charges

Kirschmer (1926) est considéré comme le pionnier dans l'étude des pertes de charges à travers ces grilles. Il a développé la formule de coefficient de pertes de charges suivante:

$$\xi_{Kirschmer} = K_f \left(\frac{b}{e} \right)^{\frac{4}{3}} \sin\beta \quad (1.6)$$

avec K_f le coefficient de forme du barreau, b (m) l'épaisseur du barreau, e (m) l'espacement entre les barreaux et β ($^\circ$) l'angle d'inclinaison de la grille.

Puis, Berezinski (1958) a élaboré une formule avec d'autres coefficients propres pour une grille droite dont il a modélisé le terme ($\sin(\beta)$) pour prendre en compte l'inclinaison de la grille.

$$\xi_{Berezinski} = K_{Berez.1} K_{Berez.2} K_{Berez.3} \left(\frac{b}{e+b} \right)^{1.6} \sin\beta \quad (1.7)$$

avec $K_{Berez.1}$ le rapport entre la longueur de barreau et l'espacement entre les barreaux, $K_{Berez.2}$ le coefficient de forme du barreau, $K_{Berez.3}$ le coefficient du type de grille et du mode de nettoyage de la grille, b (m) l'épaisseur du barreau, e (m) l'espacement entre les barreaux et β ($^\circ$) l'angle d'inclinaison de la grille.

Meusbürger (2002) a établi une formule de pertes de charges basée sur celle de Kirschmer incluant les éléments horizontaux qui maintiennent la grille ainsi que le colmatage

sous différents aspects:

$$\xi_{Meusburger} = \xi_P \cdot k_\alpha \cdot k_V \cdot k_\beta \quad (1.8)$$

avec:

❖ $\xi_P = k_F \left(\frac{P}{1-P} \right)^{\frac{3}{2}}$: Degré d'obstruction lié au ratio P défini par $P = \frac{A_{RF} + A_{AH}}{A_{RS}}$ (-) et A_{RF} (m^2) l'aire des barreaux, A_{AH} l'aire des supports et des entretoises (m^2), A_{RS} (m^2) l'aire totale de la grille et k_F (-) le coefficient de forme des barreaux.

❖ $k_\alpha = \left(1 - \frac{\alpha}{90} \right) \cdot P^{-1.4 \tan \alpha}$: Influence de l'orientation α ($^\circ$) de l'écoulement.

❖ $k_\beta = \sin \beta$: Influence de l'inclinaison β ($^\circ$) de l'écoulement.

❖ k_V : Coefficient de colmatage, s'écrivant sous deux formes distinctes:

$k_{V1} = 1 + 5.2P^{-1.5} \left(\frac{P}{1-P} \right)^2$: Coefficient de colmatage lié au groupe 1.

$k_{V2} = 1 + 1.8P^{-1.2} \left(\frac{P}{1-P} \right)^{1.2}$: Coefficient de colmatage lié au groupe 2.

en fonction de deux groupes définis par Meusburger (2002) par les paramètres $V = \frac{A_V}{A_{RF}}$: Ratio entre l'aire totale de la grille et l'aire de la partie colmatée et N_r , comme le montre la figure 1.11.

Raynal et al. (2013a) ont proposé une nouvelle formule pour les grilles inclinées élaborée à partir d'un large panel d'essais de laboratoire. Ils ont étudié les pertes de charges sur ce type de grille pour deux formes de barreaux, sept angles d'inclinaison et quatre espacements entre les barreaux.

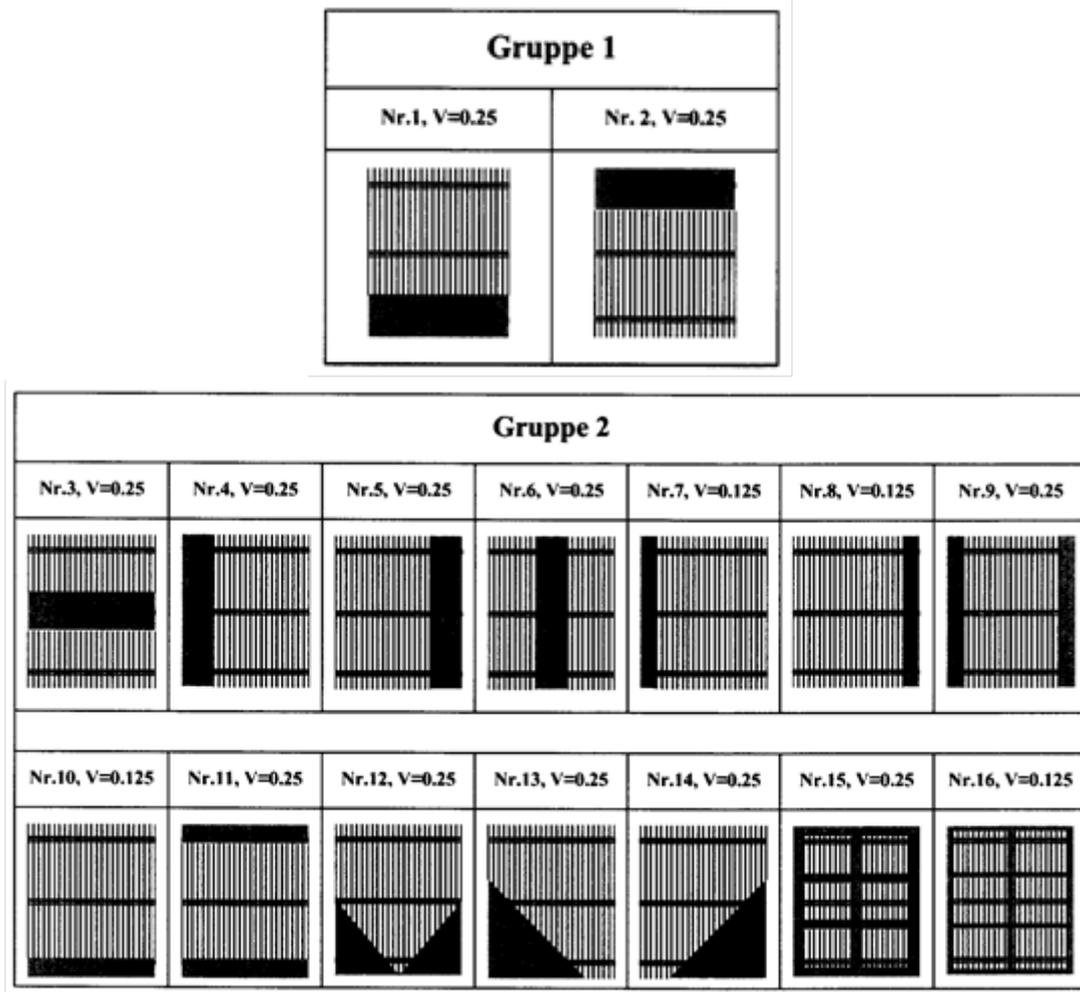


FIGURE 1.11 – Définitions des types de colmatage classés par deux groupes selon Meusbürger (2002).

Ces essais ont permis d'arriver à la formulation du coefficient de pertes de charges suivante:

$$\xi_{Raynal} = A_i \left(\frac{O_b}{1 - O_b} \right)^{1.65} \sin^2 \beta + C \left(\frac{O_{sp,H}}{1 - O_{sp,H}} \right)^{0.77} \quad (1.9)$$

avec $O_b = \frac{N_b \times b}{B}$: et : $O_{sp,H} = (1 - O_b) \frac{N_{sp} \times D_{sp}}{H_1}$

avec A_i (-) le coefficient de forme du barreau , O_b (-) le taux de blocage du aux barreaux, $O_{sp,H}$ (-) le taux de blocage du aux entretoises relativement à la hauteur d'eau amont, N_b (-) le nombre de barreaux, b (m) l'épaisseur du barreau, H_1 (m) la hauteur d'eau amont, N_{sp} (-) le nombre de barres d'entretoises, D_{sp} (m) le diamètre des entretoises, B (m) la largeur du canal, β (°) l'angle d'inclinaison et $C = 1.79$ (-) le coefficient de forme des entretoises (qui ont une forme cylindriques).

Ils ont aussi testé des plans de grille avec différents colmatages (uniforme, au sommet, au pied et aux deux en même temps). Les résultats de ces essais ont permis de modéliser

le colmatage avec le coefficient K_C présenté dans l'équation 1.10:

$$K_C = \frac{\xi_{\text{grille colmatée}}}{\xi_{\text{grille propre}}} \quad (1.10)$$

Ce coefficient dépend du degré de colmatage initial des plaques C_0 ($C_0 = 43\%$, 65% et 100%). Ensuite, le degré de colmatage final C est calculé suivant les portions de grille choisies par l'équation 1.11:

$$C = C_0 \frac{L_C}{L_{g,im}} \quad (1.11)$$

Avec $L_{g,im}$ (m) la longueur de grille immergée, L_C (m) la longueur qui est recouverte par cette plaque. Les valeurs de K_C obtenues pour les différentes configurations sont résumées dans le tableau 1.2.

TABLEAU 1.2 – Comparaison des coefficients K_C modélisant l'effet du colmatage pour différentes configurations. Les configurations GD, GI et GO représentent respectivement les grilles droites, inclinées à 25° et orientées à 45° . Toutes les grilles sont munies de barreaux rectangulaires espacés de $e = 10$ mm (Raynal, 2013).

Position sur la grille	C_0	$\frac{L_C}{L_{g,im}}$	C	K_C		
				GD	GI	GO
Uniforme sur toute la surface de grille	43%	100%	43%	4.7	3.1	2.1
	43%	100%	43%	4.0	3.6	1.9
	64%	100%	64%	11.2	5.9	4.5
Sommet	64%	18%	12%	-	1.3	-
	64%	34%	22%	-	-	1.1
	100%	10%	10%	1.4	1.5	-
	100%	24%	24%	2.9	2.4	-
	100%	33%	33%	-	4	-
Pied	64%	18%	12%	-	1.7	-
	64%	30%	19%	2.7	-	1.3
Sommet + Pied	64%	32%	20%	-	2	-
	64%	66%	42%	-	-	1.6

Le tableau 1.2 montre l'influence du colmatage à plusieurs niveaux. Premièrement, le coefficient K_C augmente en fonction du degré C . Deuxièmement, son influence dépend de la configuration de grille: la grille droite colmatée uniformément a tendance à générer plus de pertes de charges que les grilles inclinées et orientées. Troisièmement, la position du colmatage impacte les pertes de charge. Le colmatage uniforme semble le plus désavantageux. En somme, ces valeurs de K_C permettent de quantifier la part de colmatage possible sur plusieurs types de grille.

Profils de vitesse

Les grilles inclinées doivent créer un courant tangentiel favorable au déplacement du poisson le long de la colonne d'eau pour retrouver les exutoires. La vitesse normale à la grille ne doit pas dépasser 0.5 ms^{-1} et le ratio entre les vitesses tangentielle et normale doit être supérieure à 2 selon Courret et Larinier (2008). Les profils de vitesse en amont de la grille permettent de quantifier les vitesses tangentielles et normales en fonction de l'angle d'inclinaison. De même, en aval de la grille, le profil de vitesse doit être symétrique en direction des turbines pour assurer leur bon fonctionnement.

Raynal et al. (2013a) ont étudié par vélocimétrie par images de particules, la courantologie des grilles en amont et en aval pour 4 angles, 4 espacements entre les barreaux et 2 profils de barreaux représentée dans la Figure 1.12. L'étude montre que les profils sont acceptables en terme de guidage des poissons dès lors que l'angle est inférieur ou égal à 25° pour la vitesse qu'ils ont employé. Ils ont déterminé aussi que la forme du barreau, l'espacement ainsi que la hauteur d'eau n'impactent pas la nature du profil. En aval de la grille, ils ont conclu à un profil de vitesse uniforme.

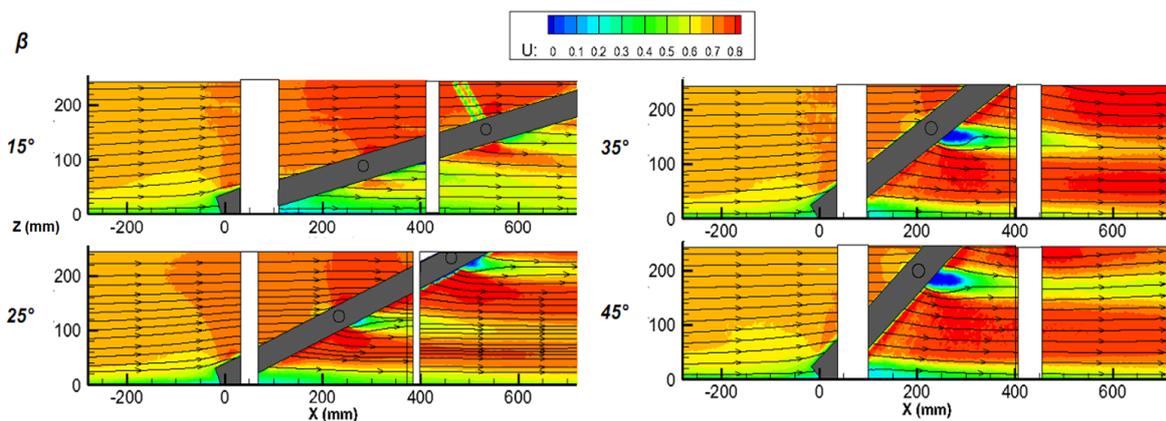


FIGURE 1.12 – Représentation des plans de vitesse sur une coupe longitudinale de la grille pour plusieurs inclinaisons de la grille ($\beta = 15^\circ$ à 45°) par Raynal et al. (2013a).

Colmatage

La première fonction des grilles dans les centrales hydroélectriques est la collecte des débris pouvant accéder aux turbines. Le colmatage est donc un phénomène attendu qui peut avoir ses répercussions sur les poissons et l'exploitation de la centrale. Dans l'objectif d'identifier et de quantifier ce phénomène, Raynal et al. (2013a) ont étudié l'influence de plusieurs types de colmatage (uniforme, au sommet de la grille, au pied de grille et les deux en même temps) sur les profils de vitesse d'une grille droite, inclinée à 25° et orientée à 45° . L'influence du colmatage pour les profils de vitesse en amont de la grille se traduit

par (Figure 1.13):

- Lorsqu'il est uniforme, une absence de variations de la vitesse.
- Lorsqu'il est irrégulier, une réduction locale des vitesses tangentielles et, surtout, normales, tout en faisant augmenter le rapport V_t/V_n .

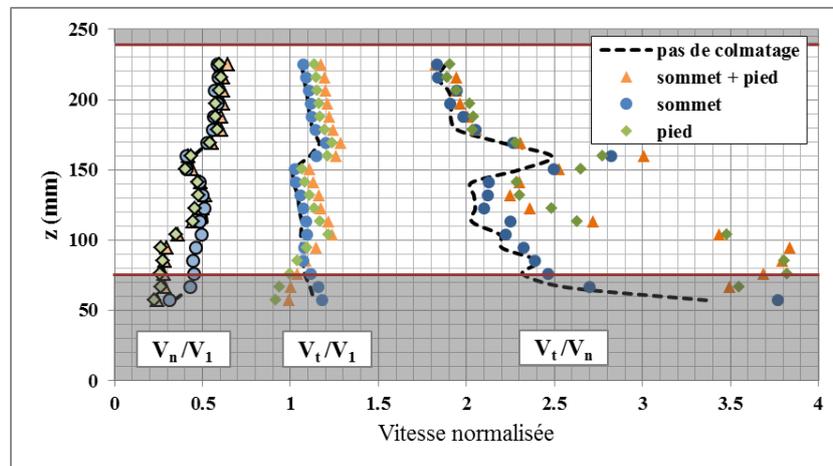


FIGURE 1.13 – Comparaison des profils de vitesses normalisées ($V_1 = 0.7\text{ms}^{-1}$ étant sa vitesse d'approche): V_n/V_1 , V_t/V_1 et V_t/V_n pour une grille inclinée ($\beta = 25^\circ$) avec et sans colmatage par Raynal (2013).

Exutoires de contournement

L'exutoire a pour fonction d'assurer le passage du poisson vers l'aval après son guidage par la grille. Dans ce contexte, deux types d'exutoires sont introduits: les exutoires de surface et les exutoires de fond. Pour le cas des grilles inclinées, les exutoires consistent en des ouvertures découpées dans le sommet de la grille et conduisant généralement à une goutte transversale afin d'évacuer vers l'aval le débit et les poissons. Ils sont de surface afin de récupérer les poissons sur la largeur du plan de grille.

Raynal (2013) a étudié la courantologie transversale au sommet des grilles inclinées par vélocimétrie par images de particules (Figure 1.14) pour plusieurs débits, hauteurs et largeurs, nombres ainsi qu'emplacements d'exutoires (en berge, au centre et les deux en même temps). Verticalement, il a montré que les exutoires n'influencent pas la répartition des vitesses le long de la grille. Ils ne l'altèrent que localement en fin de grille pour un débit jusqu'à 4% du débit turbiné. La présence d'un seul exutoire génère une zone où l'écoulement va plonger vers la grille et donc des vitesses normales importantes. Horizontalement, la mise en place d'un seul exutoire crée des zones de recirculation défavorables au poisson. Pour pallier à ce problème, au moins deux exutoires sont conseillés. De plus, la présence d'un colmatage devant les exutoires diminue leur efficacité à diriger les poissons. L'attractivité latérale a aussi été étudiée par Raynal (2013). Pour ce faire, il a défini les distances

maximales pour lesquelles l'exutoire est plus attractif en fonction de la vitesse transversale et le temps nécessaire (30 s) qu'a besoin un poisson pour atteindre un exutoire. Il a conclu que l'attractivité d'un exutoire centré est d'environ 2 m de chaque côté et que les configurations à plusieurs exutoires sont plus efficaces de 90% aux configurations à un seul exutoire dès lors que leur largeur cumulée ne dépasse pas 30% de la largeur du canal. En conséquence de cette étude, les distances maximales sont préconisées entre deux exutoires suivant les cas: environ 6 mètres entre deux exutoires en berge, environ 5 mètres entre un exutoire en berge et un exutoire non attenant à la berge, environ 4 mètres entre deux exutoires non attenants aux berges, environ 2 mètres entre 1 exutoire non attenant à la berge et une berge. Le dimensionnement de cet ouvrage est préconisée par Courret et Larinier

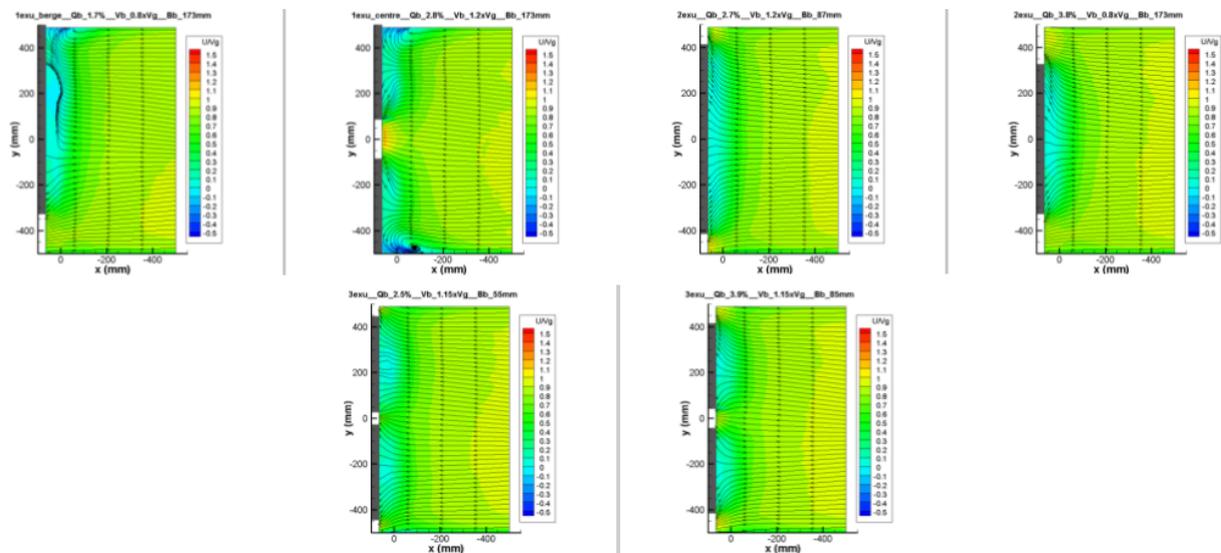


FIGURE 1.14 – Représentation de la vitesse axiale normalisée en vue de dessus dans le plan (x,y) de la courantologie en fonction du nombre d'exutoires (représentés en blanc) associés à une grille inclinée à 25° par Raynal (2013).

(2008), avec un débit de dévalaison de 2% à 10% du débit turbiné, une largeur minimale de 1.0 m, une hauteur minimale de 0.5 m, une vitesse en entrée d'exutoires équivalente à 1.1 fois la vitesse d'approche et des règles d'espacement maximal entre les exutoires (4 à 6 m) représentant 20 à 25% de celle de la prise d'eau. Dans le cas des petites prises d'eau, pour éviter que le débit alloué au dispositif de dévalaison représente un pourcentage important du débit maximal turbiné, il est préconisé que: pour les prises d'eau peu profondes (< 2.5 m), la hauteur de l'exutoire soit limitée à 20% de celle de la prise d'eau, soit par exemple 0.4 m et 0.3 m pour les prises d'eau de 2.0 m et 1.5 m de profondeur respectivement et pour les prises d'eau peu larges (< 4 m), la largeur de l'unique exutoire soit limitée à 25% de celle de la prise d'eau, soit par exemple 0.75 m et 0.5 m pour les prises d'eau de moins de 3 m et 2 m de large respectivement.

1.4.4 Les grilles orientées

Les grilles orientées sont des grilles maintenues verticales mais qui sont orientées par rapport au plan horizontal. Elles ont été développées dans les années 50, aux Etats-Unis et au Canada (Cada et Sale, 1993). La disposition des barreaux donne deux types de grilles orientées: les grilles orientées à barreaux horizontaux et les grilles orientées à barreaux verticaux.

Pertes de charges

Au niveau des pertes de charges des grilles orientées, les premières études sur les formules ont été élaborées par différents auteurs tels que Fellenius et Lindquist (1929), Escande (1947), Zimmermann (1969) et Idel'cik (1979). Ces formules sont répertoriées dans le tableau suivant:

TABLEAU 1.3 – Tableau récapitulatif des premières formules du coefficient de pertes de charges ξ des grilles orientées.

Auteur	Formule
Fellenius et Lindquist (1929)	$K_f \frac{b}{e+b}$
Escande (1947)	$\frac{1}{e+b} \left[\frac{(1-m)^2}{m^2} + \left(1 - \frac{e}{e+b}\right)^2 \right]$
Zimmermann (1969)	$3.87 \tan^{\frac{7}{4}} \alpha + K_f \left(\frac{b}{p}\right)^{\frac{4}{3}} + \frac{K_f}{\cos \alpha^3} \left[\left(\frac{b}{e}\right)^{\frac{4}{3}} - \left(\frac{b}{p}\right)^{\frac{4}{3}} \right]$
Idel'cik (1979)	$\sigma_1 \sigma_2$

Les paramètres sont définis par les auteurs par:

- ❖ K_f (-): Coefficient de forme du barreau
- ❖ m (-): Coefficient de contraction du barreau
- ❖ b (m): Épaisseur du barreau
- ❖ e (m): Espacement entre les barreaux
- ❖ p (m): Profondeur entre les barreaux
- ❖ α (°): Orientation de la grille
- ❖ σ_1 et σ_2 (-): Coefficients définis dans les abaques d'Idel'cik.

Spangler (1928) a établi des abaques pour déterminer le coefficient de pertes de charges. Fellenius et Lindquist (1929), ont déterminé leur formule in situ. Escande (1947) a quant à lui inclus les aspects physiques tels que la contraction de l'écoulement et les décollements. Mosonyi (1966) a intégré à la formule de Kirschmer l'orientation de l'écoulement. Zimmermann (1969) et Idel'cik (1979) proposent d'autres formulations. Récemment, de nouvelles

études ont proposé d'autres formulations répertoriées dans le tableau 1.4 selon les configurations des grilles sans colmatage.

TABLEAU 1.4 – Tableau récapitulatif des récentes formules du coefficient de pertes de charges ξ des grilles orientées propres.

Auteur	Formule
Meusburger (2002)	$K_f \left(\frac{O_g}{1-O_g} \right)^{\frac{3}{2}} \sin \alpha$
Raynal et al. (2013b)	$K_f \left(\frac{O_g}{1-O_g} \right)^{1.6} \left(1 + K_f \left(\frac{90-\alpha}{90} \right)^{2.35} \left(\frac{1-O_g}{O_g} \right)^3 \right)$
Raynal et al. (2014)	$K_f \left(\frac{O_g}{1-O_g} \right)^{1.6}$ (barreaux dans le sens de l'écoulement)
Albayrak et al. (2017)	$K_f \xi_{\alpha, O_g} \xi_{\gamma, O_g} C_L C_k$
Albayrak, Maager et Boes (2019)	$K_f \left(\frac{O_g}{1-O_g} \right)^{1.8} 1.8 \sin^{1.7}(\alpha) C_L$
Beck et al. (2019a)	
Böttcher, Gabl et Aufleger (2019)	$K_f \left(\frac{O_g}{1-O_g} \right)^{k_1} \sin^{k_2}(\alpha)$
Meister et al. (2020a)	$K_f \frac{O_g}{(1-O_g)} \sin^{\frac{2}{3}}(\alpha) 0.04(C_L - 7.5) \left(\frac{90-\alpha}{60} \right) + 1$

Avec les paramètres définis par les auteurs:

- ❖ K_f (-): Coefficient de forme des barreaux
- ❖ O_g (-): Degré d'obstruction
- ❖ α (°): Orientation de l'écoulement
- ❖ C_L (-): Influence de la profondeur du barreau
- ❖ C_k (-): Degré d'immersion de la grille

Selon les auteurs, ces formules dépendent des paramètres hydrauliques, de l'espacement entre les barreaux ainsi que de la forme des barreaux. De multiples différences dans les approches liées aux formulations peuvent être révélées selon les paramètres considérés: les formules de Raynal et al. (2014, 2013b) se concentrent sur les grilles à faible espacement entre les barreaux disposés verticalement et dans le sens de l'écoulement; Albayrak et al. (2017) proposent une autre formulation pour de plus grands espacements qui inclut les louvers et les barreaux modifiés. Albayrak, Maager et Boes (2019) et Böttcher, Gabl et Aufleger (2019) et Meister et al. (2020a) ont proposé des modélisations de grilles orientées à barreaux disposés horizontalement. Beck et al. (2019a) ont étudié de nouveaux types de barreaux incurvés *Curved Bar Racks*.

En somme, ces formules s'accordent sur la représentation de la partie obstruée par la fraction $\frac{O_g}{1-O_g}$ avec des puissances proches et se différencient par le terme lié à la projection de l'angle d'orientation ainsi que les valeurs du coefficient de forme du barreau K_f . Cer-

tains combinent aussi d'autres termes liés à la profondeur du barreau et à l'immersion de la grille dans l'eau.

Certains de ces auteurs ont aussi modélisé le colmatage des grilles orientées. Albayrak, Maager et Boes (2019) ont proposé pour les grilles orientées à barreaux horizontaux le coefficient de colmatage suivant inspiré de la formule de Meusburger (2002) introduit dans la section précédente:

$$\begin{aligned}
 K_{V,1} &= (0.25P^{-3} + 2.12) \left(\frac{V}{1-V} \right)^{4/3} \text{ colmatage en haut de grille} & (1.12) \\
 K_{V,2} &= (0.65P^{-2} + 1.60) \left(\frac{V}{1-V} \right)^{4/3} \text{ colmatage en haut et en bas de la grille} \\
 K_{V,3} &= (0.005P^{-6} + 7.14) \left(\frac{V}{1-V} \right)^{4/3} \text{ colmatage en bas de grille}
 \end{aligned}$$

Beck et al. (2019a) ont proposé une autre formule de colmatage pour les grilles orientées à barreaux incurvés (*Curved Bar Racks*):

$$K_{V,1} = \left[10 \left(\frac{90}{\beta} \right) \left(\frac{V}{1-V} \right)^{4.3\sigma^{0.75(\alpha/90)}} \right] - 5.3 \left(\frac{V}{1-V} \right)^{1.7} \text{ colmatage en haut ou en bas de grille} \quad (1.13)$$

$$K_{V,2} = \left[7 \left(\frac{90}{\beta} \right) \left(\frac{V}{1-V} \right)^{9.5\sigma^{1.2(\alpha/90)}} \right] - 1.5 \left(\frac{V}{1-V} \right)^{1.4} \text{ colmatage en haut et en bas de grille}$$

Plus récemment, Meister et al. (2020a) ont établi une formule pour le colmatage des grilles orientées à barreaux horizontaux selon la forme des barreaux qu'ils ont testé:

$$C_{Ov} = 1 + C_{OL} \left(\frac{1}{2} BR^{-2} + 7.4 \sin^2 \alpha C_S^{-0.8} \right) \left(\frac{H_{Ov}}{1-H_{Ov}} \right)^{4/3} \quad (1.14)$$

avec $C_{OL} = 1$ pour un colmatage en haut ou en bas de grille et $C_{OL} = 0.9$ pour un colmatage en haut et en bas de grille.

Ces études ont permis de modéliser les pertes de charges mais selon des paramètres différents qui situent l'étendue de l'application de chacune. Les principaux facteurs qui classifient la gamme d'utilisation sont: la configuration de la grille: grille inclinée, grille orientée avec barreaux verticaux (disposés perpendiculairement au support de la grille ou dans le sens de l'écoulement), grille orientée à barreaux horizontaux; l'angle d'inclinaison ou d'orientation; le rapport entre l'espacement entre les barreaux et l'épaisseur du barreau (e/b) et la forme des barreaux. Ces études sont répertoriées dans le tableau 1.5.

Les configurations sont définies de la façon suivante:

- ❖ GI: Grille inclinée
- ❖ GO: Grille orientée à barreaux verticaux
- ❖ GHO: Grille orientée à barreaux horizontaux

TABLEAU 1.5 – Tableau récapitulatif des différentes études sur les formules de pertes de charges des grilles ichtyocompatibles. (Rec: rectangulaire, Hyd: hydrodynamique)

Auteur	Config.	Angles (°)	e/b (-)	Forme des barreaux
Meusburger (2002)	GI, GO	60 à 90	1 à 9	Rec
Raynal et al. (2013a)	GI	15 à 90	1 à 3	Rec et Hyd
Raynal et al. (2013b)	GO	30 à 90	1 à 3	Rec et Hyd
Raynal et al. (2014)	GO	30 à 60	1 à 3	Rec et Hyd
Albayrak et al. (2017)	GO	15 à 45	5 à 23	Rec, rond+plat
Albayrak, Maager et Boes (2019)	GHO	30, 45	1 à 3	Rec, rond+plat
Beck et al. (2019a)	GO	15 à 45	5 à 23	<i>Curved bar racks</i>
Böttcher, Gabl et Aufleger (2019)	GHO	20 à 90	1 à 3	circulaire (flexible et rigide)
Meister et al. (2020a)	GHO	30, 45	1.25 à 3.75	Rec, rond+plat, forme de feuille, ellipsoïdal

Profils de vitesse

Les profils de vitesse en amont de la grille doivent respecter les critères ichtyocompatibles. Parmi ces critères, une vitesse normale inférieure ou égale à 0.5 ms^{-1} et un ratio entre les vitesses tangentielle et normale supérieur ou égal à 1. En aval de la grille, l'écoulement nécessite d'être homogène pour l'admission des turbines.

Raynal et al. (2013b) ont étudié les profils de vitesse en amont des grilles orientées, propres et colmatées, avec des barreaux perpendiculaires au support de la grille (notée PB: *Perpendicular Bars*) ou avec des barreaux dans le sens de l'écoulement (notée SB: *Streamwise Bars*) représentés dans la Figure 1.15, pour trois angles (30° , 45° , 60°), deux formes de barreaux et trois espacements entre les barreaux.

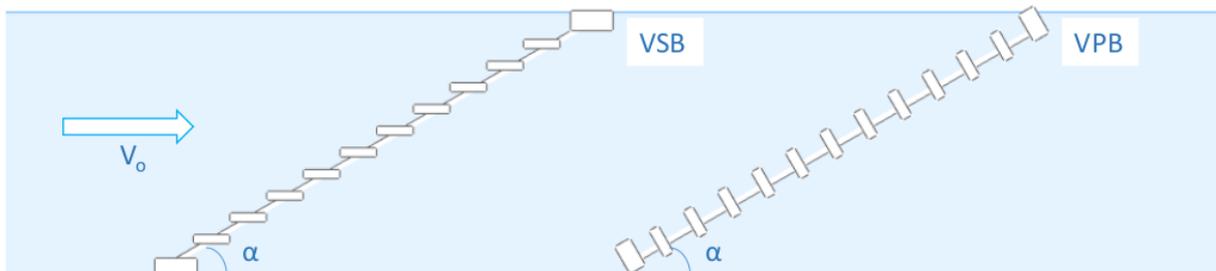


FIGURE 1.15 – Représentation des configurations de barreaux des grilles orientées testées par Raynal (2013) : à droite les barreaux perpendiculaire à l'axe de la grille (VPB) et à gauche les barreaux placés dans le sens de l'écoulement (VSB).

Ils ont comparé les profils de vitesse mesurés en amont le long de la grille à 50 mm. Les profils de la vitesse axiale des grilles SB se superposent en fonction de l'angle, de l'espacement et de la forme du barreau (Figure 1.16). Pour les grilles PB, les profils augmentent en fonction de l'angle. Les deux types de grilles coincident sur le fait que la vitesse normale en amont est inférieure à 0.5 ms^{-1} . Le ratio entre la vitesse tangentielle et normale dépend de l'angle pour les deux types de grilles et n'est supérieur à 1 que quand l'orientation de la grille est inférieure à 45° . En aval, la grille PB suggère un profil asymétrique, tandis que la grille SB propose un profil quasi-symétrique admissible pour les turbiniers.

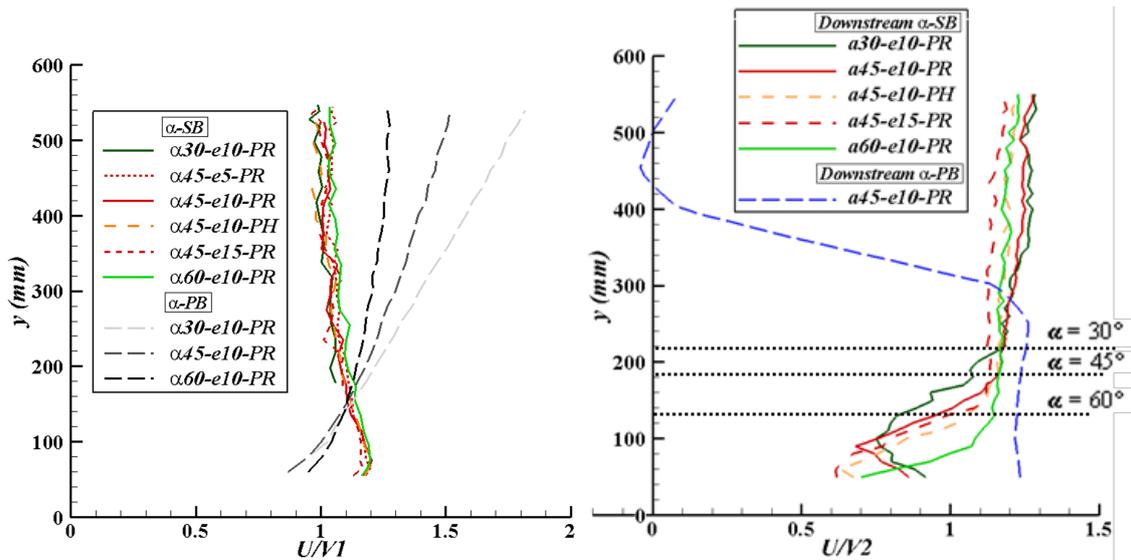


FIGURE 1.16 – Comparaison des vitesses axiales normalisées par Raynal et al. (2014) pour les deux configurations de grilles orientées pour différents angles d'orientations ($\alpha=30^\circ$ à 60°) avec V_1 la vitesse en amont et V_2 la vitesse en aval.

Beck et al. (2019b) ont exploré les profils de vitesse en amont et en aval des grilles orientées à barreaux incurvés pour différents angles d'orientation ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ et $\beta = 45^\circ$ et 90°) et un espacement entre les barreaux égal à 25 mm, représentés dans la Figure 1.17.

Les grilles orientées à barreaux incurvés donnent selon la Figure 1.18 des vitesses normales acceptables pour un angle α inférieur à 45° et un angle β inférieur à 90° et un espacement entre les barreaux de 25 mm pour une large gamme de vitesse. La symétrie de l'écoulement à l'aval de la grille, est aussi plus établie que pour les grilles orientées à barreaux modifiés et des louvers étudiés par Kriewitz (2015).

Meister et al. (2020b) ont exploré les champs de vitesse des grilles orientées à barreaux horizontaux pour des angles de $30^\circ, 45^\circ$ et 90° , des espacements entre les barreaux de 10 mm, 20 mm, et 30 mm et différentes formes de barreaux schématisées dans la Figure 1.19.

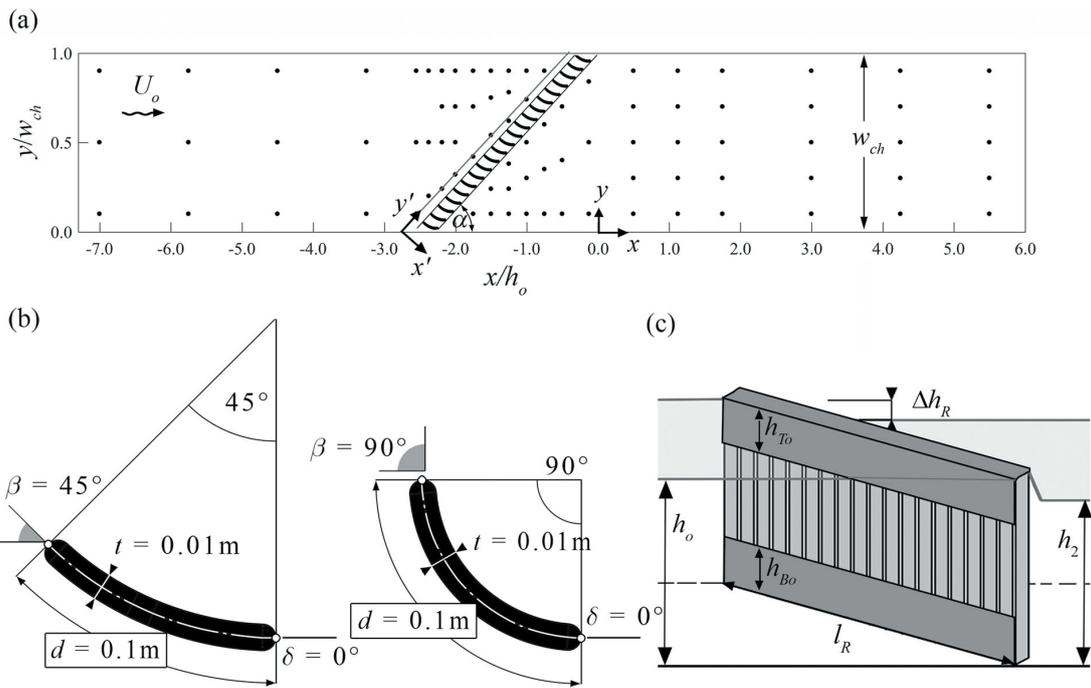


FIGURE 1.17 – Schéma et dimensions des barreaux incurvés proposés par Beck et al. (2019a).

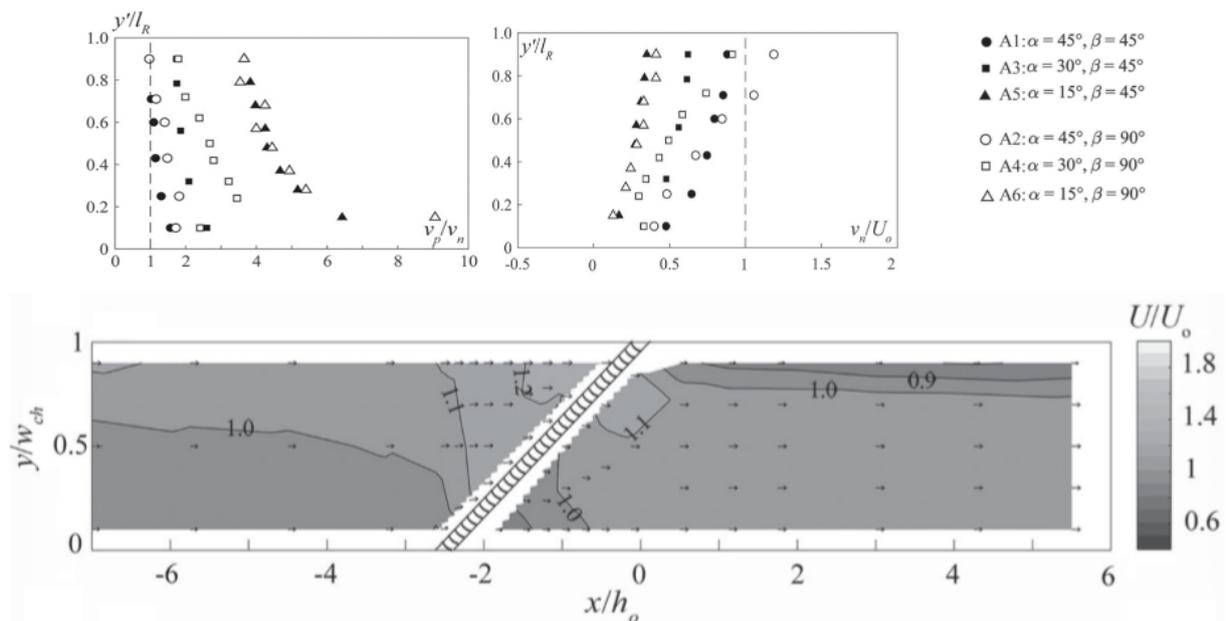


FIGURE 1.18 – Représentation du ratio des vitesses tangentielle et normale, de la vitesse normale adimensionnée et de la vitesse axiale adimensionnée des différentes configurations de grilles testées par Beck et al. (2019b).

Cette étude conclut à une invariance de l'écoulement en amont de la grille en fonction de la forme du barreau et de l'espacement entre les barreaux. Les critères ichtyocompatibles sont validées pour un angle inférieur ou égal à 45° . Il propose un calcul du ratio entre la vitesse tangentielle et normale, égal à $\frac{1}{\tan\alpha}$, qui donne une approximation vérifiant

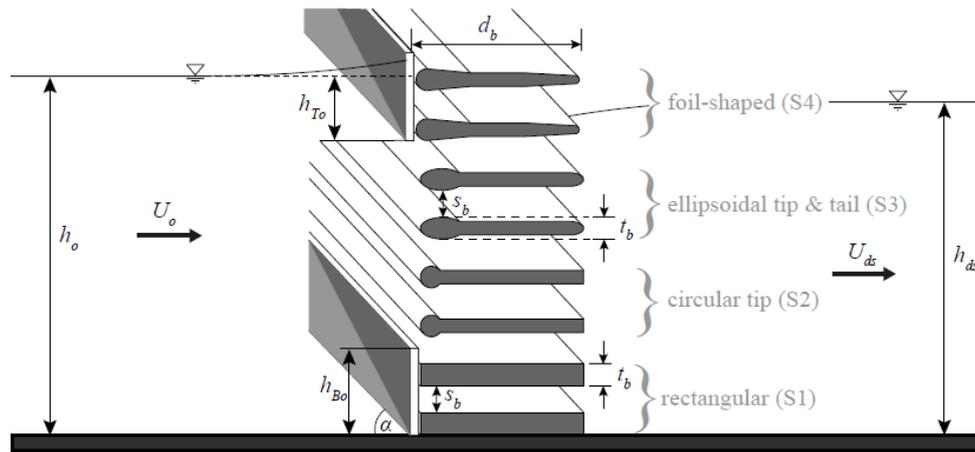


FIGURE 1.19 – Schéma des barreaux testés par Meister et al. (2020a).

l'ichtyocompatibilité de la grille et qui a été également proposé par Raynal et al. (2014).

La littérature sur l'étude des champs de vitesse est résumée dans le tableau 1.6.

TABLEAU 1.6 – Tableau récapitulatif des différentes études sur les champs de vitesses de grilles ichtyocompatibles. (Rec: rectangulaire, Hyd: hydrodynamique)

Auteur	Config.	Angles (°)	e/b (-)	Forme des barreaux
Chatellier et al. (2011)	GO	30, 45	2 à 5	Rec, Hyd
Raynal et al. (2013a)	GI	15 à 90	1 à 3	Rec, Hyd
Raynal et al. (2013b)	GO	30 à 60	1 à 3	Rec, Hyd
Raynal et al. (2014)	GO	30 à 60	1 à 3	Rec, Hyd
Albayrak et al. (2017) et Kriewitz (2015)	GO, lou-ver	15, 30, 45	5 à 23	Rec, rond+plat
Szabo-Meszaros et al. (2018)	GO, GHO	30, 45	1.87	Rec, Hyd
Bie, Peirson et Kemp (2018)	GO, GHO	30	2	triangulaire
Berger (2018)	GHO	30 à 70	1.25 à 3.75	Rec
Beck et al. (2019b)	GO	15, 30, 45	6	incurvés
Meister et al. (2020b)	GHO	30, 45	2 à 3.75	Rec, rond+plat, forme de feuille, ellipsoïdal

Colmatage

Raynal (2013) a étudié l'effet d'un colmatage uniforme et d'un colmatage en haut et en bas sur les profils des grilles orientées. Les deux types de colmatage n'interfèrent pas dans l'ichtyocompatibilité des grilles (Figure 1.20).

Beck et al. (2019b) ont étudié le colmatage sur les grilles CBR. Le colmatage, en haut et/ou en bas de la grille, améliore les champs de vitesse en amont des grilles permettant le guidage des poissons et des débris vers les exutoires mais diminue la qualité des profils en aval en direction des turbines (Figure 1.21).

Meister et al. (2020b) ont aussi observé l'effet du colmatage sur les grilles orientées à barreaux horizontaux. Ils ont souligné les mêmes effets que Beck et al. (2019b) en amont de la grille, c'est à dire une amélioration des conditions de l'écoulement pour le poisson mais en aval un profil asymétrique (Figure 1.22).

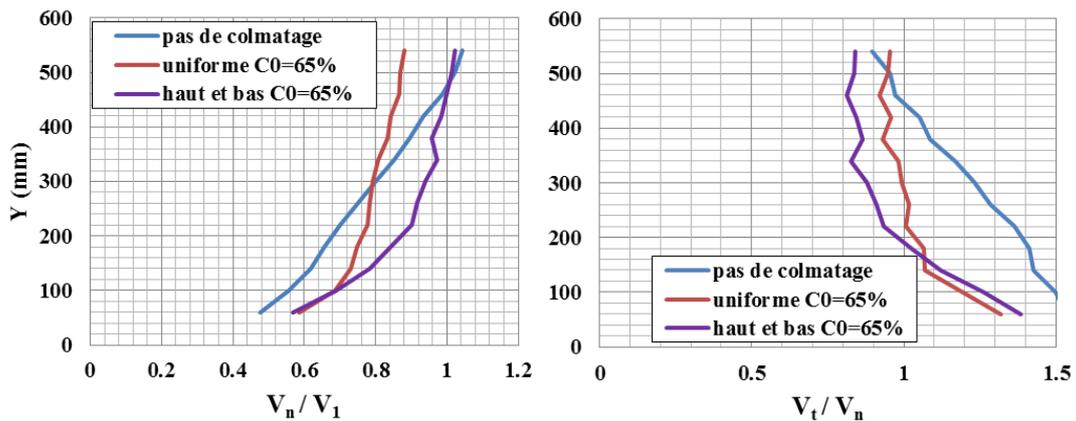


FIGURE 1.20 – Comparaison des profils de vitesse normale adimensionnée et du ratio des vitesses tangentielle et normale avec et sans colmatage des grilles orientées réalisés par Demel (2012)

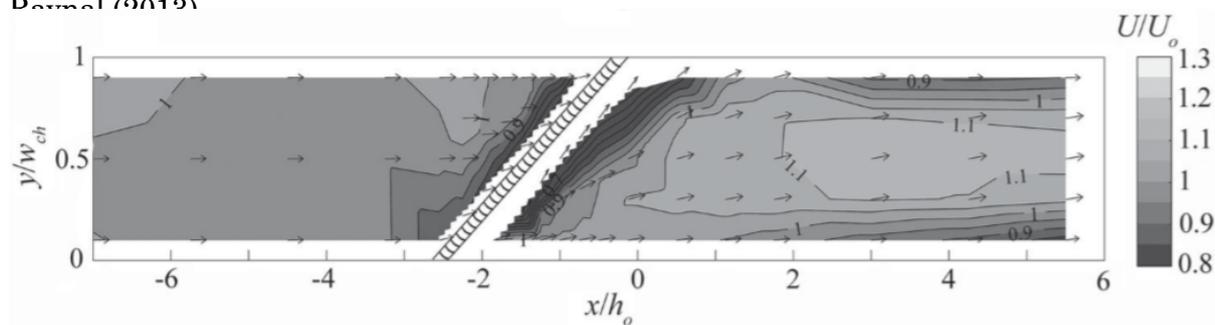


FIGURE 1.21 – Représentation de la vitesse axiale adimensionnée sur une grille de type *Curved Bar Racks* colmatée réalisée par Beck et al. (2019b).

Exutoires de contournement

Les exutoires de contournement pour les grilles orientées se décomposent en deux catégories: les exutoires de surface et les exutoires de fond. Raynal (2013) a étudié les exutoires de surface placés en trois positions (dans le prolongement de la grille, perpendiculaire au canal et aligné avec le canal). Il a constaté que l'écoulement devant la grille reste inchangé et l'attractivité latérale n'est pas marquée. Ces types de configurations n'assurent pas le critère ichtyocompatible: le ratio de la vitesse tangentielle et normale est inférieure à 1 et peuvent résulter donc à un placage du poisson. Verticalement, l'attractivité est très faible

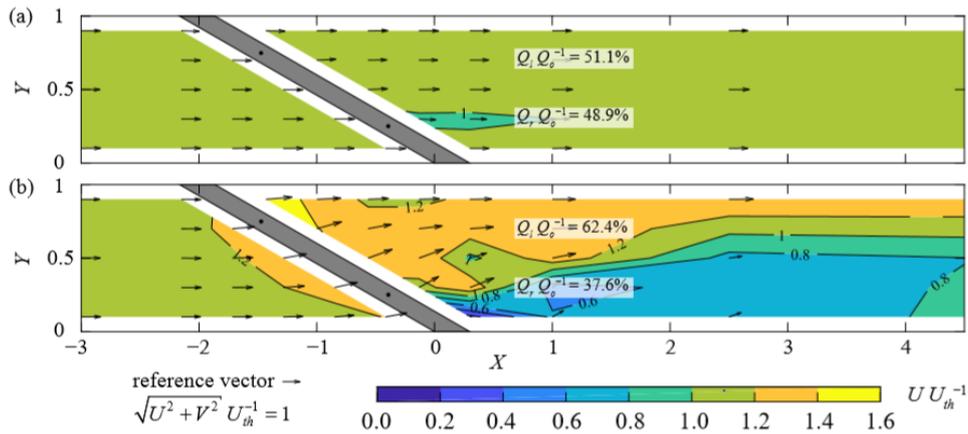


FIGURE 1.22 – Représentation de la norme de la vitesse adimensionnée pour une grille propre en haut et une grille colmatée en bas testées par Meister et al. (2020b).

quelque soit le débit alloué (de 4% à 10%) de façon à ce que la redirection du poisson vers l'exutoire soit très difficile en hauteur dans la colonne d'eau.

Raynal (2013) a donc proposé une alternative validée par des simulations numériques qui consiste à placer la grille sur toute la largeur et à positionner l'exutoire en amont en berge. Cette solution améliore les profils de vitesse et la courantologie (Figure 1.23).

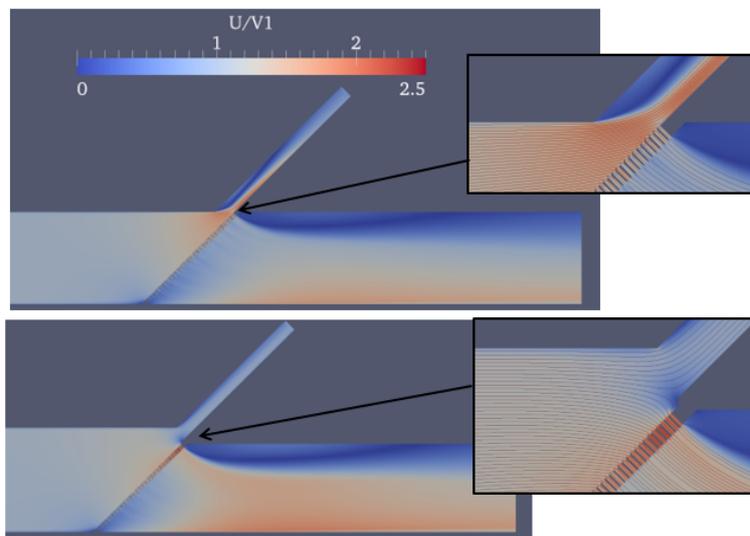


FIGURE 1.23 – Représentation de la norme de vitesse adimensionnée et des lignes de courant d'une grille orientée associée à un exutoire latéral en berge en amont simulé par Raynal (2013).

Il est donc recommandé de mettre en place un exutoire de surface le plus profond possible, sous la forme d'une échancrure (ou fente), aménagée dans la berge à proximité immédiate du plan de grille ou dans la partie terminale de la grille. Si un exutoire de fond doit être mis en place, il doit se présenter sous la forme d'une ouverture au fond aux dimensions

significatives (> 0.5 m), débouchant dans un puits, avec un contrôle du débit par déversement au sommet du puits. La section d'entrée de l'exutoire et son débit sont définis de manière à obtenir la vitesse d'écoulement souhaitée en entrée de l'exutoire. La conception des exutoires de fond doit faire l'objet d'une approche spécifique à chaque cas. Les exutoires de fond sous forme de conduite en charge de petit diamètre se sont révélés inefficaces pour l'anguille au niveau de multiples sites et sont à proscrire (Boubée et Williams, 2006 ; Calles et al., 2012 ; Egg et al., 2017).

1.4.5 Simulations numériques des grilles ichtyocompatibles

Les simulations numériques des grilles à faible espacement entre les barreaux ont commencé avec Ghamry et Katopodis (2009) pour des configurations à trois barreaux dans un canal à surface libre en RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). Ensuite, Raynal (2013) a modélisé en 2D des grilles orientées et validé pour les différents paramètres de turbulence, maillage et conditions aux limites. Ces simulations ont permis de valider numériquement la courantologie de ces grilles et d'essayer différentes géométries d'exutoires servant comme outils de prédiction. Szabo-Meszaros et al. (2019) ont modélisé une prise d'eau complète en 3D et ont essayé plusieurs solutions de dévalaison pour le cas de leur centrale. Feigenwinter et al. (2019) ont quant à eux, adopté une méthode conceptuelle de la mise en place des grilles dans un modèle numérique d'une prise d'eau en 3D. En somme, les études numériques sur les grilles ichtyocompatibles restent succinctes et sont encore à développer.

1.5 Bilan

La migration des poissons constitue un déplacement nécessaire à la réalisation de leur cycle de vie. Parallèlement, le nombre de centrales hydroélectriques augmente dans le cadre d'une production d'énergie renouvelable. L'association de ces deux problématiques présente un sujet de réflexion matérialisé par les différentes études citées dans cet état de l'art. Des solutions diverses et variées (barrières physiques ou comportementales, turbines ichtyocompatibles, louver, etc.) conviennent selon les spécificités des centrales (selon sa capacité de production la qualifiant de petite, moyenne ou grande) et de l'espèce du poisson considéré (Salmonidae, anguillidae, etc.) mais sous certaines réserves (pertes de charges importantes, difficultés d'implantation, coût, etc.) . Pour les petites centrales, d'un débit allant jusqu'à $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, les grilles à faible espacement entre les barreaux ichtyocompatibles sont à même de permettre la dévalaison des poissons avec un impact maîtrisé sur la production d'énergie. Néanmoins, différents questionnements restent présents pour optimiser ces dispositifs et réduire les contraintes:

-
- La forme des barreaux, peu étudiée, pourrait elle constituer un facteur majeur dans la minimisation des pertes d'énergie? Qu'en est-il aussi des structures de maintien des grilles, peuvent elles impacter la perte de charges et les champs de vitesse aval?
 - Peut on estimer l'efficacité hydraulique réelle des plans de grilles in-situ initialement implantées et les modéliser numériquement?
 - La disposition des barreaux peut elle être différente? Serait il favorable de remplacer les grilles par des plaques perforées?

Ce travail de thèse vient apporter des éléments de réponse à ces questions par des études expérimentales, in-situ et numériques, détaillées dans la suite des chapitres.

Outils expérimentaux et numériques

Sommaire

2.1 Mécanique des fluides d'un écoulement à surface libre	35
2.2 Outils expérimentaux	37
2.2.1 Mesure de laboratoire	37
2.2.2 Mesure de terrain	46
2.3 Simulation numérique du plan de grille	53
2.3.1 Présentation de l'outil numérique	54
2.3.2 Paramètres numériques	54
2.3.3 Validation d'un modèle numérique de l'écoulement à travers une grille	59
2.4 Bilan	62

Ce chapitre introduit les équations de la mécanique des fluides dans le cadre d'un écoulement à surface libre ainsi que les outils expérimentaux et numériques qui ont été employés dans le laboratoire et in situ, durant cette thèse. Les mesures expérimentales, sont des mesures de hauteur d'eau, de vitesse et de débit. La présentation de la centrale étudiée est aussi détaillée. Conjointement, les simulations numériques sont expliquées.

2.1 Mécanique des fluides d'un écoulement à surface libre

Les écoulements hydrodynamiques à surface libre à échelle réduite nécessitent une étude des similitudes associées. Pour ce faire, le calcul des nombres adimensionnels caractéristiques est la première étape dans le choix des paramètres du modèle.

En posant les hypothèses d'un fluide incompressible et irrotationnel, les équations locales de Navier-Stokes (notation selon la convention d'Einstein), décrivant la dynamique d'un fluide, sont:

- L'équation 2.1 de la conservation de la quantité de masse:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.1}$$

- L'équation 2.2 de la conservation de la quantité de mouvement:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \Delta v_i + g_i \quad (2.2)$$

Sous la forme vectorielle, elles sont présentées dans les équations 2.3 et 2.4 :

$$\text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (2.3)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \mu \cdot \Delta \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (2.4)$$

Les termes de l'équation représentent bien la relation entre l'inertie représentée par les termes de gauche: $(\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v})$ et les forces de pression $(-\nabla p)$, les tensions visqueuses $(\mu \cdot \Delta \vec{v})$ ainsi que les forces de pesanteur $(\rho \vec{g})$.

Le traitement adimensionnel de ces équations nécessite l'application de la similitude appropriée. Les grandeurs physiques utilisées sont au nombre de 7 : la vitesse v , la pression p , la longueur x et le temps t qui sont les fonctions ou variables et la masse volumique ρ , la viscosité dynamique μ , l'accélération de la pesanteur g qui sont les paramètres constants. Le rang r de la matrice dimensionnelle est alors égal à 3, les trois grandeurs de base que l'on choisit sont: L, V et ρ . Les échelles caractéristiques X_i et les grandeurs adimensionnées sont alors:

$$\left\{ \begin{array}{l} v^* \equiv \frac{v}{X_1} \quad \text{avec} \quad X_1 \equiv V \\ p^* \equiv \frac{p}{X_2} \quad \text{avec} \quad X_2 \equiv \rho V^2 \\ x^* \equiv \frac{x}{X_3} \quad \text{avec} \quad X_3 \equiv L \\ t^* \equiv \frac{t}{X_4} \quad \text{avec} \quad X_4 \equiv \frac{L}{V} \\ N_5 \equiv \frac{\rho}{X_5} \quad \text{avec} \quad X_5 \equiv \rho \\ N_6 \equiv \frac{\mu}{X_6} \quad \text{avec} \quad X_6 \equiv \frac{\rho V^2 \cdot L}{V} \\ N_7 \equiv \frac{g}{X_7} \quad \text{avec} \quad X_7 \equiv \frac{V^2}{L} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

En remplaçant les grandeurs physiques x_i par les produits $x^*_i \cdot X_i$ ou $N_i \cdot X_i$, l'équation de Navier-Stokes devient:

$$\frac{\partial \vec{v}^*}{\partial t^*} + (\vec{v}^* \cdot \nabla) \vec{v}^* = -\nabla p^* + \frac{1}{Re} \Delta \vec{v}^* + \frac{1}{Fr^2} \frac{\vec{g}}{g} \quad (2.6)$$

L'échelle de longueur L est donnée par la hauteur d'eau amont H_1 et l'échelle des vitesses V est donné par la vitesse débitante amont V_1 , nous obtenons les nombres adimensionnels suivants:

- Le nombre de Froude, dans notre cas et par rapport à la longueur caractéristique qui est la hauteur d'eau, est défini par l'équation 2.7:

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{g \times H_1}} \quad (2.7)$$

avec V_1 la vitesse de l'écoulement (ms^{-1}), g l'accélération de la pesanteur (ms^{-2}) et H_1 la hauteur d'eau (m).

D'après Courret et Larinier (2008), dans une prise d'eau d'une centrale hydroélectrique, le nombre de Froude en centrale varie de 0.005 à 0.2.

- Le nombre de Reynolds global défini sur la hauteur d'eau en amont par l'équation 2.8:

$$Re = \frac{V_1 \times H_1}{\nu} \quad (2.8)$$

Dans une prise d'eau d'une centrale hydroélectrique, le nombre de Reynolds global dépend de la hauteur d'eau en amont de la grille et se situe entre 8.10^5 et 32.10^5 .

- Le nombre de Reynolds du barreau (local) défini par l'équation 2.9:

$$Re_b = \frac{V_1 \times b}{\nu} \quad (2.9)$$

avec V_1 la vitesse de l'écoulement (ms^{-1}), b la largeur de barreau (m) et ν la viscosité cinématique de l'eau (m^2s^{-1}). Pour une grille de protection d'une centrale hydroélectrique, le nombre de Reynolds du barreau est entre 3200 et 7200 pour une largeur de barreau de 8 ou 10 mm.

2.2 Outils expérimentaux

Les outils expérimentaux utilisés sont destinés à deux types d'études: en laboratoire et in-situ, et sont spécifiques aux mesures de vitesse, de hauteur d'eau et de débit. Ils sont présentés et détaillés dans ce qui suit.

2.2.1 Mesure de laboratoire

Canal à surface libre

Les expériences ont été menées dans le canal hydraulique à surface libre de l'institut Pprime, présenté dans la Figure 2.1. Ce canal est composé de parois en verre et d'un fond en PVC. Ses dimensions se caractérisent par une longueur de 12 m, une largeur de 1m et une hauteur de 1 m. L'alimentation du canal est assurée par deux pompes d'une capacité allant de $800 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ à $1800 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ (soit environ 200 à 500 L/s). Le débit est mesuré par un débitmètre électromagnétique et permet de réguler le débit de consigne de l'installation à $\pm 20 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. L'eau est stockée dans une bache en dessous du canal et circule dans un circuit fermé. L'ajustement de la hauteur d'eau est réalisé au moyen d'une guillotine située à la sortie du canal.

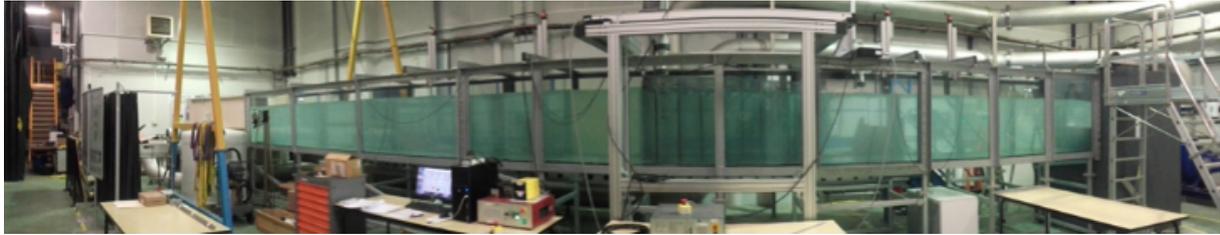


FIGURE 2.1 – Canal hydraulique à surface libre de l’institut Pprime.

Composition des grilles

Les grilles sont composées principalement de trois éléments: les barreaux, les entretoises et les éléments de support. Les notations de chaque paramètre de ces éléments sont explicitées sur la Figure 3.1. Pour chaque configuration de grille testée, les dimensions diffèrent: l’épaisseur du barreau (b) varie de 5 à 12 mm; la profondeur (p) de 40 à 80 mm; la longueur de 1000 à 2800 mm. Pour les entretoises, deux diamètres (D_{sp}) ont été employées, 20 et 30 mm. Les épaisseurs des supports longitudinaux varient aussi de 10 à 20 mm. Les dimensions des différentes grilles sont explicitées dans la suite de la thèse pour chaque configuration.

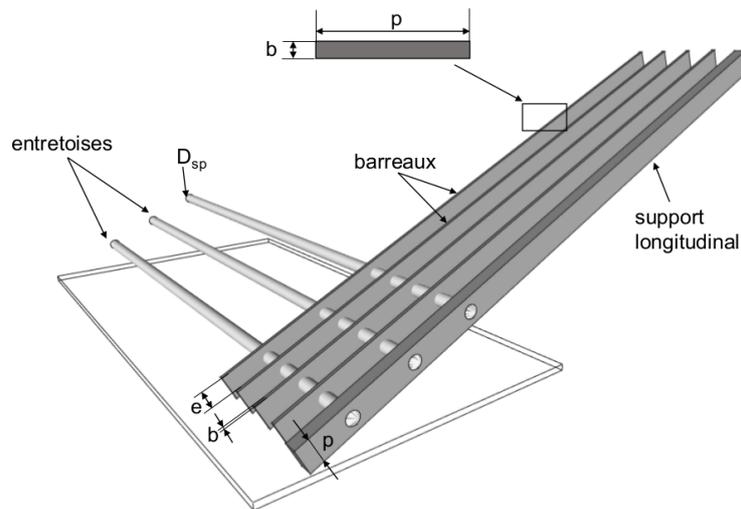


FIGURE 2.2 – Composants des grilles et notations des paramètres caractéristiques.

Échelle du modèle

L’échelle du modèle expérimental doit être choisie de manière à reproduire fidèlement les conditions présentes dans les centrales hydroélectriques. L’échelle des barreaux est de 1:2 à 1:1 en référence aux largeurs de barreaux utilisés en centrale qui varient de 8 mm à 10 mm. L’échelle de la longueur du barreau et de la largeur de la grille peut être estimée à 1:10 mais cela dépend fortement des dimensions des centrales dont les largeurs varient de

4 à 20 m et les profondeurs entre 2 et 4 m, pour les centrales installées dans les zones de plaines ou de piémont en France.

Dans la première section, nous avons défini les nombres sans dimensions de l'écoulement afin de s'assurer des mêmes régimes d'écoulement. L'échelle du nombre de Froude est de 1:2 car le nombre de Froude se situe entre 0.2 et 0.3 pour les expériences réalisées. Le régime des écoulements est fluvial en laboratoire et in-situ.

Le nombre de Reynolds du canal en laboratoire est de 5.04×10^5 . Le régime de l'écoulement est turbulent in-situ et pendant les expérimentations.

Le nombre de Reynolds du barreau en laboratoire varie de 3600 à 8640. L'échelle du nombre de Reynolds du barreau est de 1:1 pour des largeurs variant de 5 à 12 mm.

Il a été démontré par Meusburger (2002), Raynal et al. (2013a, 2013b) et Albayrak et al. (2017) que le coefficient de pertes de charges est invariant en fonction du nombre de Froude à partir de 0.2 et du nombre de Reynolds du barreau à partir de 1500 (Figure 2.3). Des points additionnels selon différentes vitesses ont été aussi mesurés afin de valider cette invariance pour le profil de barreau Plétina qui va être présenté dans le chapitre suivant. Les campagnes expérimentales menées dans cette thèse sont donc représentatives de conditions pour lesquelles les coefficients de perte de charge obtenus seront transposables à échelle réelle.

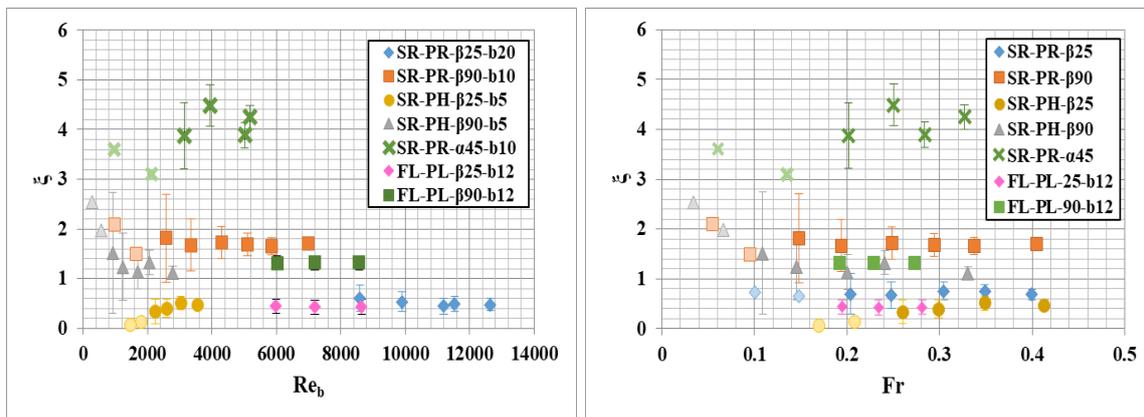


FIGURE 2.3 – Evolution du coefficient de pertes de charge ξ des grilles inclinées en fonction du nombre de Reynolds du barreau (à gauche) et de Froude Fr (à droite) pour différentes séries de mesures. Chaque série correspond à une augmentation du débit Q à hauteur d'eau H_1 constante de l'étude (Raynal et al., 2013a) notée SR et de l'étude actuelle notée FL pour le profil de barreau Plétina. (PR: profil rectangulaire, PH: profil hydrodynamique, PL: Plétina, β : l'angle d'inclinaison).

Mesure de hauteur d'eau

Les mesures de hauteur d'eau ont été effectuées au moyen de 4 sondes ultrasoniques placées en amont et en aval de la grille. Ces sondes sont de type Microsonic Mic =35:IU:TC, d'une précision d'affichage de 1%. Le capteur à ultrasons émet à intervalles réguliers de courtes impulsions sonores à une fréquence égale à 400 Hz. Ces impulsions se propagent dans l'air à la vitesse du son. Lorsqu'elles rencontrent la surface de l'eau, elles se réfléchissent et reviennent sous forme d'écho au capteur. Celui-ci calcule alors la distance le séparant de la cible sur la base du temps écoulé entre l'émission du signal et la réception de l'écho. La distance est donc déterminée par le temps de propagation, dans un intervalle compris entre 65 mm et 350 mm et une portée limite de 600 mm (Figure 2.4). Ces sondes sont fixées sur un support avec un réglet vertical qui permet leur étalonnage.

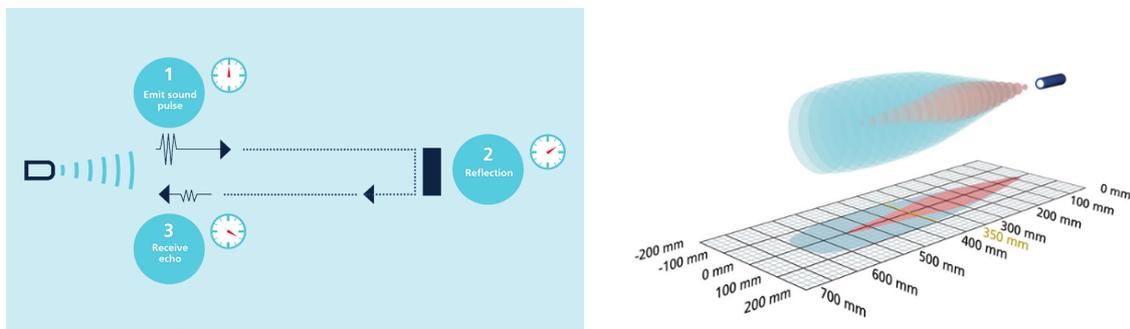


FIGURE 2.4 – Schéma de la méthode de mesure de la sonde (à gauche) et de son volume de mesure (à droite).

Elles sont positionnées au centre de la largeur du canal pour toutes les configurations testées sachant que les axes sont définis par x selon le sens de l'écoulement, y selon la largeur et z selon la hauteur (Figure 2.5). La position dans la largeur a été testée dans les études de (Kriewitz, 2015) et d'Albayrak et al. (2017), et ne montre aucun effet du positionnement sur l'axe y.

Pour l'axe x, deux sondes ont été placées en amont et deux également en aval de la grille pour les deux configurations de grilles testées. Pour les grilles inclinées, elles sont placées à $x = -2.0$ m et $x = -1.0$ m en amont du pied de grille situé en $x=0$ et en aval à $x = +2.6$ m et $x = +3.6$ m, comme schématisé dans la Figure 2.5. Pour les grilles orientées, elles sont placées à $x = -2.82$ m et $x = -1.27$ m en amont de la grille ($x = 0$ m) et en aval à $x = +2.36$ m et $x = +3.26$ m, comme schématisé dans la Figure 2.5.

La comparaison des différentes positions des sondes dans les récentes études est détaillée dans le tableau 2.1. Ce tableau montre la distance en amont de la grille (L_1) et la distance en aval de la grille (L_2). Ces distances montrent qu'elles diffèrent d'une étude à une autre et que les rapports (L_1/H_1 et L_2/H_1) sont indépendants de la hauteur d'eau.

Nous utilisons les sondes (S1 et S2) pour le calcul de la différence des hauteurs et les

sondes (S0 et S3) servent à valider les mesures. Le temps d'acquisition est de 60 s pour une fréquence de 200 Hz. Les points acquis (au nombre de 12000 pour chaque sonde) sont ensuite moyennés pour déterminer la hauteur d'eau mesurée par chaque sonde.

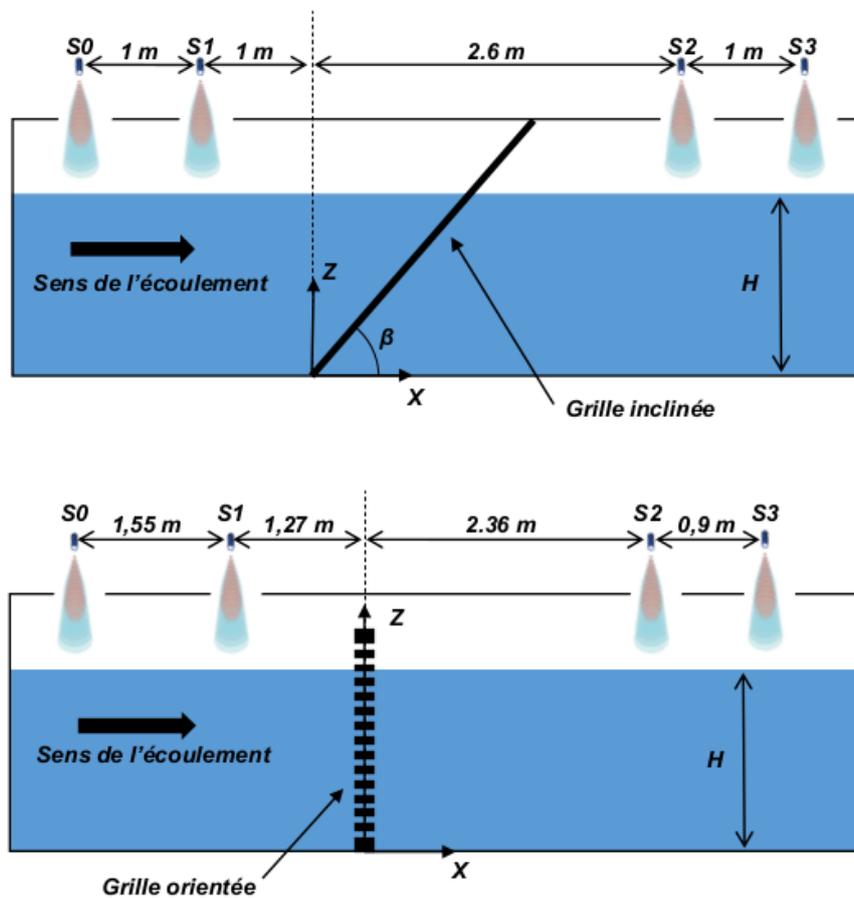


FIGURE 2.5 – Position schématique des sondes dans le canal des grilles inclinées (en haut) et des grilles orientées (en bas).

TABLEAU 2.1 – Position des mesures de hauteur d'eau amont (L_1) et aval (L_2) et du rapport de ces positions à la hauteur d'eau amont (H_1) des récentes études.

Étude	H_1 (m)	L_1 (m)	L_1/H_1	L_2 (m)	L_2/H_1
(Meusburger, 2002)	0.6	1.0	1.7	5.0	8.3
(Raynal, 2013)	0.35	1.0	2.86	2.6	7.43
(Böttcher, Gabl et Aufleger, 2019)	0.4	3.0	7.5	6.0	15.0
(Albayrak et al., 2017)	0.4	3.0	7.5	3.0	7.5
(Beck et al., 2019a)	0.4	3.0	7.5	3.0	7.5
(Meister et al., 2020a)	0.4	2.24	5.6	1.96	4.9
Étude actuelle	0.7	1.0	1.42	2.6	3.71

Incertitude de mesure de hauteur d'eau

Le calcul des pertes de charges et le coefficient associé, détaillé au premier chapitre à partir du théorème de Bernoulli généralisé, est rappelé par les équations 2.10 et 2.11:

$$\Delta H = H_1 - H_2 + \frac{Q^2}{2 \times g \times B^2} \times \left(\frac{1}{H_1^2} - \frac{1}{H_2^2} \right) + (H_{01} - H_{02}) \quad (2.10)$$

$$\xi = \frac{\Delta H}{V_1^2/2g} \quad (2.11)$$

avec H_{01} et H_{02} les hauteurs d'eau amont et aval sans la grille. Le calcul des incertitudes revient à la prise en compte de plusieurs sources d'erreurs dans la mesure tels que : l'étalonnage des capteurs, la mise en place du support des capteurs, la hauteur prise en référence par les capteurs, la mesure de la largeur du bassin et la mesure du débit (Beaulieu et al., 2015). Après recensement de ces incertitudes, la loi de propagation des incertitudes (Metrology JCGM, 2008) permet de déterminer l'incertitude-type composée de la grandeur estimée - le coefficient de perte de charge - à partir des grandeurs mesurées: la hauteur d'eau et le débit, ainsi que les dimensions et positions de l'ensemble du dispositif. Les incertitudes-type B, sont de la forme $\frac{\Delta x}{\sqrt{3}}$, étant donné les informations recueillies au sujet de la variable x et qui proviennent soit: des résultats de mesures antérieures, de l'expérience ou de la connaissance générale du comportement et des propriétés des matériaux et instruments utilisés, des spécifications du fabricant, des données fournies par des certificats d'étalonnage ou autres certificats ou de l'incertitude assignée à des valeurs de référence provenant d'ouvrages et manuels. Ces incertitudes sont détaillées dans les équations qui suivent:

$$u(H_{1,2}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{etal}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{support}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{ref}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{capt}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (2.12)$$

$$u(Q) = \frac{\Delta Q}{\sqrt{3}} \quad (2.13)$$

$$u(B) = \frac{\Delta B}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

$$u(g) = 5.10^{-5} \quad (2.15)$$

avec:

- ❖ Q le débit (m^3s^{-1}) et $u(Q)$ l'incertitude-type B sur Q (m^3s^{-1}),
- ❖ $u(H)$ l'incertitude-type B sur la hauteur d'eau H (m),
- ❖ Δ_{etal} l'incertitude sur l'étalonnage des capteurs (m),
- ❖ $\Delta_{support}$ l'incertitude sur la mise en place du support des capteurs (m),
- ❖ Δ_{ref} l'incertitude à la mesure de la hauteur prise en référence par les capteurs (m),

- ❖ Δ_{capt} la précision des capteurs (m),
- ❖ B la largeur du canal (m), $u(B)$ l'incertitude-type B sur la largeur du canal (m),
- ❖ H_1 la hauteur d'eau en amont de la grille (m), $u(H_1)$ l'incertitude-type sur la hauteur d'eau (m),
- ❖ H_2 la hauteur d'eau en aval de la grille (m), $u(H_2)$ l'incertitude-type sur la hauteur d'eau (m),
- ❖ g l'accélération de la pesanteur (m^2s^{-1}), $u(g)$ l'incertitude-type sur l'accélération de la pesanteur (m^2s^{-1}),

L'incertitude sur la mesure de pertes de charges est donc $u(PDC)$ et l'incertitude sur la mesure du coefficient de perte de charges est $u(\xi)$:

$$u(PDC) = \left[\left(\frac{\partial PDC}{\partial H_1} \right)^2 u(H_1)^2 + \left(\frac{\partial PDC}{\partial B} \right)^2 u(B)^2 + \left(\frac{\partial PDC}{\partial Q} \right)^2 u(Q)^2 + \left(\frac{\partial PDC}{\partial g} \right)^2 u(g)^2 + \left(\frac{\partial PDC}{\partial H_2} \right)^2 u(H_2)^2 + \left(\frac{\partial PDC}{\partial H_{0,1}} \right)^2 u(H_{0,1})^2 + \left(\frac{\partial PDC}{\partial H_{0,2}} \right)^2 u(H_{0,2})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

$$u(\xi) = \left[\left(\frac{\partial \xi}{\partial H_1} \right)^2 u(H_1)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial PDC} \right)^2 u(PDC)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial g} \right)^2 u(g)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial B} \right)^2 u(B)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial Q} \right)^2 u(Q)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

avec:

- ❖ $H_{0,1}$ la hauteur d'eau sans grille en amont de la grille (m), $u(H_{0,1})$ l'incertitude-type sur la hauteur d'eau (m),
- ❖ $H_{0,2}$ la hauteur d'eau sans grille en aval de la grille (m), $u(H_{0,2})$ l'incertitude-type sur la hauteur d'eau (m),
- ❖ PDC la perte de charge (m), $u(PDC)$ l'incertitude-type sur les pertes de charges (m),
- ❖ ξ le coefficient de pertes de charges, $u(\xi)$ l'incertitude-type composée sur le coefficient de pertes de charges.

La contribution de chaque terme est détaillée dans le tableau 2.2 et révèle que le facteur prépondérant dans les incertitudes est celui du calcul des PDC (ΔH) à plus de 97%. Les autres termes liés aux constantes comme la largeur du canal, le débit et l'accélération de la gravité semblent ne pas être les sources des incertitudes générées avec des pourcentages très faibles entre 7E-08 % et 2.57 %.

Mesure de vitesse

Les mesures de vitesse effectuées au laboratoire sont réalisées à l'aide d'un Vélocimètre Acoustique à effet Doppler ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) muni d'une sonde SonTek MicroADV 16 Mhz (Figure 2.6). Le principe de fonctionnement de la sonde ADV est basé sur l'effet Doppler, qui consiste en un signal acoustique émis à haute fréquence (16 MHz)

TABLEAU 2.2 – Comparaison des contributions en pourcentage des différents termes de calcul de l'incertitude liée au coefficient de pertes de charge ξ .

Config.	Angles (°)	$\left(\frac{\partial \xi}{\partial PDC}\right)^2 u(PDC)^2$ (%)	$\left(\frac{\partial \xi}{\partial H_1}\right)^2 u(H_1)^2$ (%)	$\left(\frac{\partial \xi}{\partial B}\right)^2 u(B)^2$ (%)	$\left(\frac{\partial \xi}{\partial Q}\right)^2 u(Q)^2$ (%)	$\left(\frac{\partial \xi}{\partial g}\right)^2 u(g)^2$ (%)
Grille orientée	30 90	99.468 97.270	0.089 0.455	0.004 0.019	0.439 2.257	7.07E-08 3.63E-07
Grille inclinée	15 90	99.134 99.317	0.141 0.114	0.003 0.005	0.722 0.565	5.70E-08 9.09E-08
Plaque perforée	15 90	99.745 97.173	0.043 0.473	0.002 0.019	0.210 2.334	3.39E-08 3.76E-07

réfléchi par des particules en mouvement dans un volume donné. La vitesse de ces particules engendre un décalage en fréquence entre le signal émis et le signal reçu par la sonde. Cette vitesse est déduite à partir de la fréquence de réception sachant la fréquence d'émission de l'onde acoustique et la vitesse de propagation de l'onde dans l'eau. La sonde ADV est composée d'une tige au bout de laquelle se trouvent un émetteur et trois récepteurs acoustiques. L'émetteur est positionné dans l'axe de la tige. Un angle de 120° sépare chacun des récepteurs permettant de récupérer les trois composantes de la vitesse. Le volume de mesure est d'environ 0.1 cm^3 et est situé à 5 cm de l'émetteur. L'incertitude de l'appareil donnée par le constructeur est de 1%. Le temps d'acquisition fixée est de 60 s, à une fréquence de 50 Hz, donnant un nombre de points de 3000.

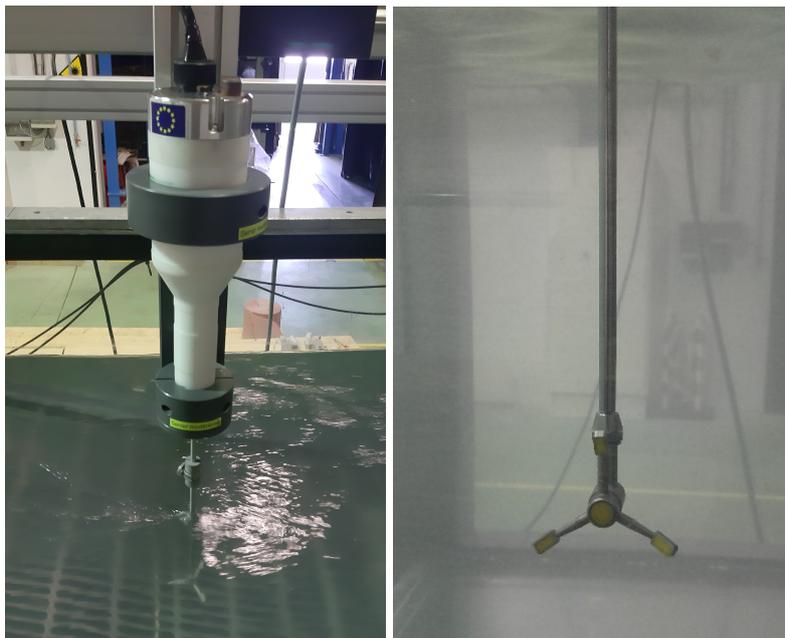


FIGURE 2.6 – Sondes ADV utilisées (à gauche sonde de type droite et à droite sonde de type coudée).

L'ADV est automatisé avec une table de déplacement selon les trois axes (X,Y,Z). Les profils de vitesse sont obtenus selon les maillages entrés d'un pas de 40 mm et sont positionnés à 50 mm en amont de la grille et à 400 mm en aval de la grille (Figure 2.7). L'ac-

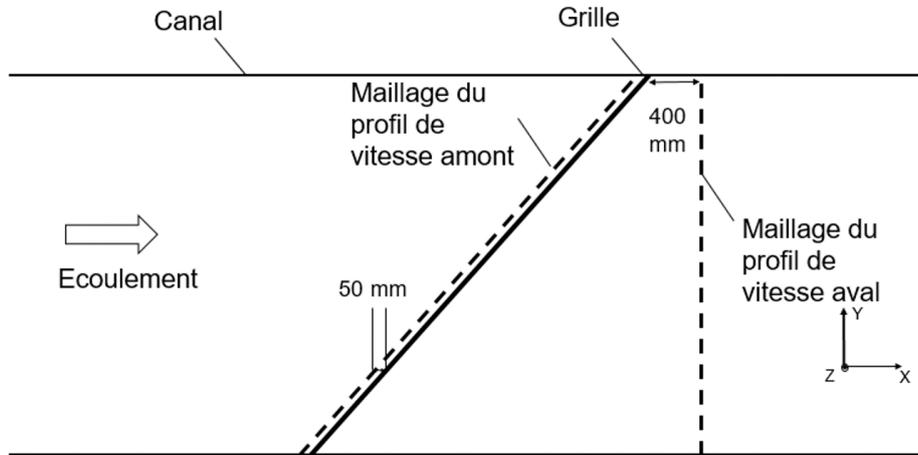


FIGURE 2.7 – Maillage en amont et en aval des grilles orientées.

quisition se fait à travers une application élaborée sous Labview. Les points acquis sont ensuite filtrés afin d'éliminer les valeurs non-physiques qui peuvent être renvoyées par le capteur. Le filtrage se fait au moyen d'un programme développé en C++ dans le laboratoire et qui propose plusieurs types de filtrage dont, celui d'accélération utilisé ici. Le filtre d'accélération consiste à considérer les points dont l'accélération maximale de la particule associée dans le fluide est proportionnelle à la gravité g et de même ordre de grandeur. Les points de mesure pour lesquels l'accélération sera supérieure à la valeur maximale fixée seront considérés comme des *spikes*. Le filtre prend en compte de la même façon pour le minimum, la décélération. Un *spike* est défini de la manière suivante:

- ❖ Accélération : $a_{x,i} > k_g g$ et $u_i > u + k_\sigma \sigma_u$

- ❖ Décélération : $a_{x,i} < -k_g g$ et $u_i < u - k_\sigma \sigma_u$

avec σ_u l'écart-type de la vitesse. Cette méthode fait intervenir deux constantes k_g et k_σ qui prennent les valeurs suivantes $k_g=1$ ou 2 , $k_\sigma=1.5$ et qui sont des valeurs empiriques pré-établies. Cette méthode reprend la méthode développée par Goring et Nikora (2002).

2.2.2 Mesure de terrain

Dans cette section, les campagnes d'essais réalisées à la centrale de Las Rives pour mesurer la vitesse en amont de la grille et le débit dans la goulotte sont détaillées.

Présentation du site d'étude

La centrale hydroélectrique étudiée est celle de Las Rives située sur la rivière Ariège, dans le département de l'Ariège (09), au sud de la ville de Pamiers repérée dans la Figure 2.8.

Cette centrale fait l'objet d'une étude sur la dévalaison de différentes espèces de poisson et permet d'observer l'effet cumulé de la dévalaison au passage de 5 centrales. Le projet Efigri associé aux études du projet Fithydro a permis d'étudier l'hydrodynamique des prises d'eau et leur efficacité de dévalaison d'un point de vue poisson.

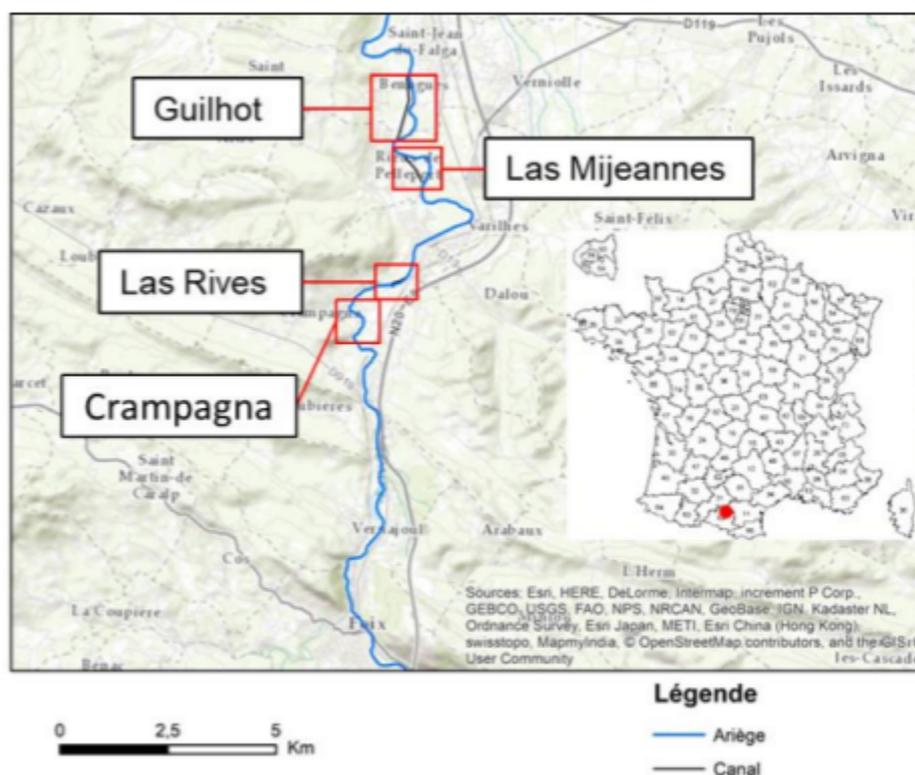


FIGURE 2.8 – Localisation de la centrale hydroélectrique de Las Rives.

Cette centrale est équipée d'une prise d'eau dite ichtyocompatible, implantée à l'extrémité amont du canal d'amenée afin d'assurer une dévalaison sans dommage des poissons, et en particulier des smolts de saumon atlantique et des anguilles argentées. La prise est composée d'une grille avec un espacement entre barreaux de 20 mm, inclinée à 26° par rapport à l'horizontale de manière à guider les poissons vers 3 exutoires de surface po-

sitionnés à son sommet. Ces 3 exutoires sont de 1 m de largeur et de 0.5 m de hauteur, espacés d'un masque d'obturation et débouchent dans une goulotte transversale commune, d'une largeur progressive de 0.8 à 2.41 m et d'une hauteur de 0.7 m, pour l'évacuation des dégrillats et des poissons dévalant. Cette goulotte se déverse ensuite dans le tronçon court-circuité (TCC) de l'aménagement, son débit d'alimentation participant ainsi au débit réservé à maintenir dans le TCC.

Les différents composants de la prise d'eau sont représentés dans la Figure 2.9.

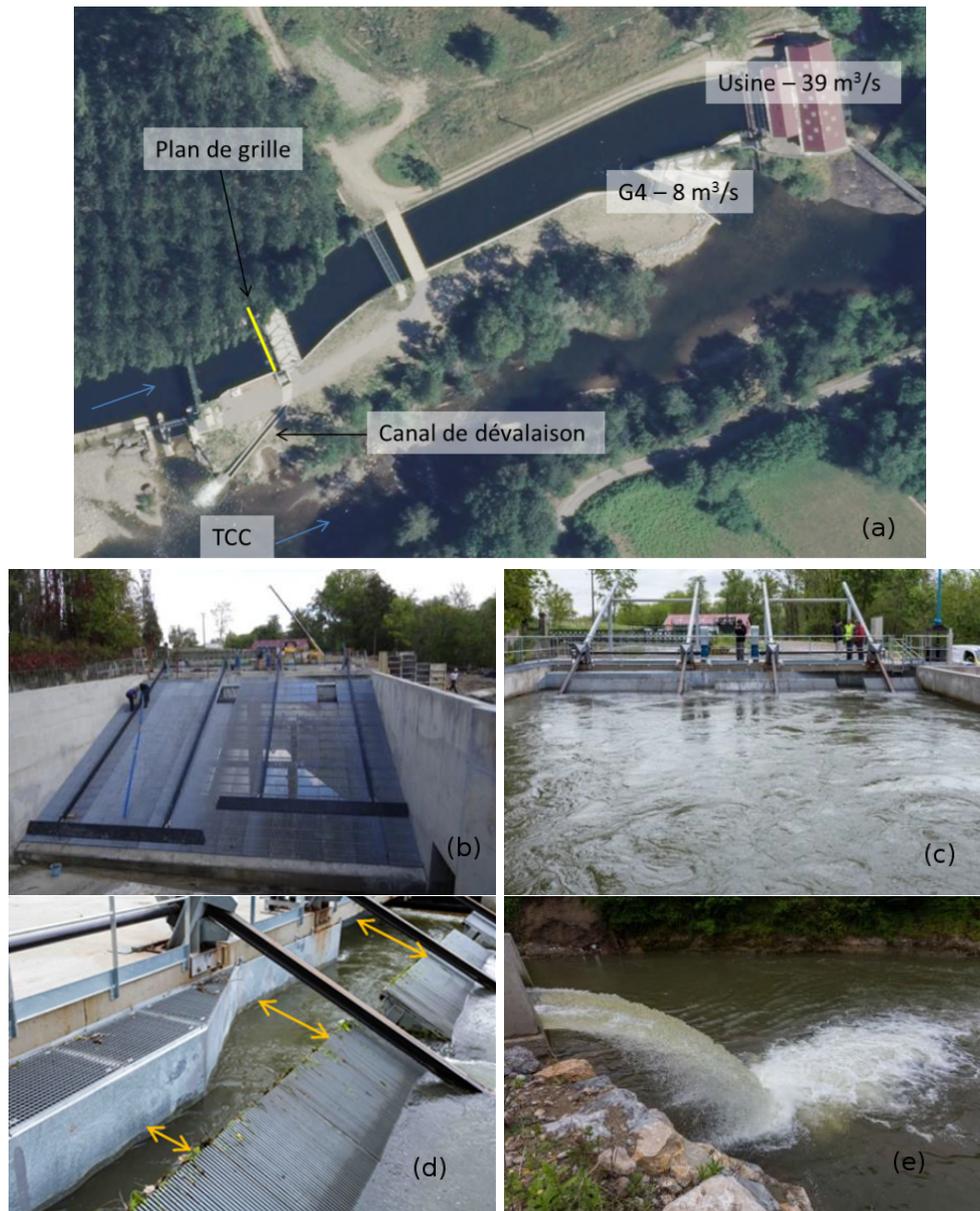


FIGURE 2.9 – Visualisation du site de Las Rives : (a) vue aérienne, (b) plan de grille hors d'eau vue depuis l'amont, (c) plan de grille en eau vue depuis l'amont, (d) vue de la goulotte transversale de collecte des exutoires et son élargissement progressif et (e) débouché de la goulotte de dévalaison dans le tronçon court-circuité.

Mesure de vitesse in-situ

Les mesures de courantologie à l'amont du plan de grille ont été réalisées avec un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) StreamPro de Teledyne RDI (Figure 2.10). L'ADCP est composé de transducteurs pour émettre et recevoir des signaux sonores. Le décalage de fréquence de l'écho réfléchi par les particules donne la vitesse de l'eau le long du trajet acoustique (Le Coz et al., 2009). Pour mesurer les vitesses 3D, au moins trois faisceaux sont nécessaires. La sonde est dotée de 4 capteurs dont les faisceaux d'émission-réception sont inclinés à 20° par rapport à l'axe de la sonde, la largeur d'un faisceau étant de 3° . La sonde est positionnée de manière verticale et immergée de quelques cm. L'appareil mesure la profondeur d'eau, ainsi que les 3 composantes de la vitesse d'écoulement au sein de 20 cellules de mesures découpées uniformément sur la colonne d'eau. Le découpage des cellules est constant durant les mesures et défini en fonction de la profondeur maximale renseignée par l'opérateur. La fréquence d'acquisition des mesures est de 1 Hz et l'incertitude de l'appareil donnée par le constructeur est de 1%.



FIGURE 2.10 – Photo de l'ADCP StreamPro monté sur son trimaran et de la sonde avec un détail des 4 capteurs.

Au niveau de la prise d'eau étudiée, les conditions d'écoulement se sont avérées trop agitées pour déployer l'ADCP de la manière habituelle, c'est-à-dire monté sur le trimaran et manœuvré avec un système de cordes. De plus, il n'est pas certain que le système de "Bottom Tracking" permettant à l'appareil de mesurer son propre déplacement par rapport au fond fonctionne correctement dans le cas où l'ADCP se trouve au-dessus du plan de grille incliné. Enfin, la présence de pièces métalliques dans la prise d'eau est susceptible de perturber le fonctionnement du compas de l'appareil et donc le calcul de sa propre trajectoire. C'est pourquoi un système de support et de chariot de déplacement a été spécifiquement développé pour déployer l'ADCP de manière correcte (Figure 2.11). Le support est constitué de treillis aluminium de section carré ($289*289\text{mm}^2$), avec différents éléments de 2 ou 3 m de longueur emboîtés (structure usuellement utilisée pour réaliser les scènes de spectacles ou les stands). Avec une longueur de support environ 1 m supérieure à celle des prises d'eau, le poids de la structure était de l'ordre de 94 kg pour une largeur de prise

d'eau de 14 m. La mise en place d'un tel support a été réalisée à 6 personnes. Le chariot de déplacement a été constitué à l'aide d'éléments de la marque NORCAN et a été manœuvré par un système de cordage associé à une mesure manuelle de la position de la sonde. On a aussi utilisé un tachéomètre LEICA TS02 ULTRA-7" pour le repérage. Ce système permet ainsi un positionnement fixe et précis de la sonde de l'ADCP, contrôlé par l'opérateur, et ne faisant donc pas appel au "Bottom Tracking" de l'appareil.



FIGURE 2.11 – Support et chariot de déplacement ayant permis de déployer la sonde ADCP.

Les mesures ont été effectuées en positionnant la sonde en des points fixes le temps d'acquérir au moins 30 mesures valides. Chaque transect transversal est décrit par plusieurs points de mesures espacés de 1.0 m en général et 0.5 m au niveau des transects au sommet des grilles où une plus grande précision de mesure était souhaitée. Le long des berges des prises d'eau qui se trouvent être verticales, le premier et le dernier point de mesures ont été placés à entre 0.5 m et 1 m de la berge de manière à éviter que les faisceaux de mesures ne viennent impacter la paroi. Les mesures ont été effectuées au niveau de 4 transects transversaux situés à 2, 4, 6 et 10 m en amont du sommet du plan de grille (Figure 2.12) en 2018. Le point d'immersion du plan de grille se trouve entre 0.65 m et 0.7 m en amont du sommet de grille. L'entrée des exutoires se situe à environ 1.85 m de ce sommet du plan de grille. Le transect à 10 m se situe à peu près au niveau du pied de la grille et celui à 2 m juste à l'amont de l'entrée des exutoires (environ 0.15 m).

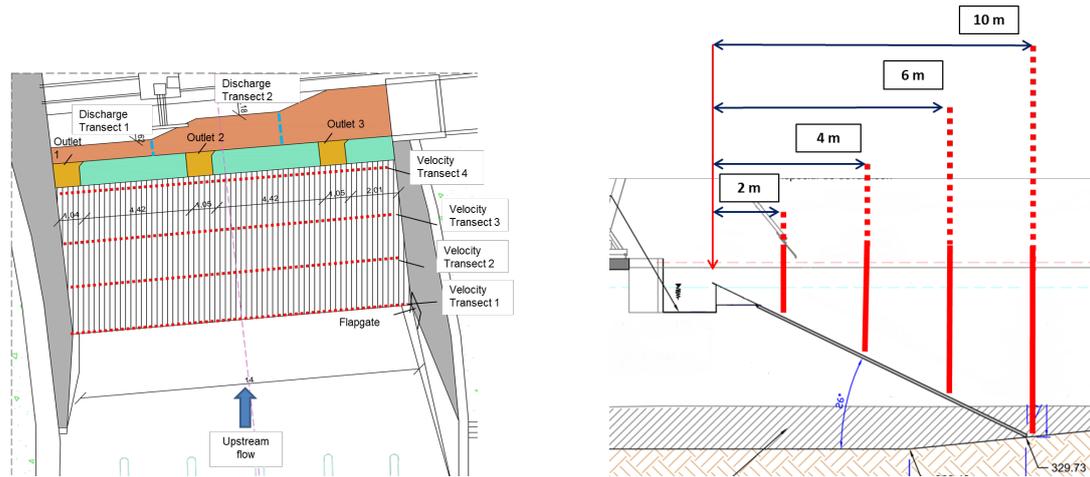


FIGURE 2.12 – Positionnement des transects de mesures ADCP à Las Rives en 2018.

L'acquisition des mesures a été réalisée avec le logiciel Teledyne Winriver II. Les données sont ensuite traitées de manière séparée pour chaque cellule de mesure sur la verticale, au niveau de chaque point de mesure de chaque transect. Les cellules invalidées sont filtrées et l'ensemble des points enregistrés sont moyennés. Comme l'orientation de la sonde est fixe, les vitesses analysées sont celles mesurées dans le repère de la sonde. De cette façon, on s'affranchit des éventuels biais liés à une perturbation du compas de l'appareil.

Mesure de débit des exutoires in-situ

La répartition du débit entre les 3 exutoires de dévalaison a été caractérisée en réalisant:

- ❖ 2 jaugeages au courantomètre dans la goulotte: le premier jaugeage dans la portion de goulotte entre le premier exutoire positionné en rive gauche et l'exutoire central, à l'amont immédiat du premier élargissement et le second jaugeage dans la portion de goulotte entre le second exutoire central et le 3eme exutoire positionné en rive droite, à l'amont immédiat du deuxième élargissement (section 1 et 2 représentées dans la Figure 2.13).
- ❖ Et une évaluation du débit total transitant dans la goulotte à l'aide d'une loi de seuil. Les débits des exutoires en position centrale et en rive droite sont obtenus par différences entre ces différentes mesures.

Les jaugeages dans la goulotte ont été réalisés à l'aide d'un courantomètre électromagnétique Marsh McBirney, FLO-MATE 2000 (Figure 2.14). L'incertitude de l'appareil donnée par le constructeur est de 2%. Les mesures sur chaque section s'effectuent de la sorte:



FIGURE 2.13 – Positionnement des jaugages réalisés dans la goulotte de Las Rives.

- ❖ Mesure de la largeur de la section et découpage en verticales: 10 cm de chaque rive puis en parts égales de ± 20 cm ;
- ❖ Pour chaque verticale: mesure de la hauteur d'eau ; mesure de la vitesse en 6 points sur la colonne d'eau dans la mesure où l'on ne peut pas faire l'hypothèse que le profil de vitesse est logarithmique : au fond, à 20%, 40%, 60% et 80% de la hauteur d'eau et enfin à la surface (Figure 2.15). Chaque mesure consiste en une moyenne de la vitesse sur 30 secondes.

Près des parois latérales, l'appareil présentait parfois des problèmes de mesures avec certaines valeurs manquantes périodiquement, ce qui avait pour conséquence d'empêcher le calcul de la moyenne par l'appareil. Pour limiter la perte de temps liée à ce souci, 2 mesures de vitesses sur 15 s ont été effectuées à chaque point.



FIGURE 2.14 – Exemple d'un courantomètre électro-magnétique.

Le débit est calculé selon la norme EN ISO 748:2007, par la méthode de la section

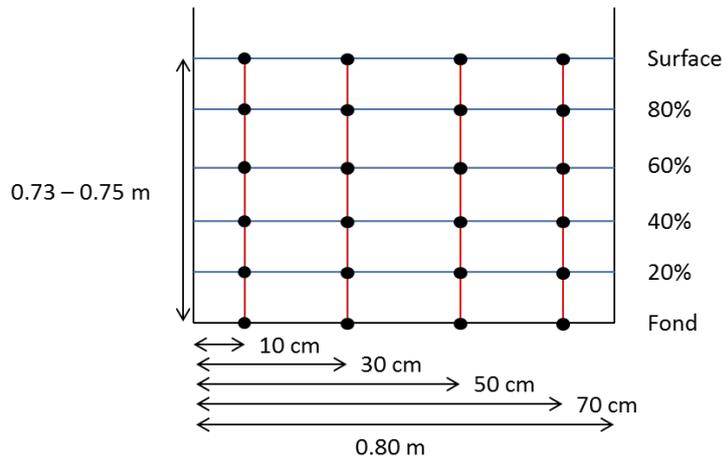


FIGURE 2.15 – Découpage d’une section lors d’une mesure au courantomètre, en rouge les verticales, les points noirs correspondent aux point de mesure.

moyenne, en calculant la vitesse moyenne entre les berges et les verticales les plus proches. La vitesse moyenne sur chaque verticale est calculée de la manière suivante :

$$V_{moy} = 0.1(V_s + 2V_{0.8} + 2V_{0.6} + 2V_{0.4} + 2V_{0.2} + V_{pf}) \quad (2.18)$$

On calcule ensuite une vitesse moyenne pour chaque section d’écoulement entre les verticales ou la berge la plus proche ; en faisant une moyenne pour les sections n’incluant pas les berges, et en appliquant la formule

$$V_{moy\ section} = \frac{m}{(m + 1) * V_{moy\ verticale\ la\ plus\ proche}} \quad (2.19)$$

Ici $m=10$ en raison du caractère très lisse de la goulotte. Le débit par section d’écoulement est ensuite calculé:

$$Q_{section} = V_{moy\ section} \times H_{eau\ moy} \times L_{écoulement} \quad (2.20)$$

Afin d’avoir le débit total, il suffit de sommer tous les débits par section.

Le débit total transitant par la goulotte de dévalaison pourrait être évalué par jaugeage dans la goulotte à l’aval du débouché du 3ème exutoire. Cependant, sur les sites d’étude, le jaugeage s’avère compliqué à cet endroit. En effet, les vitesses sont importantes et il est plus difficile pour l’opérateur de se tenir debout dans la goulotte.

C’est pourquoi il a été préféré d’évaluer le débit total transitant par la goulotte de dévalaison au niveau du déversoir de contrôle, à partir d’un relevé caractéristiques du déversoir (largeur, cote de déversement), de la goulotte à l’approche du déversoir (largeur, cote du fond) et de la cote du niveau d’eau à l’amont. Les différentes cotes ont été relevées à l’aide d’un tachéomètre LEICA TS02-Ultra-7" (visée d’un prisme monté sur une canne). Les cotes ont été recalées en altitude en se référant à des points repères présents sur la prise d’eau.

Pour calculer le débit total, l'outil Dever du logiciel Cassiopée a été utilisé en prenant en compte la correction liée aux vitesses d'écoulement élevées dans la goulotte à l'approche des seuils de contrôle. Le calcul nécessite de déterminer la valeur du coefficient de débit du déversoir, qui va dépendre:

- ❖ du rapport entre la largeur du déversoir et celle de la goulotte, qui dicte l'intensité des décollements latéraux. En l'occurrence, les déversoirs sont de même largeur que les goulottes en amont et il n'y a donc pas de décollements latéraux. Cela va dans le sens d'une valeur élevée du coefficient de débit;
- ❖ du rapport entre la charge sur le déversoir et la hauteur d'eau à l'amont (la différence étant la hauteur du déversoir par rapport au fond) qui dicte l'intensité du décollement vertical;
- ❖ du type et de la forme du déversoir (à crête mince ou épaisse). La détermination du coefficient de débit s'est appuyée sur les éléments du guide "hydrométrie" de l'OFB (Le Coz et al., 2011).

2.3 Simulation numérique du plan de grille

Les équations de Navier-Stokes, dans le cas d'un écoulement turbulent à surface libre, introduites dans le début de ce chapitre, sont résolues numériquement afin de modéliser l'écoulement à travers un plan de grille. Les équations 2.1 et 2.2 sont moyennées avec la décomposition de Reynolds $v_i = \bar{v}_i + v'_i$; $p = \bar{p} + p'$ comme telles:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{v}_j \bar{v}_i}{\partial x_j} = \bar{g}_i + -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{v'_i v'_j}}{\partial x_j} \quad (2.22)$$

Le nombre d'inconnues (10) étant supérieur au nombre d'équations (4), le système d'équation est donc dit ouvert. Afin de procéder à sa fermeture, les termes non linéaires ($\overline{v'_i v'_j}$) du tenseur de Reynolds peuvent être modélisés via plusieurs types de modèles (du premier ordre, du second ordre, etc.), dont un modèle de premier ordre, issu de l'hypothèse de Boussinesq qui modélise directement les tensions de Reynolds à l'aide d'une viscosité turbulente ν_t par l'équation 2.23:

$$-\overline{v'_i v'_j} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.23)$$

Ce modèle est le k-omega SST (Shear Stressed Tensor), un modèle à deux équations, adapté à l'écoulement à surface libre (Manceau, 2018) et qui s'est révélé le plus performant dans les configurations étudiées par Raynal (2013), traduit par les deux équations 2.24 et 2.25:

$$k = \frac{1}{2} \overline{v'_i v'_j} \quad (2.24)$$

$$\omega = \frac{k}{\nu_t} \quad (2.25)$$

Avec ω le taux de dissipation spécifique, k l'énergie cinétique turbulente, ν_t la viscosité cinématique turbulente.

2.3.1 Présentation de l'outil numérique

Les simulations numériques ont été réalisées avec le code OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation) qui est un code OpenSource multi-physique qui modélise des problèmes de la mécanique des fluides. Il est développé en C++ et résout les équations aux dérivées partielles par la méthode des volumes finis. Ce logiciel est utilisé dans multiples champs d'application tels que les écoulements incompressibles et compressibles et/ou multiphasiques, la combustion, le transfert thermique, etc. Il contient des solveurs spécifiques à chaque cas mais qui peuvent être modifiés selon le souhait de l'utilisateur. Le logiciel permet aussi d'effectuer le preprocessing avec les utilitaires de maillages qu'il offre (Blockmesh, Snappyhexmesh, etc.) et le post traitement via ses propres utilitaires (sample, postProcess, etc.) ou des logiciels tiers tels que Paraview ou Tecplot (Greenshield, 2018).

2.3.2 Paramètres numériques

Durant cette thèse, une partie des simulations a été effectuée avec le solveur interFoam qui résout les équations de Navier et Stokes moyennées (Reynolds-averaged Navier-Stokes) pour les écoulements diphasiques incompressibles par l'algorithme PIMPLE (*Pressure Implicit with Splitting of Operator*) couplant la pression et la vitesse, avec la méthode VOF (Volume Of Fluid) en écoulement instationnaire turbulent en trois dimensions.

La méthode VOF consiste à calculer la fraction volumique de l'eau présente dans une maille et d'établir donc la surface libre de l'écoulement. Ces simulations concernent les grilles à l'échelle du laboratoire et sont employées pour valider les vitesses en amont et en aval de la grille afin de les comparer à celles qui résultent de l'addition d'autres éléments à la grille.

Pour le cas de la simulation de la prise d'eau in situ, le solveur utilisé est simpleFoam qui résout les mêmes équations citées d'un écoulement stationnaire monophasique (dans notre cas l'eau), incompressible et turbulent avec l'algorithme SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*). Les simulations servent à valider la courantologie en amont de la grille et à observer l'attractivité des exutoires à travers la répartition des différents débits.

Géométrie

Les modèles simulés sont de deux types selon l'échelle:

❖ Géométrie à l'échelle du laboratoire:

- avec des grilles composées de barreaux: La géométrie testée à l'échelle du laboratoire est composée d'un canal de 8 m de long sur 1 m de large avec une grille inclinée à 25° (Figure 2.16). Les barreaux des deux grilles sont rectangulaires, d'une largeur 10 mm espacés de 20 mm (32 barreaux) avec 5 rangées d'entretoises noyées d'un diamètre de 20 mm.

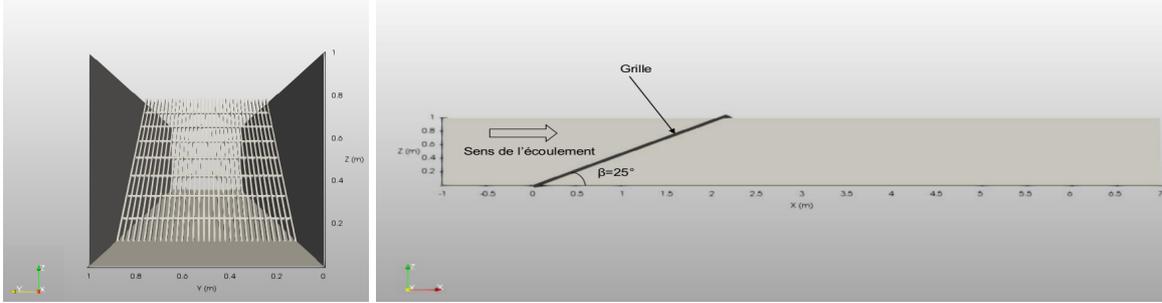


FIGURE 2.16 – Géométrie du modèle numérique du canal avec la grille inclinée à 25°(à gauche dans le plan (y,z) et à droite dans le plan en vue de côté (x,z)).

- avec un bloc de porosité: La géométrie avec deux types de blocs de porosité (volumique et surfacique) est munie d'un canal de 4 à 10 m de long sur 0.01 m de large avec une paroi poreuse ou un bloc de porosité, inclinée à (90°, 45°, 25°) (Figure 2.17) avec un coefficient de pertes de charges calculé pour des barreaux rectangulaires d'une épaisseur $b = 5$ mm, un espacement entre les barreaux $e = 5$ mm et des épaisseurs de bloc (1; 1.32; 1.5; 1.7; 2) qui conviennent à un rapport par unité de mètre de la perte de charges.

Les simulations ont été effectuées pour une même configuration afin de vérifier l'application de la loi de Darcy-Forchheimer. Cette loi concerne les écoulements à travers un milieu poreux avec prise en compte des effets inertiels rencontrés quand le nombre de Reynolds augmente. Cette loi intervient dans l'équation de quantité de mouvement en un terme source S_m . Ce terme source est explicitée dans l'équation 2.26:

$$S_m = - \left(\mu D + \frac{1}{2} \rho \text{tr}(U.I) F \right) U \quad (2.26)$$

Où $S_m = \Delta p$, le terme source pouvant s'écrire comme un gradient de pression. Si l'on projette dans le système de coordonnées cartésien, l'équation 2.26 devient:

$$\Delta p = -\mu D_i u_i - \frac{1}{2} \rho F_i |u_{kk}| u_i \Leftrightarrow \Delta p = Au + Bu^2 \quad (2.27)$$

Le terme Au est ici négligé au nombre de Reynolds considéré. Les pertes de charge dépendent donc essentiellement du terme quadratique. et le terme B est

alors directement imposé à partir du coefficient de pertes de charges mesuré ξ_{exp} de la manière suivante:

$$B = \frac{\xi_{exp} \times \rho}{2} \quad (2.28)$$

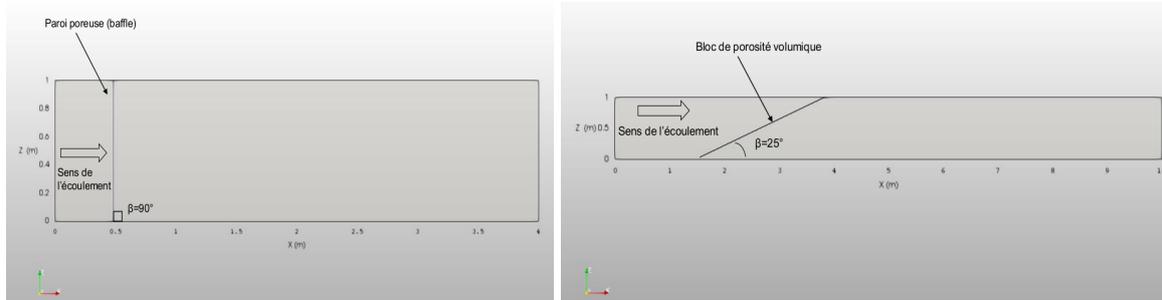


FIGURE 2.17 – Géométrie du modèle numérique du canal avec la paroi poreuse surfacique à 90°(à gauche), le bloc de porosité incliné à 25° dans le plan en vue de côté (x,z) (à droite).

- ❖ Géométrie à l'échelle de la prise d'eau in-situ, avec une grille composée de barreaux et d'exutoires de contournement: La géométrie testée à l'échelle de la prise d'eau en terrain est réalisée selon les plans de construction de la Figure 2.12.

Maillage

Les mailles ont été fixées à $T_0=2\text{cm} \times 1.6\text{cm} \times 1\text{cm}$ pour l'ensemble du canal à l'échelle du laboratoire. Selon l'échelle de grille considérée, un premier bloc est généré avec l'utilitaire BlockMesh d'openFOAM pour représenter le canal sous forme de maillage structuré. Dans un deuxième temps, la grille (ou la grille ainsi que les exutoires) sont créées en CAO avec le logiciel FreeCAD. Ce dernier permet d'exporter la géométrie de la grille en un fichier de type stéréolithographique (stl). A l'aide de l'utilitaire d'insertion et découpe de maillage snappyHexMesh fourni avec openFOAM, les modèles surfaciques de la grille et des exutoires sont soustraits du maillage initial pour constituer des frontières solides, fidèles au modèle CAO. La proximité de la surface libre ainsi que la grille ont été raffinées à $T_0/6$ comme le montre la Figure 2.18.

L'insertion d'une zone volumique poreuse a été réalisée à partir de trois blocs contigus créés par blockMesh, puis en imposant une propriété de porosité au bloc central. Le maillage s'adapte à l'endroit du bloc poreux de façon à être incliné dans notre cas. L'autre méthode utilisée consiste en l'insertion d'une interface poreuse et est réalisée par la définition d'une frontière interne (baffle) séparant deux blocs maillés, et à laquelle on affecte une propriété de porosité.

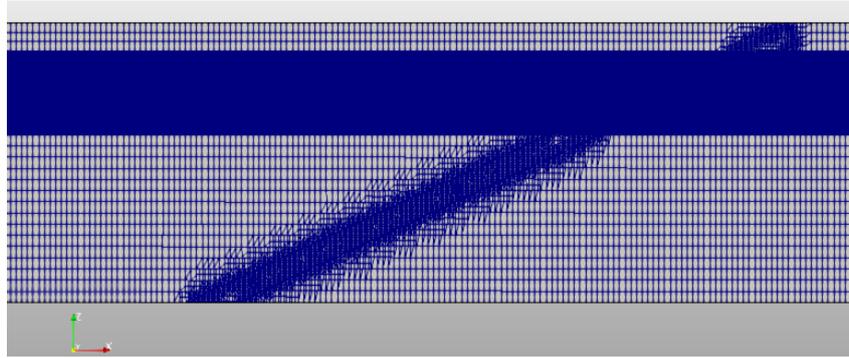


FIGURE 2.18 – Maillage zoomé de la grille inclinée dans le plan (x,z) avec la zone de raffinement.

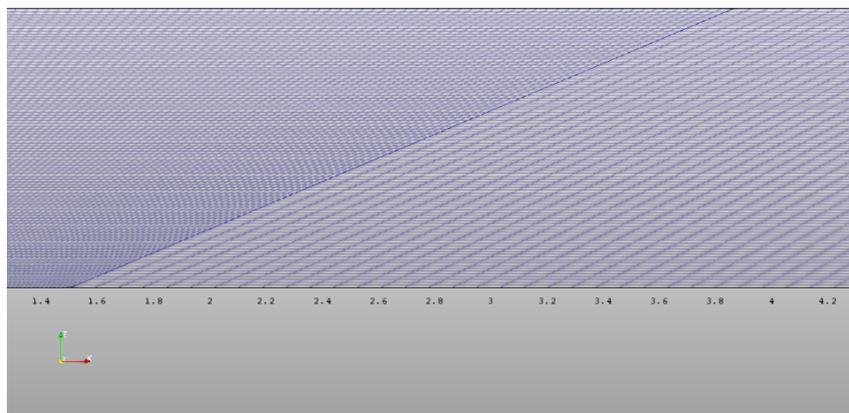


FIGURE 2.19 – Maillage zoomé du bloc de porosité dans le plan vertical (x,z) .

Conditions aux limites et paramètres hydrauliques

Les conditions aux limites imposées aux simulations sont les conditions prédéfinies dans OpenFoam. Ces conditions sont : pour la vitesse : une condition de Dirichlet (D) en entrée, un non glissement pour le fond et les parois, une entrée-sortie pour l'atmosphère, un non glissement pour la grille et une condition de Neuman homogène (N) en sortie; pour la pression : une condition de Dirichlet (D) en atmosphère et un flux fixe pour le reste des conditions. Pour les variables $(k, \omega$ et $\alpha)$, en entrée une condition de Dirichlet (D) est imposée, en sortie une condition de Neuman homogène (N), pour le fond, les parois et la grille, des lois de paroi et pour l'atmosphère une entrée-sortie. Elles sont répertoriées dans les tableaux 2.3 et 2.4.

Le modèle de turbulence choisi est le k - ω SST comme cité au début de cette section. Le choix du modèle de turbulence a été fixé selon l'étude effectuée par Raynal (2013). En effet, ce modèle est le plus adapté pour le type d'écoulement testé pour une intensité de turbulence à l'entrée de 5% (à l'échelle du laboratoire) et 1% (à l'échelle de la centrale) et un nombre de Reynolds turbulent de 1 pour les deux. Toutefois, Raynal (2013) a démontré que les intensités turbulentes de 1% et 5% donnent le même résultat.

TABLEAU 2.3 – Tableau récapitulatif des conditions aux limites pour les simulations diphasiques. (α : Fraction de l'eau; k : énergie cinétique turbulente; ω : taux de dissipation spécifique; Valeur fixe (Dirichlet) : D; NG: Non glissement; ES: Entrée-sortie; Flux fixe: FF; Gradient nul (Neuman homogène): N; Loi de paroi: LP)

	Entrée	Sortie	Fond	Parois	Atmosphère	Grille
Vitesse	D	N	NG	NG	ES	NG
Pression	FF	FF	FF	FF	D	FF
α	D	N	N	N	ES	N
k	D	N	LP	LP	ES	LP
ω	D	N	LP	LP	ES	LP

Les conditions à l'échelle de la prise d'eau sont: pour la vitesse: une valeur fixe en entrée, un non glissement pour les parois et la grille, une symétrie pour l'atmosphère et le fond, une valeur fixe pour la sortie de goulotte et un gradient nul en sortie; pour la pression: une valeur fixe en entrée, un non glissement pour les parois et la grille, une symétrie pour l'atmosphère et le fond, une gradient nul pour la sortie de goulotte et un gradient nul en sortie. Pour les variables (k et ω), en entrée une valeur fixe est imposée, en sortie une entrée-sortie, une symétrie pour le fond et l'atmosphère et une loi de paroi pour la grille et les parois.

TABLEAU 2.4 – Tableau récapitulatif des conditions aux limites pour les simulations monophasiques. (k : énergie cinétique turbulente; ω : taux de dissipation spécifique; Valeur fixe (Dirichlet): D; NG: Non glissement; ES: Entrée-sortie; Gradient nul (Neuman homogène): N; Loi de paroi: LP)

	Entrée	Sortie canal	Fond	Parois	Atmosphère	Grille	Sortie goulotte
Vitesse	D	N	Symétrie	NG	Symmetrie	NG	D
Pression	D	N	Symétrie	NG	Symmetrie	NG	N
k	D	ES	Symétrie	LP	Symmetrie	LP	D
ω	D	ES	Symétrie	LP	Symmetrie	LP	D

La différence entre les deux tableaux est la condition aux limites pour l'atmosphère en l'absence de surface libre pour la simulation en monophasique. Le modèle de turbulence reste le même et les conditions aux parois et à la grille sont inchangées. De plus, la sortie de la goulotte est ajoutée dans la simulation de la prise d'eau.

Les valeurs des paramètres sont détaillées dans le tableau 2.5:

TABLEAU 2.5 – Paramètres hydrauliques imposés. (Hauteur d'eau:HE)

	Vitesse	HE	k	ω	\mathbf{R}_{eb}	Fr
Modèle du laboratoire	0.7 ms ⁻¹	0.7 m	7.3E-05	1837	3500	0.267
Modèle de la prise d'eau	0.8 ms ⁻¹	2.12 m	0.0024	2400	24000	0.175

2.3.3 Validation d'un modèle numérique de l'écoulement à travers une grille

Les résultats des simulations diphasiques à l'échelle du laboratoire sont présentés dans cette section. Ces résultats concernent les vitesses en amont et en aval de la grille et la hauteur d'eau pour les pertes de charges des blocs de porosité. Ces tests nous ont permis l'élaboration et la mise en place des simulations en trois dimensions, l'éventuelle optimisation du maillage et la détermination des limites de ce modèle.

La grille inclinée

La grille simulée est la grille inclinée à 25° avec un espacement entre les barreaux de 20 mm et une largeur de barreaux de 10 mm, avec barres d'entretoises. Cette configuration a été choisie après avoir été validée, expérimentalement et in-situ, pour son efficacité.

La Figure 2.20 présente la comparaison des profils de vitesses normalisées, expérimentaux et numériques. Ces profils sont extraits à la distance de 50 mm en amont de la grille et à 400 mm en aval de la grille. Ils concernent la vitesse axiale V_x , la vitesse tangentielle V_t , la vitesse normale V_n et le ratio entre la vitesse tangentielle et normale V_t/V_n .

Les profils expérimental et numérique normalisés de la vitesse axiale V_x se superposent et sont de même ordre de grandeur que la vitesse V_o . Les décélérations dues aux rangées d'entretoises sont plus visibles sur le profil numérique. Il y a une légère accélération en partie haute du profil numérique pour Z/H de 0.7 à 0.8. Les profils expérimental et numérique normalisés de la vitesse normale V_n et de la vitesse tangentielle V_t sont très similaires aussi. La démarcation des barres d'entretoises persiste sur ces profils. Le profil expérimental du ratio V_t/V_n est décalé du numérique du fait de la diminution de la vitesse tangentielle et l'effet des entretoises s'intensifie. En conclusion, la simulation reproduit la courantologie en amont de la grille.

La Figure 2.21 présente la comparaison des profils de vitesses normalisées, expérimentaux et numériques. Ces profils sont extraits à la distance de 400 mm en aval de la grille (Figure 2.17). Ils concernent la vitesse axiale V_x . Le profil expérimental normalisé de la vitesse axiale V_x est proche du profil numérique hormis une accélération au centre du profil numérique.

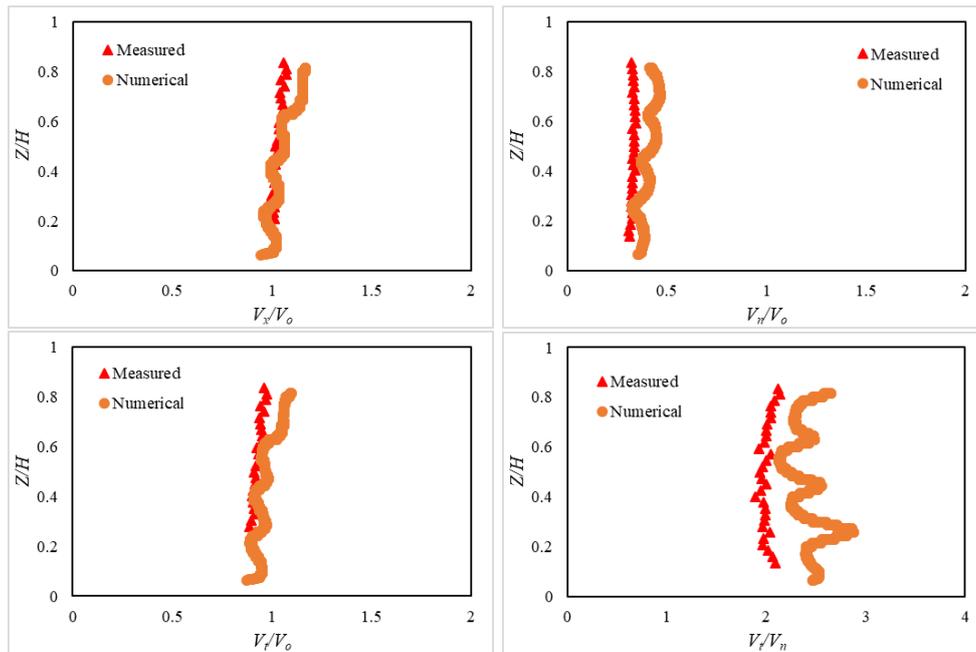


FIGURE 2.20 – Comparaison des profils expérimentaux et numériques des vitesses normalisées: axiale V_x , normale V_n , tangentielle V_t et du ratio V_t/V_n , situés à 50 mm en amont de la grille.

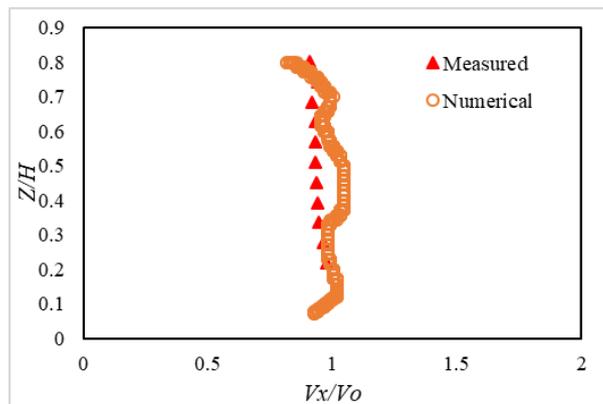


FIGURE 2.21 – Comparaison des profils expérimentaux et numériques des vitesses normalisées axiale V_x , situé à 400 mm en aval de la grille.

Les blocs ou surface de porosité

Les blocs de porosité ont été employés afin de substituer la grille. Ces essais concernent principalement la hauteur d'eau afin de calibrer le coefficient de pertes de charges en fonction des résultats obtenus expérimentalement. Les simulations comprenant des zones ou interfaces de porosité ont été réalisées en diphasique comme en monophasique. La largeur du canal a été réduite à 0.01 m afin de réduire le maillage permettant de réaliser un temps de calcul court. Les paramètres hydrauliques tels que la vitesse, la hauteur d'eau ainsi que les nombres de Reynolds et de Froude sont maintenus constants.

Surface de porosité

La surface de porosité est paramétrée dans openFoam à l'aide d'un coefficient de Forcheimer linéique et d'une épaisseur virtuelle. Différentes combinaisons de ces deux paramètres peuvent donc théoriquement donner une même perte de charge à la traversée de l'interface. La grille substituée est une grille droite $\alpha = \beta = 90^\circ$, à barreaux d'épaisseur 5 mm espacés de 5 mm. La hauteur d'eau est de 0.7 m, la vitesse de 0.72 ms^{-1} et le débit de $0.0049 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Deux paramètres ont ensuite variés: la longueur du canal (L_g) et l'épaisseur de la surface poreuse (E) afin de retrouver numériquement le coefficient imposé.

En fonction de l'emplacement de l'extraction de la pression pour le calcul du coefficient de pertes de charges, celui-ci varie. En effet, trois méthodes ont été employées. En premier lieu, la hauteur d'eau a été extraite sur la surface libre aux mêmes emplacements amont et aval que ceux expérimentaux. En deuxième lieu, la pression a été extraite au fond du canal en admettant que la vitesse est nulle. En troisième lieu, la pression a été extraite à $z = 0.7 \text{ m}$ qui correspond à la hauteur d'eau imposée.

Le tableau résume 2.6 les essais effectués selon l'emplacement et le pourcentage d'erreur obtenu.

TABLEAU 2.6 – Tableau récapitulatif du coefficient de pertes de charges numérique obtenu pour les configurations testées: ξ_{num1} pour l'emplacement à la surface libre, ξ_{num2} pour la pression au fond du canal, ξ_{num3} pour la pression à la surface libre.

Lg (m)	E	ξ_{exp}	ξ_{num1}	Erreur (%)	ξ_{num2}	Erreur (%)	ξ_{num3}	Erreur (%)
1	1.0	2.28	3.09	35.74	2.18	4.36	2.19	3.71
1	1.0	4.55	7.24	58.94	3.84	15.77	4.59	0.72
1	1.0	6.51	7.63	17.29	5.19	20.24	6.61	1.63
4	1.0	4.55	3.11	31.62	2.43	46.74	2.72	40.38
4	1.0	4.55	2.92	35.91	2.51	44.82	2.49	45.41
4	1.3	4.55	3.23	29.13	3.07	32.51	3.42	24.93
4	1.5	4.55	4.71	3.36	3.63	20.19	3.70	18.79
4	1.7	4.55	4.02	11.67	3.85	15.46	3.99	12.36
4	2.0	4.55	5.33	17.00	4.28	5.98	4.51	1.02

Le tableau 2.6 montre la dépendance du coefficient de pertes de charges à plusieurs facteurs. En effet, le calibrage du coefficient est sensible à la longueur du canal, à l'épaisseur de la surface et à l'emplacement de la pression. De ce fait, le modèle est limité quant à la prédiction de la perte de charges.

L'estimation de la perte de charge à partir de l'identification de la surface libre est la méthode la moins fiable, bien que plus immédiate à mettre en correspondance avec

les résultats expérimentaux. Il peut être avancé dès lors que la fraction volumique d'eau s'éloigne de l'unité et que sa transition entre 0 et 1 s'effectue sur quelques mailles, la localisation de la surface libre devient très dépendante du seuil choisi. En comparaison, les résultats obtenus par la mesure de pression en fond de canal ou à proximité de la surface libre semblent plus fiables en moyenne, mais restent entachés d'erreurs dont les niveaux peuvent fortement varier.

Volume de porosité

Les simulations avec un volume de porosité ont été effectuées avec le même modèle numérique. La seule différence est que la variable B est constituée de trois composante qui peuvent être appliqués individuellement différemment selon trois directions privilégiées de l'espace. Ceci permet notamment de tenir compte de l'anisotropie de la grille physique, et d'adapter B à l'inclinaison ou l'orientation du volume, chose non réalisable dans le cas de la surface de porosité. Dans ce sens, deux inclinaisons de grille ont été testées ($\beta = 25^\circ$ et 45°) pour des barreaux de largeur $b = 5$ mm, espacés de 10 mm. Les mêmes méthodes d'extraction ont été employées.

TABLEAU 2.7 – Tableau récapitulatif du coefficient de pertes de charges numérique obtenu pour les configurations testées: ξ_{num1} pour la pression au fond du canal, ξ_{num2} pour la pression à la surface libre.

Lg (m)	p (mm)	ξ_{exp}	ξ_{num1}	Erreur (%)	ξ_{num2}	Erreur (%)
3	0.04	1.026	0.43	58.23	0.92	10.08
10	0.04	0.78	0.81	4.23	1.16	49.14

Le tableau 2.7 montre que le coefficient de pertes de charges des grilles inclinées sont estimables numériquement. Toutefois, les résultats demeurent inhomogènes, du fait notamment de l'insertion d'une zone de porosité n'améliore donc pas nécessairement la modélisation approchée de la grille par comparaison avec l'utilisation d'une interface de porosité.

2.4 Bilan

Divers outils permettant la description de l'écoulement à travers les grilles ont été détaillés (sondes à ultrason, ADV, ADCP et courantomètre électromagnétique). Ces moyens expérimentaux et numériques permettent la caractérisation de la courantologie de la grille et des pertes de charge associées pour multiples configurations (en laboratoire ou in-situ).

Les grilles inclinées

Sommaire

3.1	Mesure et modélisation des pertes de charge en laboratoire	65
3.1.1	Coefficient de forme du barreau	65
3.1.2	Coefficient des supports transversaux	72
3.2	Modélisation numérique de la vitesse à travers les grilles inclinées avec des supports	77
3.3	Mesure et modélisation numérique de la vitesse in situ	82
3.3.1	Conditions de fonctionnement de la prise d'eau au moment des me- sures	82
3.3.2	Courantologie en amont des grilles	82
3.3.3	Attractivité des exutoires	88
3.4	Bilan	91

Dans ce chapitre, nous allons aborder les grilles inclinées. Ces grilles ont été étudiées en laboratoire par Raynal et al. (2013a) puis implémentées au niveau de certaines centrales hydroélectriques en France avec succès selon Tomanova et al. (2018). Cependant, l'étude réalisée durant cette thèse concerne l'amélioration et l'optimisation de ces grilles. Dans ce sens, le barreau, constituant essentiel de la grille, est testé pour différentes formes puis les pertes de charge associées sont modélisées. La présence de structures de maintien derrière la grille provoque des pertes d'énergie supplémentaires. Nous avons donc mesuré et modélisé la perte générée par ces structures et proposé de la réduire avec une structure profilée. L'influence des différents éléments sur les champs de vitesse est étudié en amont et en aval des grilles à partir de l'outil numérique. Parallèlement, la grille implantée à la centrale de Las Rives a fait l'objet de mesures in situ dans le but de caractériser la courantologie en amont de celle-ci. Ces mesures sont ensuite comparées à un modèle numérique de la centrale destiné au développement d'outils de prédiction.

3.1 Mesure et modélisation des pertes de charge en laboratoire

Cette première partie s'intéresse à la mesure et la modélisation en laboratoire des pertes de charge des grilles inclinées avec différents barreaux et avec les éléments de support additionnels. Pour chaque sous partie, les résultats expérimentaux et la modélisation associée sont présentés.

3.1.1 Coefficient de forme du barreau

Dans le but d'étendre la gamme d'application du modèle proposé par Raynal et al. (2013a), qui prédit les pertes de charge des grilles inclinées pour des barreaux rectangulaires et hydrodynamiques, de nouveaux profils de barreaux, avec des formes différentes sont testés. Les grilles sont composées de trois éléments (Figure 3.1): les barreaux, les entretoises et les éléments de supports latéraux. Quatre nouveaux profils de barreaux sont testés: Goutte d'eau, Plétina, Têtard 8 et Têtard 10. Ces profils sont déjà commercialisés par la société ALR et ont été fournis gracieusement par la société. Les formes hydrodynamiques (PH) et rectangulaires (PR) proposées et modélisées dans (Raynal et al., 2013a) sont comparées à ces profils aussi.

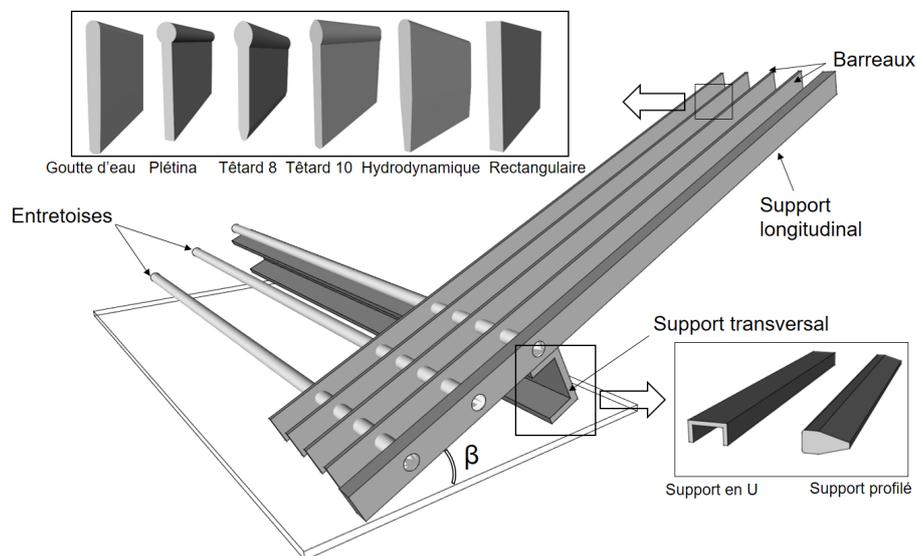


FIGURE 3.1 – Composants des grilles (barreaux, entretoises, supports transversaux et longitudinaux) et profils de barreaux testés.

Les nouveaux profils de barreaux étudiés (Goutte d'eau, Plétina, Têtard 8 et Têtard 10) sont en acier et les barreaux rectangulaire et hydrodynamique sont en PVC. Ils sont représentés sur la Figure 3.2 et leurs paramètres respectifs sont répertoriés dans les tableaux 3.1 et 3.2.

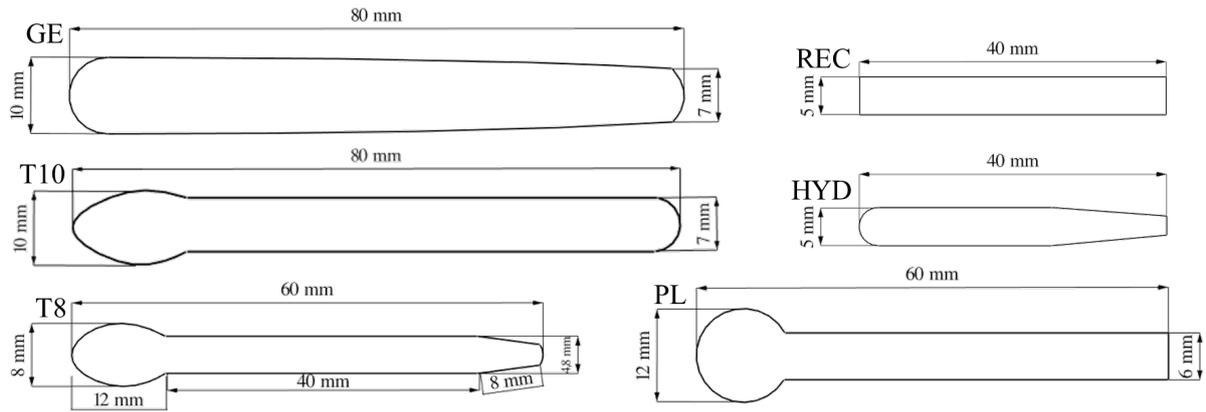


FIGURE 3.2 – Dimensions des barreaux: largeur (b) et profondeur (p) (Goutte d'eau: GE, Plétina: PL, Têtard 8: T8, Têtard 10: T10, Rectangulaire: REC, Hydrodynamique: HYD).

En fonction des deux épaisseurs d'entretoise (21.2 mm / 31.8 mm) et de la dimension du barreau, chaque grille possède un espacement (e) caractéristique entre les barreaux: Goutte d'eau (20.2 mm / 30.8 mm), Plétina (17.2 mm / 27.8 mm), Têtard 8 (18.2 mm / 28.8 mm), Têtard 10 (18.2 mm / 28.8 mm), pour un diamètre d'entretoise égal à 30 mm.

TABLEAU 3.1 – Formes de barreaux testées dans l'écoulement et poids de la grille associée pour les deux espacements (e).

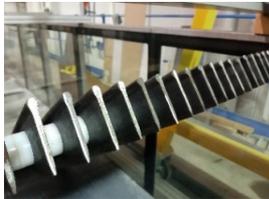
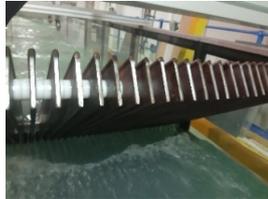
GE	PL	T8	T10
			
218.5 et 297.9 Kg	155.3 et 225.9 Kg	152.1 et 212.9 Kg	220.1 et 310.2 Kg

TABLEAU 3.2 – Paramètres des barreaux (b et p) pour les différents profils de barreaux.

Profil de barreau	Largeur maximale b (mm)	Profondeur p (mm)	e/b (-)	Espacement e (mm)
Goutte d'eau	10	80	2 / 3.1	20.2 / 30.8
Plétina	12	60	1.4 / 2.3	17.2 / 27.8
Têtard 8	8	60	2.3 / 3.6	18.2 / 28.8
Têtard 10	10	80	1.8 / 2.9	18.2 / 30.8
Hydrodynamique	5	40	1 / 2 / 3 / 4	5 / 10 / 15 / 20
Rectangulaire	5	40	1 / 2 / 3 / 4	5 / 10 / 15 / 20

Coefficient de pertes de charge expérimental

Le coefficient de perte de charge est représenté selon l'angle d'inclinaison β de la grille ($15^\circ/25^\circ/35^\circ/45^\circ/60^\circ/90^\circ$). La Figure 3.3 montre que le coefficient de perte de charge maximal augmente avec l'angle d'inclinaison, de 0.4 (15°) à 1.4 (90°) pour la forme de barreau Plétina avec un espacement de 17,2 mm. Le coefficient minimal de perte de charge augmente avec l'angle d'inclinaison, de 0.1 à 0.7 pour la forme Têtard 8 avec un espacement de 28.8 mm. La tendance suivie par les points mesurés est similaire entre les différentes formes de barreaux: les pertes de charge diminuent avec l'angle de l'inclinaison et augmentent avec la diminution de l'espacement. Cependant, pour l'angle 15° , une augmentation systématique, plus ou moins importante, est remarquée, liée au nombre de barres d'entretoise et de leur apport dans l'obstruction de la grille.

Les pertes de charge les plus faibles sont obtenues pour le profil Têtard dont la réduction progressive de largeur en aval du bord d'attaque et au bord de fuite permet de limiter la perte d'énergie tout en maintenant un taux d'obstruction élevé.

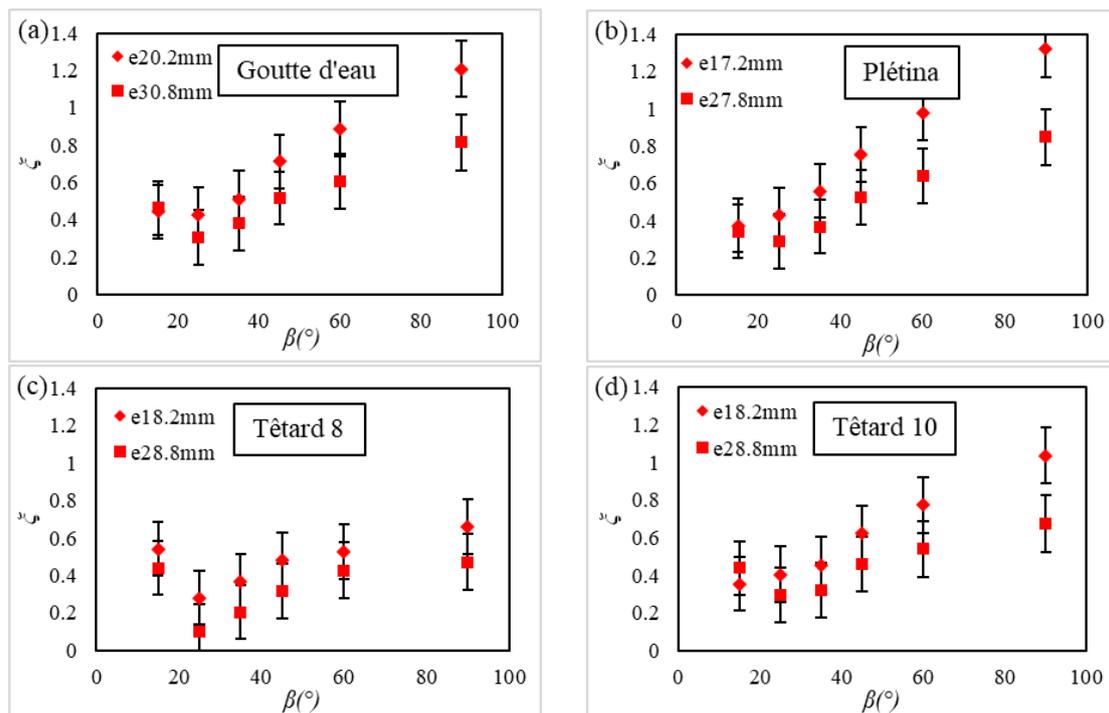


FIGURE 3.3 – Comparaison des coefficients de pertes de charge mesurés ξ pour les 4 profils de barreaux((a) Goutte d'eau, (b) Plétina, (c) Têtard 8, (d) Têtard 10) et pour les deux espacements entre les barreaux, en fonction de l'angle d'inclinaison β .

Coefficient de pertes de charge modélisé

La deuxième étape consiste à modéliser chaque forme de barreau par un coefficient spécifique. Raynal et al. (2013a) ont établi une formule évaluant les coefficients de pertes de charge générées par les grilles inclinées, présentée dans l'équation 3.1.

$$\begin{aligned}\xi_{Raynal} &= \xi_{barreaux} + \xi_{entretoises} \\ \xi_{barreaux} &= A_i \left(\frac{O_b}{1 - O_b} \right)^{1.65} \sin^2 \beta = A_i \times K_b \times K_\beta \\ \xi_{entretoises} &= C \left(\frac{O_{sp,H}}{1 - O_{sp,H}} \right)^{0.77} = C \times K_e\end{aligned}\tag{3.1}$$

Avec: $O_b = \frac{N_b \times b}{B}$: et : $O_{sp,H} = (1 - O_b) \frac{N_{sp} \times D_{sp}}{H_1}$; A_i est le coefficient du barreau (-), O_b le degré d'obstruction dû aux barreaux (-), $O_{sp,H}$ le degré d'obstruction des entretoises sur la hauteur d'eau amont (-), N_b le nombre de barreau (-), b la largeur du barreau (m), H_1 la hauteur d'eau amont (m), N_{sp} le nombre de barres d'entretoises (-), D_{sp} le diamètre des entretoises (m), B la largeur du canal (m), β l'angle d'inclinaison ($^\circ$) et $C = 1.79$ coefficient de forme des entretoises (-).

Partant de cette équation, le coefficient de forme du barreau est modélisé par A_i . Raynal et al. (2013a) ont déterminé $A_i = 3.85$ pour les barreaux rectangulaires et $A_i = 2.10$ pour les barreaux hydrodynamiques. Pour chaque profil de barreau, les termes $\xi_{entretoises}$ and $\xi_{barreaux}$ sont calculés selon les paramètres décrits. Ensuite, le coefficient de pertes de charge dû aux entretoises $\xi_{entretoises}$ est soustrait du coefficient de pertes de charge total ξ_{Raynal} .

Les résultats de la régression linéaire effectuée entre $K_b \times K_\beta$ et $\xi_{barreaux}$ pour déterminer le coefficient A_i sont représentés dans la Figure 3.4 et résumés dans le tableau 3.3. Le niveau élevé de corrélation entre le modèle et les résultats expérimentaux démontre effectivement que le coefficient dû aux barreaux $\xi_{barreaux}$ augmente linéairement en fonction $K_b \times K_\beta$ ce qui valide l'identification du coefficient A_i . Les différents coefficients déterminés peuvent être comparés aux résultats précédemment obtenus pour la forme rectangulaire, la plus défavorable avec un coefficient de 3.85, et la forme hydrodynamique qui avait permis de réduire ce coefficient à 2.10. Les formes Têtard 10, Plétina et Têtard 8 permettent notamment de réduire le coefficient A_i à 1.79, 1.75 et 1.27, respectivement, alors que la forme goutte d'eau le remonte à 2.47.

TABLEAU 3.3 – Coefficient de forme des barreaux testés (Goutte d'eau: GE; Plétina: PL; Têtard 8: T8; Têtard 10: T10; Hydrodynamique: HYD; Rectangulaire: REC).

Forme du barreau	GE	PL	T8	T10	HYD	REC
Coefficient A_i	2.47	1.75	1.27	1.79	2.10	3.85
Ratio (%)	64.2	45.5	33	46.5	54.5	100

Pour conclure, les profils Têtard 10, Plétina et Têtard 8 sont des alternatives particulièrement adaptées à la réduction des pertes de charge à travers les grilles, car elle aboutissent à des diminutions de 53.5%, 54.5% et 67% du coefficient de forme par rapport à un barreau rectangulaire (Tableau 3.3).

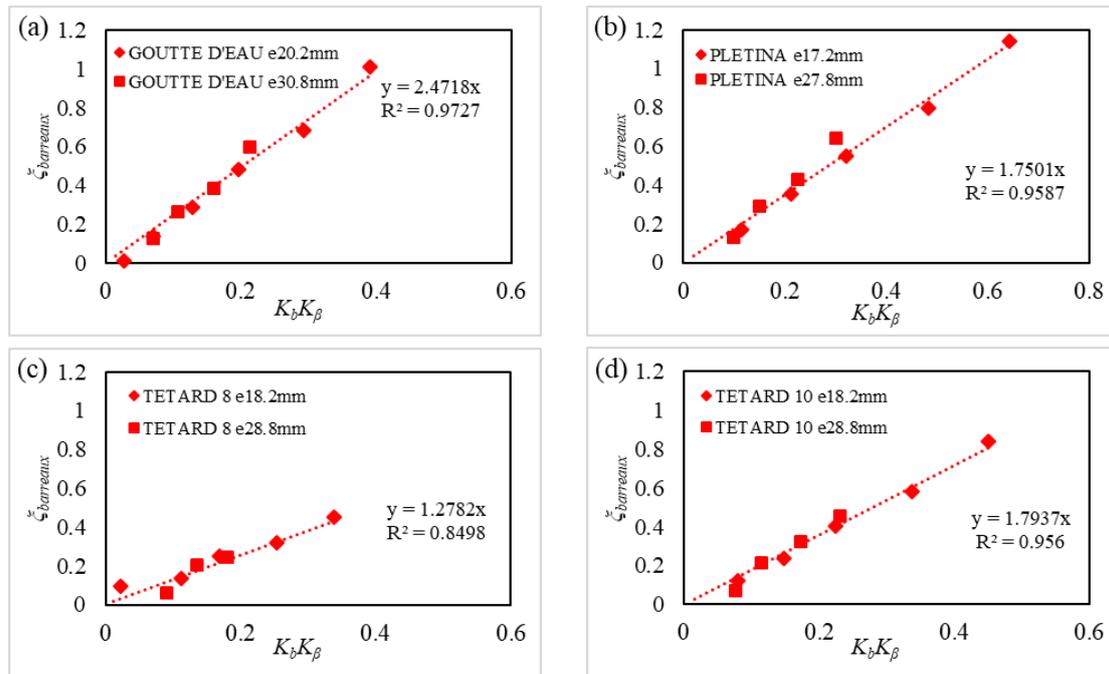


FIGURE 3.4 – Régression linéaire entre le coefficient des barreaux ξ_{barreaux} pour les 4 formes de barreaux ((a) Goutte d'eau, (b) Plétina, (c) Têtard 8, (d) Têtard 10) en fonction de $K_b \times K_\beta$.

Comparaison avec la littérature

Quelques auteurs se sont focalisés sur la forme des barreaux dans leur étude des grilles. La première étude par Kirschmer (1926) a été reprise dans la plupart des modélisations ultérieures. Ce coefficient a été déterminé dans le cas d'une configuration d'une grille droite ($\beta=90^\circ$). Il a été ensuite adapté selon la modélisation de la formule globale de pertes de charge. Plusieurs des auteurs qui ont travaillé sur ces formules ont aussi repris les coefficients de Kirschmer (1926) sans les changer. Hormis l'aspect du barreau et la structure de la formule générale du coefficient de pertes de charge total, le coefficient de forme varie en fonction des dimensions du barreaux: sa profondeur (p) et sa largeur (b).

Récemment, Meister et al. (2020a) ont étudié plusieurs formes de barreaux différentes (Figure 3.5). Nous avons donc procédé à la comparaison des profils de barreaux testés à ces formes en partant de la formule de Meister et al. (2020a) et en identifiant les coefficients correspondants avec les mesures effectuées lors de cette étude, résumés dans le tableau 3.4.

La Figure 3.6 représente la régression linéaire entre les coefficients mesurés et modélisés à travers la formule de Meister et al. (2020a). Le coefficient de détermination est faible et varie de 0.47 à 0.73. Il montre que la formule de Meister et al. (2020a) ne prédit pas fidèlement les mesures effectuées pour les différents barreaux. Puisque l'intervalle d'angles mesuré par Meister et al. (2020a), pour la plupart des formes, est de 30° à 45° ,

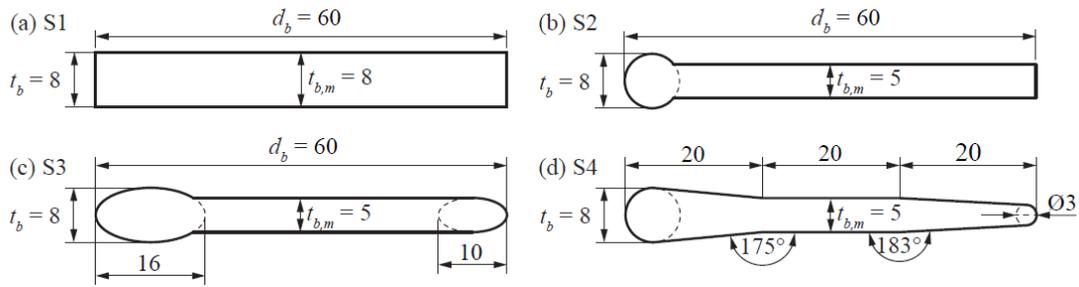


FIGURE 3.5 – Profils de barreaux testés par Meister et al. (2020a).

TABLEAU 3.4 – Coefficient A_i déterminé à partir de la formule de Meister et al. (2020a) des formes de barreaux testés (Goutte d'eau: GE; Plétina: PL; Têtard 8: T8; Têtard 10: T10).

Forme du barreau	GE	PL	T8	T10	S1	S2	S3	S4
Meister et al. (2020a)	1.27	1.13	0.9	1.05	1.13	0.83	0.67	0.64

nous avons donc limité la prédiction à cet intervalle là, donnant de nouveaux coefficients (tableau 3.5), et donc la régression linéaire entre la mesure et la modélisation est représentée sur la Figure 3.7. Elle montre que la modélisation restreinte à la plage de données mesurées améliore la prédiction mais dont les corrélations demeurent moyennes de 0.67 à 0.85.

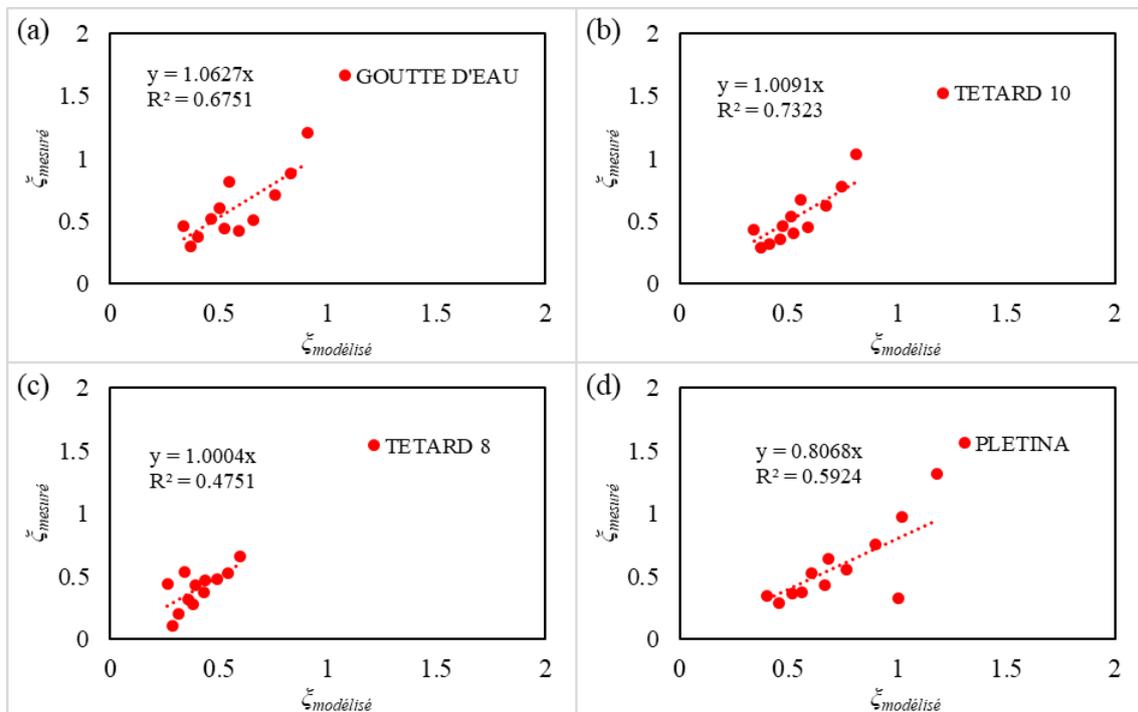


FIGURE 3.6 – Régression linéaire entre le coefficient de pertes de charge mesuré $\xi_{mesuré}$ et le coefficient de pertes de charge modélisé $\xi_{modélisé}$ à partir de la formule de Meister et al. (2020a) : (a) Goutte d'eau et (b) Têtard 10 (c) Têtard 8 (d) Plétina de 30 ° à 45 °.

TABLEAU 3.5 – Coefficient A_i déterminé à partir de la formule de Meister et al. (2020a) des formes de barreaux testés de 30 ° à 45 °.

Forme du barreau	GE	PL	T8	T10	S1	S2	S3	S4
Meister et al. (2020a)	1.05	0.96	0.72	0.88	1.13	0.83	0.67	0.64

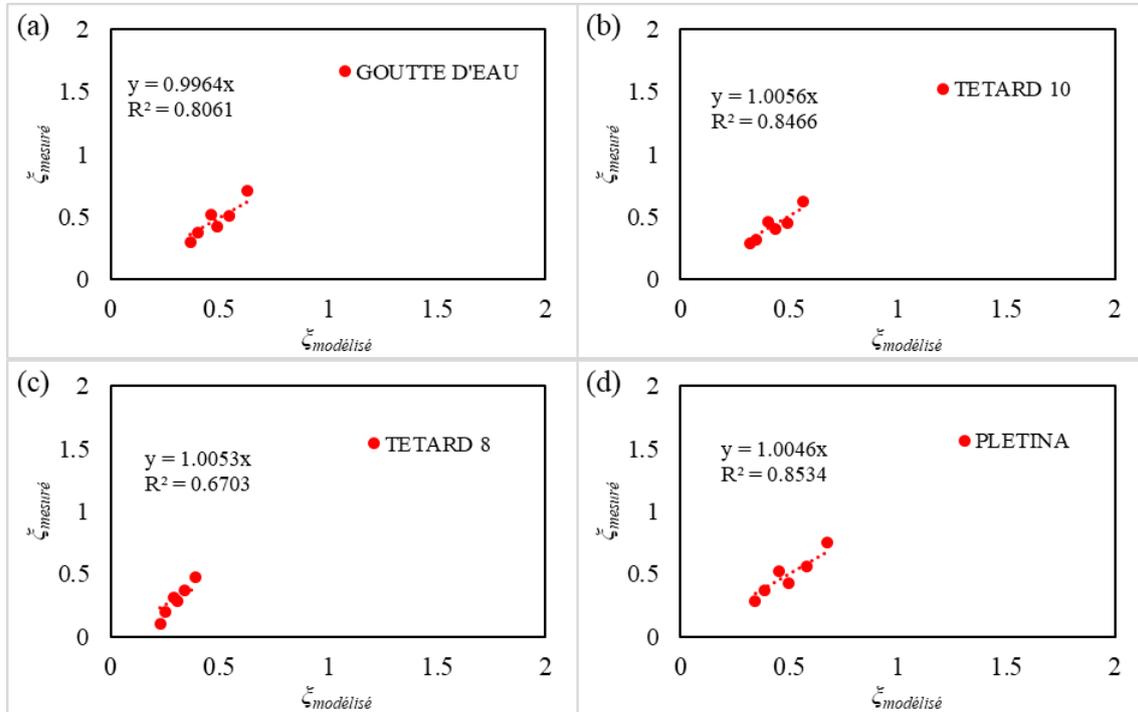


FIGURE 3.7 – Régression linéaire entre le coefficient de pertes de charge mesuré $\xi_{mesuré}$ et coefficient de pertes de charge modélisé $\xi_{modélisé}$ à partir de la formule de Meister et al. (2020a) : (a) Goutte d'eau et (b) Têtard 10 (c) Têtard 8 (d) Plétina pour les angles de 30° à 45 °.

Ensuite, nous avons recalculé le coefficient de forme de barreau pour chaque profil à partir de la formule de Raynal et al. (2013a) des grilles inclinées dans la mesure où l'approche de la formulation du coefficient des pertes de charge global de Meister et al. (2020a) est différente de celle de Raynal et al. (2013a).

Le tableau 3.6 présente les coefficients de barreaux testés par Meister et al. (2020).

La comparaison de ces derniers avec les profils testés lors de cette thèse montre:

- Pour une même forme rectangulaire, le profil S1 a un coefficient sensiblement inférieur à celui testé dans cette thèse, en raison de son allongement qui limite le développement de couches limites entre les barreaux.
- La forme S2 et la forme Plétina sont semblables hormis la différence au niveau de l'épaisseur (b) du barreau (respectivement 8 et 12 mm). Cette différence se caractérise par des coefficients distincts (respectivement 1.55 et 1.75), ce qui indiquent que la

TABLEAU 3.6 – Coefficient de forme des barreaux testés par Meister et al. (2020a), calculé avec la formule de Raynal et al. (2013a) avec les barreaux testés lors de cette étude.

Forme du barreau	S1	S2	S3	S4	PL	T8	T10	GE
Coefficient A_i	3.38	1.55	1.19	1.05	1.75	1.27	1.79	2.47

transition entre un profil circulaire et un profil rectangulaire doit être maintenue dans un rapport d'aspect limité.

- Les formes S3 et S4 présentent des coefficients inférieurs aux coefficients de Têtard 10 et Têtard 8. Les profils S3 et T8 étant très proches géométriquement, leurs coefficients sont logiquement voisins. Les différences observées confirment que la variation d'épaisseur qui suit le bord d'attaque influe sur les pertes énergétiques. Le profil S4 dont le coefficient est 4% inférieur confirme cet effet, dont la limite reste à trouver dans la mesure où la transition vers un profil goutte d'eau augmenterait la perte de charge.

3.1.2 Coefficient des supports transversaux

Les grilles classiques sont généralement presque verticales et perpendiculaires à la direction de l'écoulement. Pour le guidage du poisson vers les exutoires de contournement, il est désormais recommandé d'incliner les grilles ou de les orienter. Par conséquent, la taille et le nombre d'éléments transversaux (entretoises entre les barreaux et les supports) sont considérables pour supporter correctement la grille. Mais l'effet de ces éléments transversaux sur les pertes de charge est encore inexploré, voire ignoré dans les formules existantes. Les supports ont été principalement testés dans le domaine de la conception aérodynamique. En effet, Scruton et Newberry (1963) ont étudié l'effet du vent sur diverses formes, y compris les formes en U et profilée. L'effet de ces structures en tant que structure de support dans les écoulements hydrodynamiques n'a pas été étudié jusqu'à présent, notamment en tant que composant des grilles. Dans cette partie, nous allons quantifier et modéliser l'effet des supports transversaux. Les supports choisis sont de même largeur et sous une forme classique de U, d'une part, ou profilés de façon à en affiner le bord de fuite, d'autre part (Figure 3.8).

Coefficient de pertes de charge expérimental

Les grilles inclinées sont testées avec ces deux supports transversaux (Figure 3.9). Les résultats des coefficients de perte de charge mesurés sont présentés, à chaque fois avec et sans les supports, pour deux espacements entre les barreaux (10 et 15 mm), une largeur

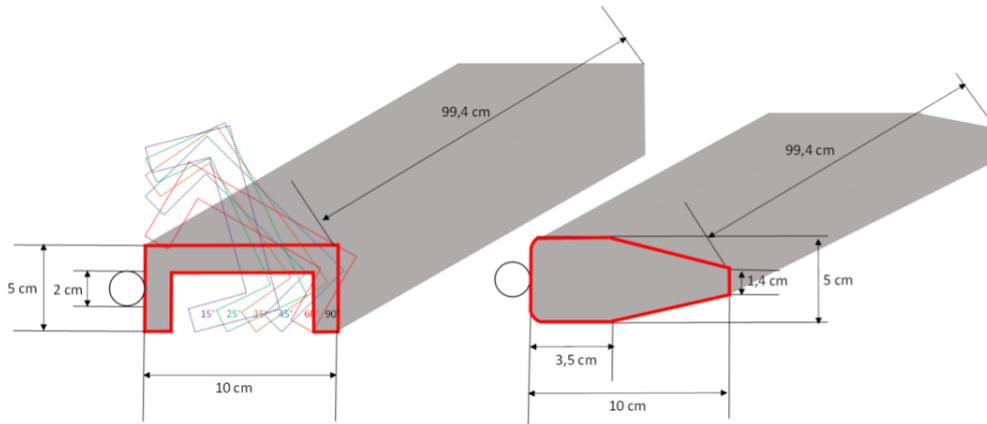


FIGURE 3.8 – Dimensions des supports transversaux: en U à gauche et profilé à droite placée derrière une rangée d'entretoises.

de barreau $b = 5 \text{ mm}$ et deux formes de barreau (rectangulaire (PR) et hydrodynamique (PH)), pour observer l'effet de ces structures sur la perte de charge globale.

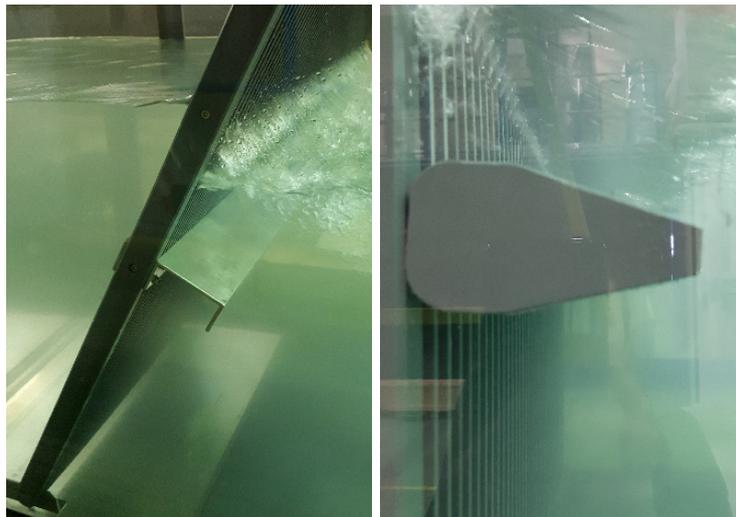


FIGURE 3.9 – Les supports utilisées dans l'écoulement (à gauche la forme en U et à droite la forme profilée).

Comparaison avec et sans support en U

La Figure 3.10 montre le coefficient de pertes de charge en fonction de l'inclinaison β ($15^\circ / 25^\circ / 35^\circ / 45^\circ / 60^\circ / 90^\circ$) et l'espacement e (10 mm/15 mm) entre les barreaux pour les deux profils de barreau (rectangulaire et hydrodynamique) avec et sans support en U. L'analyse de ces graphes permet de conclure que l'addition d'un seul support en U multiplie le coefficient de pertes de charge par un facteur allant de 2 à 3, et par un facteur allant de 4 à 6 pour le placement de 2 supports.

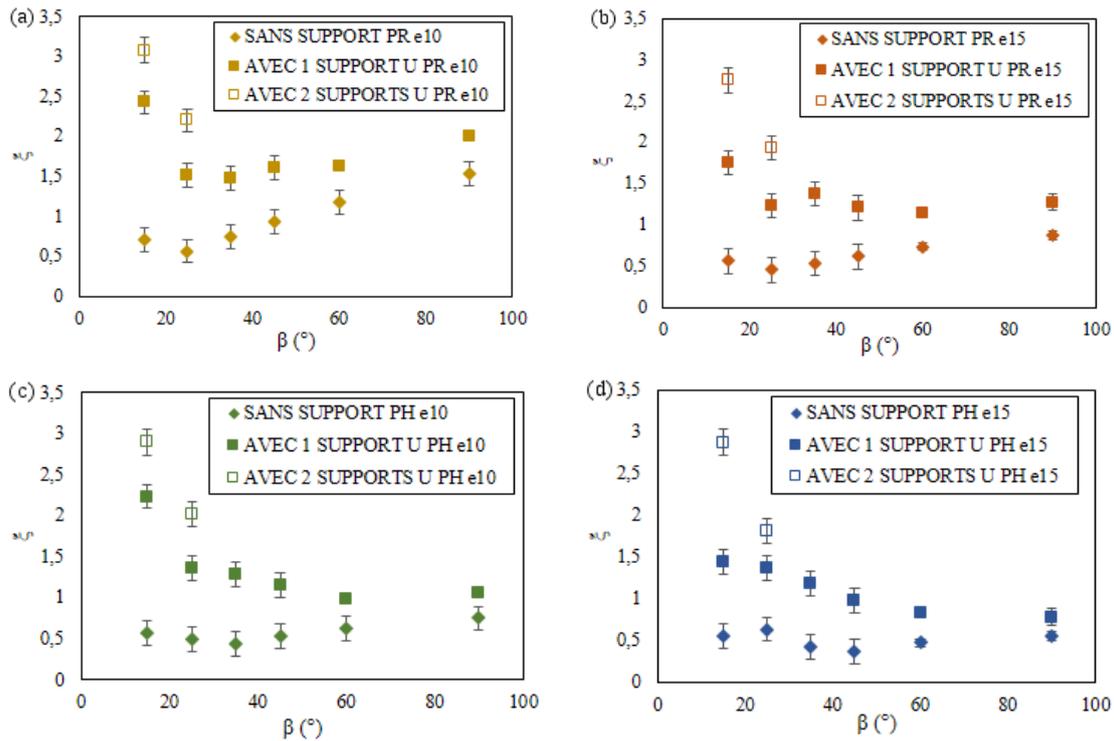


FIGURE 3.10 – Comparaison du coefficient de pertes de charge ξ sans et avec 1 ou 2 supports en U pour (a) profil rectangulaire (PR) et un espacement entre les barreaux de 10 mm, (b) profil rectangulaire (PR) et un espacement entre les barreaux de 15 mm, (c) profil hydrodynamique (PH) et un espacement entre les barreaux de 10 mm et (d) profil hydrodynamique (PH) et un espacement entre les barreaux de 15 mm, en fonction de l'angle d'inclinaison β .

Comparaison avec et sans support profilé

La Figure 3.11 montre le coefficient de pertes de charge en fonction de l'inclinaison β (15°/ 25°/ 35°/ 45°/ 60°/ 90°) et l'espacement entre les barreaux e (10 mm/15 mm) pour les deux profils de barreau (rectangulaire et hydrodynamique) avec et sans support profilé positionné dans le sens de l'écoulement pour toutes les inclinaisons de grille. L'influence des supports se démarque par une augmentation constante du coefficient de pertes de charge de l'ordre de 0.1 à 0.2. Il apparaît donc clairement que l'impact sur les pertes de charge d'un support profilé est négligeable comparé à celui d'un support en U. Ce résultat est ensuite modélisé dans l'équation de Raynal et al. (2013a).

Coefficient de pertes de charge modélisé

Pour modéliser les supports, nous avons soustrait le coefficient de pertes de charge sans support du coefficient de pertes de charge avec support. L'approche consiste à ajouter un terme supplémentaire $\xi_{support}$ à l'équation de Raynal et al. (2013a), qui modélise l'effet de

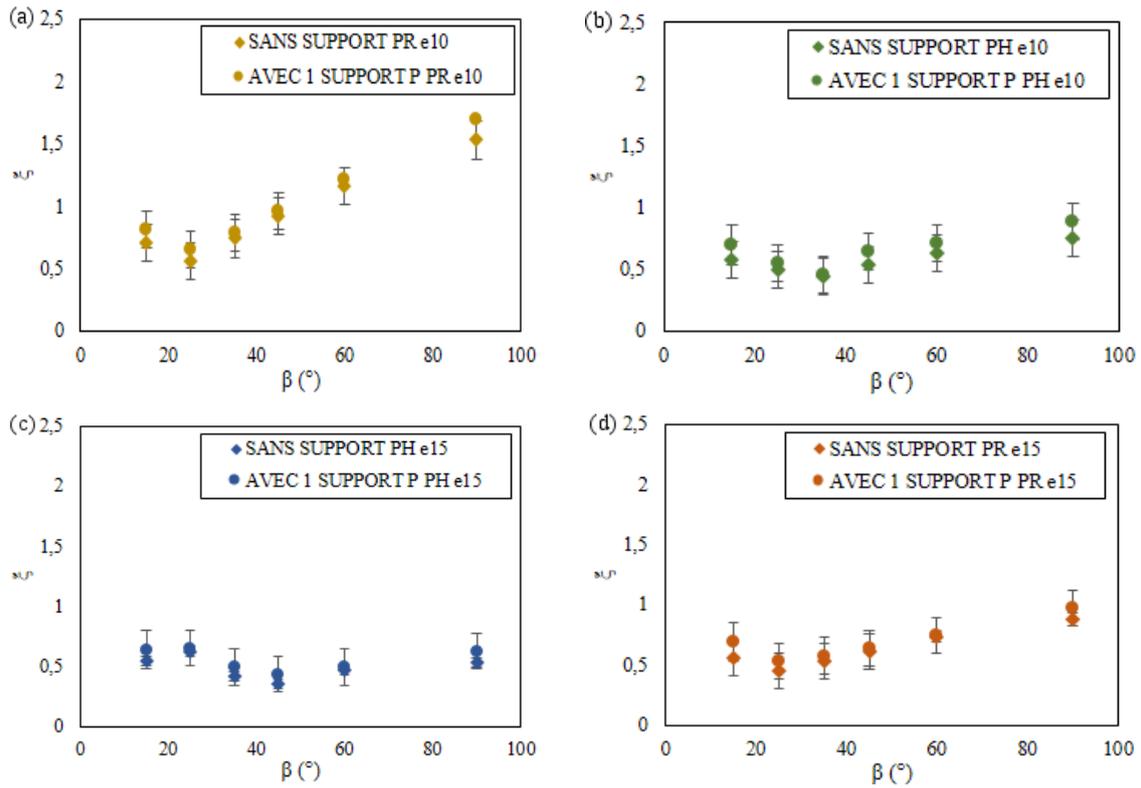


FIGURE 3.11 – Comparaison du coefficient de pertes de charge ξ sans et avec support profilé pour (a) profil rectangulaire (PR) et un espacement entre les barreaux de 10 mm, (b) profil rectangulaire (PR) et un espacement entre les barreaux de 15 mm, (c) profil hydrodynamique (PH) et un espacement entre les barreaux de 10 mm et (d) profil hydrodynamique (PH) et un espacement entre les barreaux de 15 mm, en fonction de l'angle d'inclinaison β .

ces structures sur l'écoulement. L'équation devient donc:

$$\xi_{total} = \xi_{barreaux} + \xi_{entretoises} + \xi_{support} \quad (3.2)$$

Le terme $\xi_{support}$ (équation 3.3) est ensuite modélisé à partir des différents paramètres: la projection de la diagonale du support qui définit le blocage et l'angle d'inclinaison.

$$\begin{aligned} \xi_{support} &= K_{support} \left(\frac{O_{support}}{1 - O_{support}} \right)^{0.77} \\ K_{U-support} &= 2.665 \times \cos(\beta - 26.56) \in [1.13; 2.52] \\ K_{P-support} &= 0.5 \\ O_{support} &= \frac{N_{support} \times h}{H_1} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Avec h la projection de la diagonale du support sur l'écoulement (m), H_1 la hauteur d'eau en amont de la grille (m), $K_{U-support}$ et $K_{P-support}$ sont respectivement les coefficients de forme du support en U et profilé (-), $O_{support}$ est le coefficient d'obstruction dû au support (-), $N_{support}$ est le nombre de support (-).

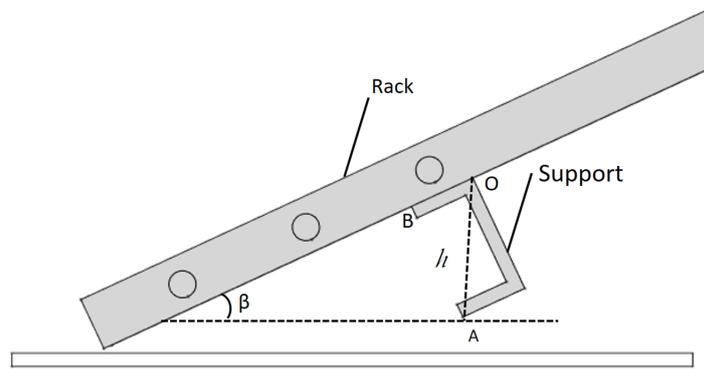


FIGURE 3.12 – Projection verticale du support pour estimer le blocage frontal.

La Figure 3.12 explique le calcul de la projection h du support sur l'écoulement dans les deux cas:

- Si le support est profilé, h est constant et est égal à 5 cm
- Si le support est en U, $h = AB \times \sin(\beta) + OB \times \cos(\beta)$

L'angle entre la diagonale et un sommet du support est égal à $\tan^{-1} \left(\frac{AB}{OB} \right) = 26.56^\circ$.

Les deux coefficients de support $K_{U-support}$ and $K_{P-support}$ sont obtenus par l'ajustement des données mesurées. La projection de la diagonale dépend de l'angle d'inclinaison pour le support en U. Le coefficient du support profilé est constant du fait de la position inchangée du support pour toutes les inclinaisons (maintenu parallèle au fond du canal).

La Figure 3.13 (a) montre que l'estimation est acceptable puisque les points mesurés concordent linéairement avec les points modélisés. Le coefficient de Pearson R^2 , égal à 0.81, indique la fiabilité des résultats du coefficient du support en U. La Figure 3.13 (b) prouve que le modèle pour les supports profilés s'applique aux points mesurés avec un coefficient de Pearson R^2 égal à 0.956. Les valeurs qui s'écartent de la courbe sont pour les mesures avec un angle d'inclinaison $\beta = 15^\circ$, où la hauteur d'eau a été baissée à cause d'une contrainte de longueur de grille.

Discussions

L'étude des formes de barreaux permet de quantifier l'apport de ce composant principal dans la prédiction des pertes de charge. Ces profils ont été choisis du fait de leur utilisation par certains producteurs d'énergie dans leurs centrales. La modélisation réalisée confère une rigueur dans la prédiction et la minimisation des pertes d'énergie induite par les grilles.

L'addition des supports révèle quant à elle l'importance de la prise en charge de tous les éléments constituant la grille. Il en découle, d'un point de vue énergétique, que si l'optimisation de la forme du support n'est pas réalisée, le bénéfice apporté par l'utilisation de bar-

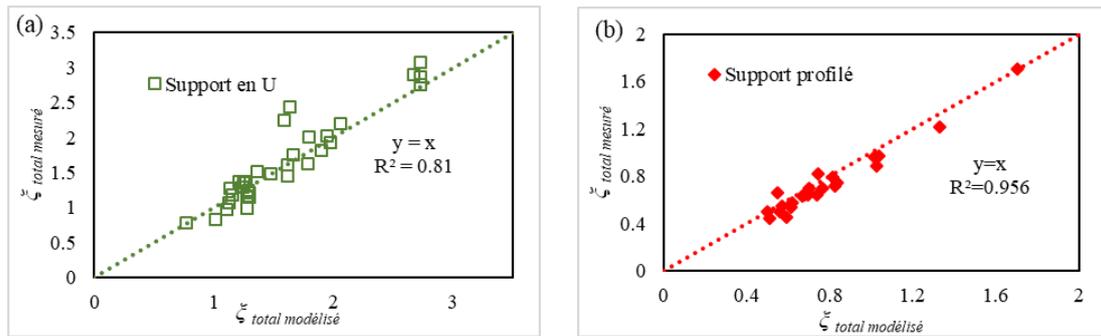


FIGURE 3.13 – Régression linéaire entre le coefficient de pertes de charge mesuré $\xi_{mesuré}$ et coefficient de pertes de charge modélisé $\xi_{modélisé}$ (a) le support en U et (b) le support profilé.

reaux optimisés et l'inclinaison de la grille sera diminué par l'importance des pertes liées au support. Les critères d'ichtyocompatibilité sont certes respectés mais la perte d'énergie n'en sera pas réduite.

3.2 Modélisation numérique de la vitesse à travers les grilles inclinées avec des supports

La grille avec et sans support est simulée afin de déterminer le champ de vitesse en amont pour valider les critères d'ichtyocompatibilité et en aval pour vérifier la symétrie du profil de vitesse en direction de la turbine selon notamment un des critère de Godde (1994) qui dit que la vitesse moyenne d'écoulement dans un quadrant d'admission ne doit pas dépasser 10% au maximum de la vitesse moyenne du débit d'admission. Quatre simulations ont été effectuées pour une grille inclinée à 25° , angle souvent préconisé pour le guidage des poissons ainsi que pour la minimisation des pertes de charge. Il y a de légères variations de la distribution des vitesses, qui est plus homogène en aval de la grille.

La Figure 3.14 représente une coupe transversale dans le plan médian du canal de l'écoulement à travers une grille inclinée à 25° , munie de barreaux rectangulaires, de rapport $e/b = 2$, sans entretoises. L'écoulement à travers la grille sans entretoises reste homogène et globalement uniforme et les pertes de charge sont de l'ordre de quelques millimètres.

La Figure 3.15 représente une coupe transversale dans le plan médian du canal de l'écoulement à travers une grille inclinée à 25° , munie de barreaux rectangulaires, de rapport $e/b = 2$, avec 5 barres d'entretoises noyées espacées de 300 mm. Le champ de vitesse est perturbé à l'aval immédiat des lignes d'entretoises mais s'homogénéise rapidement en aval de la grille.

La Figure 3.16 représente une coupe transversale dans le plan médian du canal, de

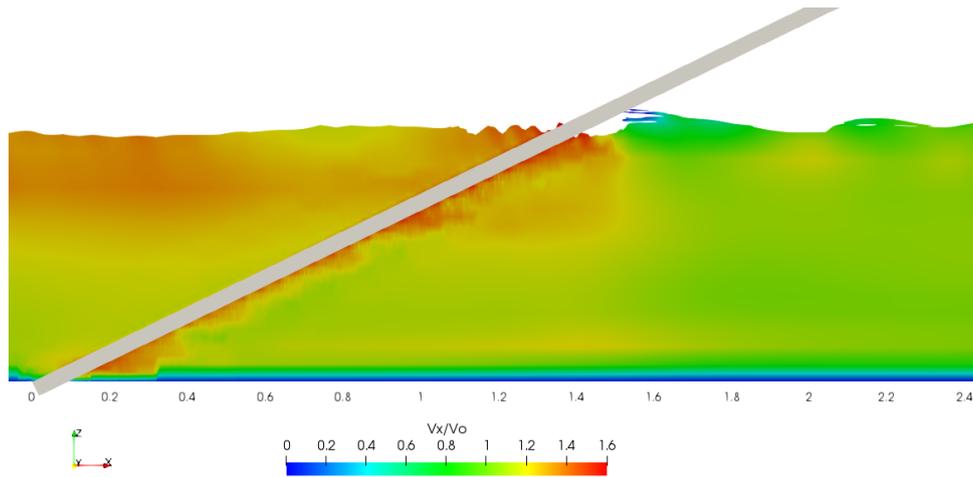


FIGURE 3.14 – Représentation de la vitesse axiale normalisée (V_x/V_o) de l'écoulement en coupe transversale à travers une grille inclinée à 25° , munie de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, sans entretoises.

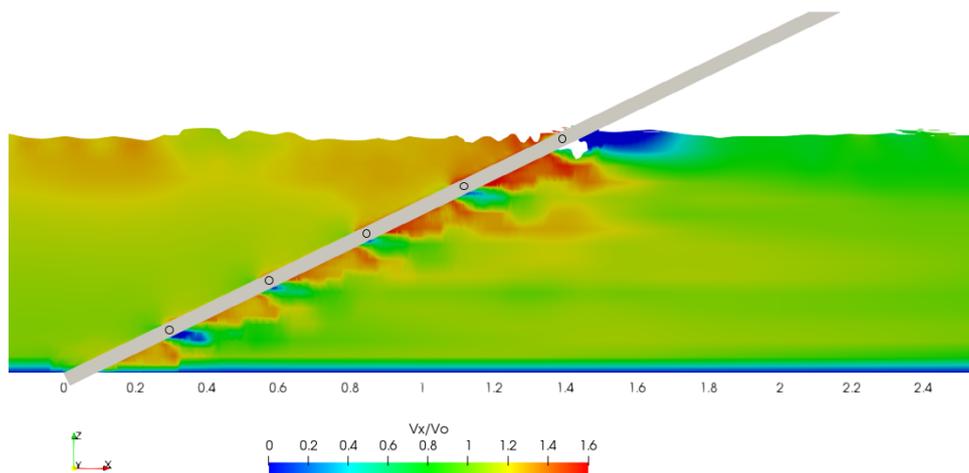


FIGURE 3.15 – Représentation de la vitesse axiale normalisée (V_x/V_o) de l'écoulement en coupe transversale à travers une grille inclinée à 25° , munie de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, avec 5 barres d'entretoise.

l'écoulement à travers une grille inclinée à 25° , munie de barreaux rectangulaires, de rapport $e/b = 2$, sans entretoises et avec le support en U. Le champ de vitesse est ralenti en aval de la grille au niveau du support où une zone de recirculation apparaît. Le blocage ainsi provoqué se traduit par un effet de confinement qui accélère l'écoulement de part et d'autre du support. L'uniformité du profil de vitesse tend à être retrouvée complètement à une distance de 6.5 m.

La Figure 3.17 représente une coupe transversale dans le plan méridien du canal, de l'écoulement à travers une grille inclinée à 25° , munie de barreaux rectangulaires, de rapport $e/b = 2$, sans entretoises, avec le support profilé. Le champ de vitesse est ralenti en

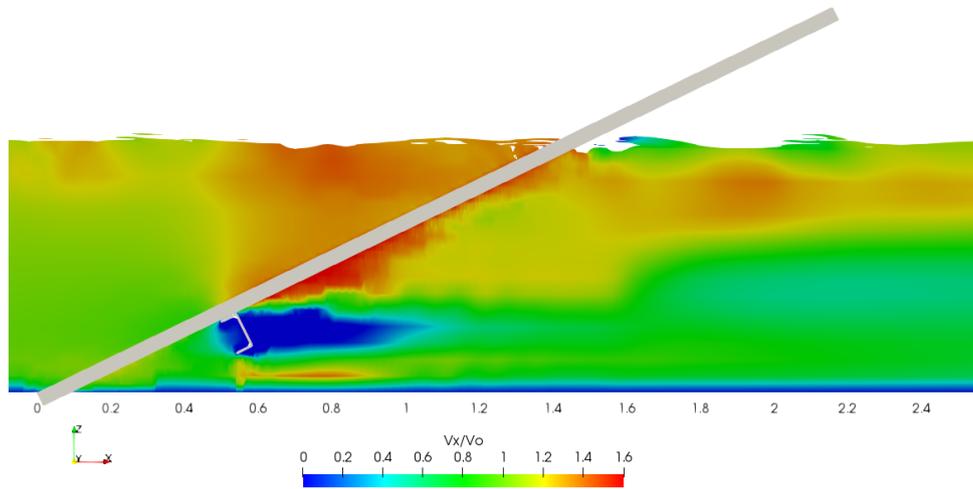


FIGURE 3.16 – Représentation de la vitesse axiale normalisée (V_x/V_o) de l'écoulement en coupe transversale à travers une grille inclinée à 25° , munie de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, avec le support en U, sans entretoises.

aval de la grille au niveau du support profilé dont la présence génère une zone de recirculation ainsi qu'un effet de confinement localisé. L'accélération provoqué par la présence du support est moindre que dans le cas du profil en U et permet une meilleure homogénéisation des vitesses dès l'aval immédiat de la grille. Un profil de vitesse parfaitement homogène n'est cependant atteint complètement qu'à distance de 4.5m.

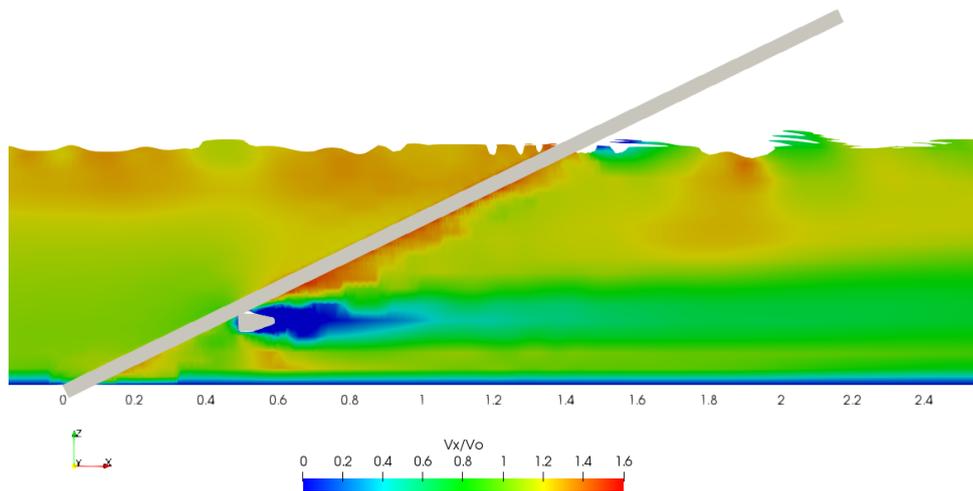


FIGURE 3.17 – Représentation de la vitesse axiale normalisée (V_x/V_o) de l'écoulement en coupe transversale à travers une grille inclinée à 25° , munie de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, avec le support profilé, sans entretoises.

La comparaison des profils de vitesse en amont et en aval de la grille est aussi effectuée. La Figure 3.18 présente les profils expérimentaux et numériques des vitesses normali-

sées: axiale V_x , normale V_n , tangentielle V_t et du ratio V_t/V_n , situés à 50 mm en amont le long de la grille inclinée à 25° , avec des barreaux rectangulaires et $e/b = 2$, avec et sans barre d'entretoise et support en U ou profilé. Les profils mesurés et simulés de la vitesse axiale avec entretoises sont proches. Le profil sans entretoise augmente de 10% selon la hauteur mais avec la même pente. Les profils avec le support en U ou profilé sont asymétriques et présentent une décélération notable pour Z/H de 0.3 à 0.5 et une accélération pour Z/H de 0.6 à 0.8.

Les profils mesurés et simulés des vitesses normales et tangentielles normalisées par V_o sans et avec support sont presque identiques mise à part le ralentissement à l'endroit des supports. La vitesse normale est inférieure à 0.5 ms^{-1} et le ratio des vitesses tangentielle et normale est supérieur à 2 ce qui valide les critères ichtyocompatibles de ces configurations de grille.

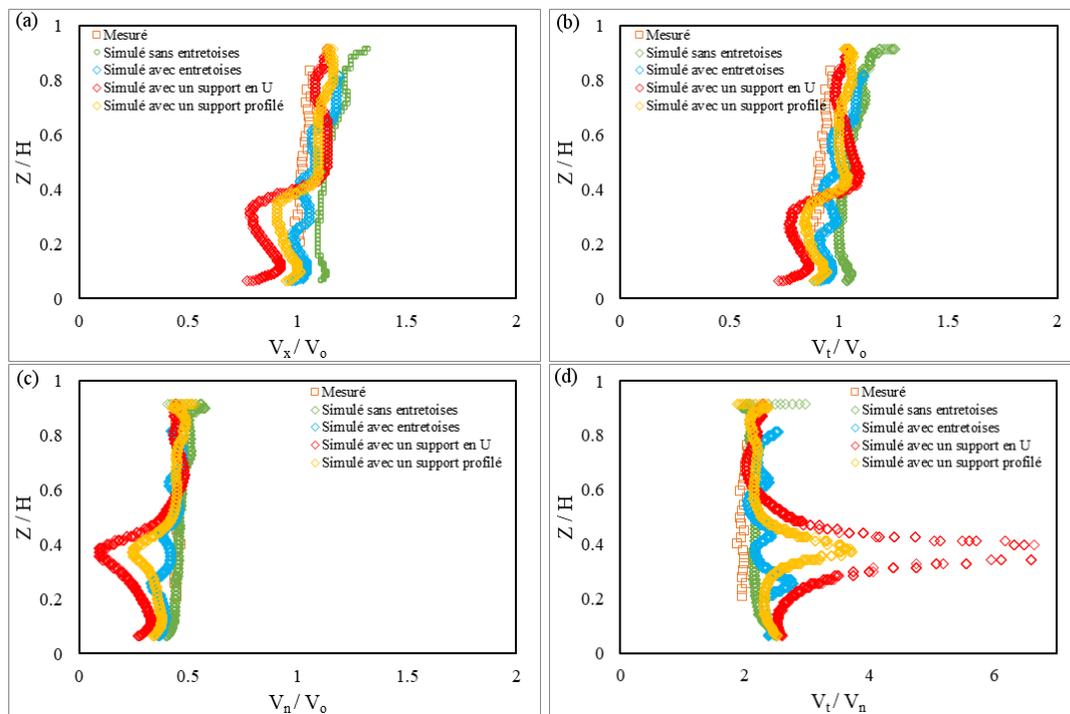


FIGURE 3.18 – Comparaison des profils expérimentaux et numériques des vitesses normalisées: axiale V_x (a), tangentielle V_t (b), normale V_n (c) et du ratio V_t/V_n (d), situés à 50 mm en amont de la grille inclinée à 25° , de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, avec et sans barres d'entretoise pour $V_o = 0.7 \text{ ms}^{-1}$, et avec et sans les supports en U et profilé.

La Figure 3.19 présente les profils de la vitesse axiale normalisée pour une grille inclinée à 25° , avec des barreaux rectangulaires et $e/b = 2$, avec et sans barre d'entretoise, avec entretoise et support en U ou profilé, à 400 mm en aval de la grille (à $x = 1.9 \text{ m}$). Les profils mesurés et simulés avec entretoise sont presque identiques. Le profil sans entretoise augmente de 15%. Les profils avec le support en U ou profilé sont asymétriques et présentent

une décélération en bas pour Z/H de 0.2 à 0.5 et une accélération en haut pour Z/H de 0.6 à 0.8. L'ajout d'un support en U ou profilé a donc pour effet de créer un fort ralentissement dans son sillage immédiat en raison du blocage et des pertes de charge qu'il induit, et se traduit par l'inhomogénéité du profil de vitesse en aval de la grille selon le critère de Godde (1994) avec un écart de 50%. Cette inhomogénéité tend à décroître en aval de la grille.

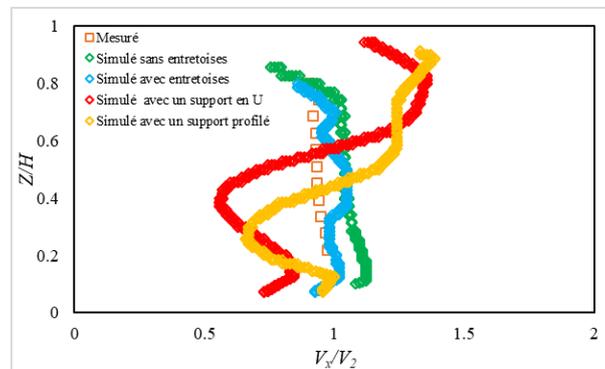


FIGURE 3.19 – Comparaison des profils de vitesse axiale normalisée aval à travers une grille inclinée à 25° , de barreaux rectangulaires, $e/b = 2$, sans et avec 5 barres d'entretoises, et avec et sans le support en U ou le support profilé.

Discussions

L'étude de la courantologie en amont et en aval des grilles avec un support montre que ces structures n'impactent pas les critères d'ichtyocompatibilité en amont de la grille mais influencent les profils en aval. L'irrégularité des profils prouve que l'installation des turbines à l'aval immédiat des grilles munies de supports transverses est défavorable à l'image des profils mesurés à l'aval des grilles orientées à barreaux verticaux par Raynal et al. (2013b). La préconisation d'une distance minimale supérieure à 6.5 m est à instaurer s'il y a présence de ces structures derrière les grilles inclinées.

3.3 Mesure et modélisation numérique de la vitesse in situ

L'objectif de cette partie est de caractériser la courantologie in situ au niveau de la prise d'eau de Las Rives équipée d'un plan de grille incliné, afin de vérifier si les critères d'ichtyocompatibilité concernant la vitesse normale et le guidage des poissons sont effectivement atteints à l'échelle réelle et de les comparer au modèle numérique correspondant développé à cet effet.

3.3.1 Conditions de fonctionnement de la prise d'eau au moment des mesures

Durant les mesures, le débit de l'Ariège a varié entre 54.20 et $55.25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à la station de Foix. Le débit turbiné à la centrale était compris entre $43.4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ et $46.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. La centrale a fonctionné à pleine puissance pendant les mesures. Le débit total de l'Ariège recalculé au niveau du site de Las Rives a varié entre 48.7 et $59.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (débit d'équipement de $45 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Le niveau de la retenue a varié entre -2.2 cm et $+8.5 \text{ cm}$ par rapport à la crête du barrage. Le débit à l'amont du plan de grille employé pour l'adimensionnement des cartographies est $Q=46.78 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ donnant une vitesse débitante $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$ pour une surface de prise d'eau $S = 58.52 \text{ m}^2$. Le débit total dans les exutoires est de $1.134 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

3.3.2 Courantologie en amont des grilles

Mesure de la vitesse

La Figure 3.20 présente la cartographie des composantes V_x et V_z de la vitesse adimensionnée par la vitesse débitante V_o , au niveau des 4 transects. Le plan de grille est ainsi visualisé depuis l'amont. Au niveau des 3 transects situés à 10 m, 6 m et 4 m en amont du

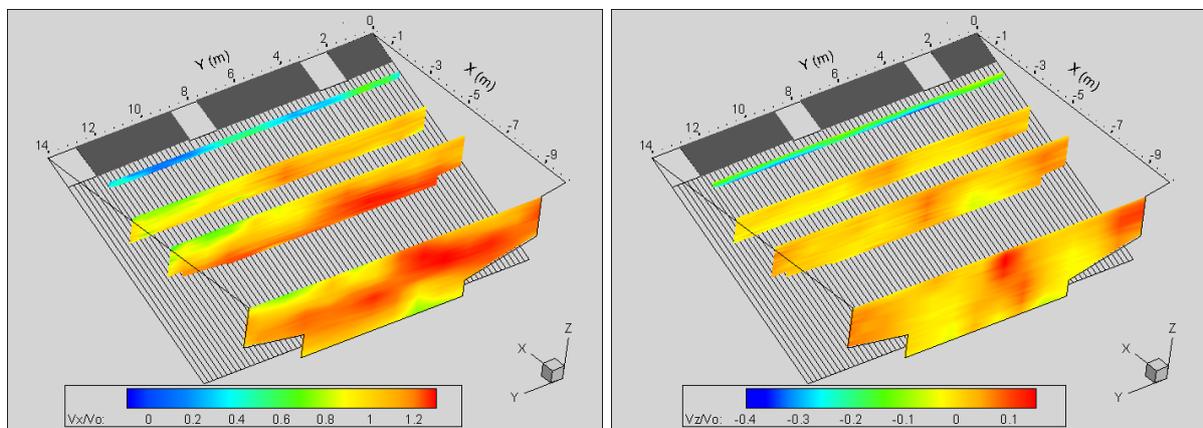


FIGURE 3.20 – Cartographies des vitesses adimensionnées V_x/V_o (à gauche) et V_z/V_o (à droite) mesurées à Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

sommet de grille, les composantes V_x varient essentiellement entre 0.6 et 1.2 fois V_o . La moitié de la prise d'eau côté rive droite présente des vitesses plus élevées que la moitié côté rive gauche. Cette hétérogénéité existante dès le pied de la grille est probablement liée à la configuration générale de la prise d'eau, et non au plan de grille lui-même. Entre ces 3 transects, il n'apparaît pas d'accélération, ni de décélération significative de la composante V_x .

Au niveau du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille (environ 0.15 m en amont de l'entrée des exutoires), les composantes V_x diminuent significativement en dehors des exutoires en lien avec l'obturation du sommet de la grille sur la même profondeur que les exutoires avec des valeurs entre 0 et 0.4 fois V_o et restent de l'ordre de 0.4 à 0.8 fois V_o en face des exutoires. Les composantes V_x sont inférieures aux vitesses calculées grâce à l'évaluation des débits dans les exutoires, cependant le transect n'est pas à l'entrée immédiate des exutoires mais à 15 cm en amont.

Les composantes verticales de la vitesse V_z apparaissent faibles au niveau des 3 premiers transects (valeur entre -0.05 et +0.1 fois V_o) et légèrement positives en moyenne (orientées vers la surface). Au niveau du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille, les composantes V_z deviennent sensiblement négatives (orientées vers le fond), avec des valeurs de l'ordre de -0.2 et -0.3 fois V_o entre les exutoires et de l'ordre de -0.1 fois V_o au niveau des exutoires. Cette évolution est liée au fait que l'écoulement doit « plonger » sous la partie sommitale du plan de grille qui est obturée.

La Figure 3.21 présente la cartographie des composantes de vitesse transversale V_y . Les composantes transversales sont proches de zéro au niveau des trois transects les plus à l'amont. Il est néanmoins constaté sur le transect situé à 10 m un mouvement général qui est légèrement orientée vers la rive droite. Pour les autres transects, l'écoulement est plutôt orienté de la rive droite vers la rive gauche.

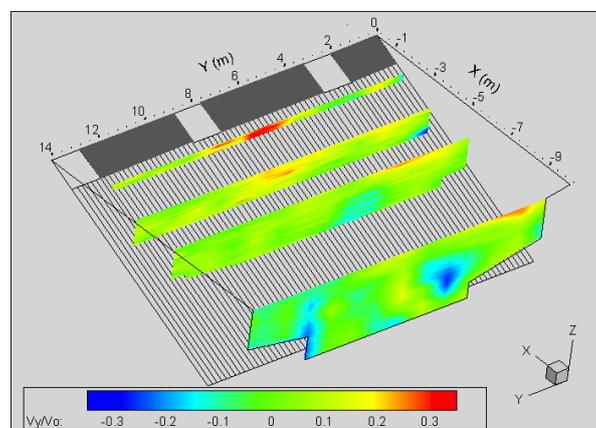


FIGURE 3.21 – Cartographies des vitesses adimensionnées V_y/V_o Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

La Figure 3.22 présente la cartographie des composantes tangentielle V_t et normale

V_n de la vitesse adimensionnée par rapport au plan de grille, au niveau des 4 transects. Au niveau des 3 transects situés à 10 m, 6 m et 4 m en amont du sommet de grille, les composantes tangentielles V_t présentent des valeurs essentiellement comprises entre 0.6 et 1.2 fois V_o . Comme pour V_x , les valeurs sont plus élevées dans la moitié coté rive droite de la prise d'eau. Au niveau du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille (environ 0.15 m en amont de l'entrée des exutoires), la variation des composantes V_t est en lien avec l'obturation du sommet de la grille : valeur quasi-nulle entre les exutoires et de l'ordre de 0.2 à 0.6 fois V_o en face des exutoires. Les composantes normales de la vitesse V_n par rapport au plan de grille varient entre 0.2 et 0.6 fois V_o , soit entre 0.16 et 0.48 ms^{-1} sur l'ensemble des 4 transects, y compris le transect situé à 2 m en amont du sommet de grille où l'écoulement est amené à « plonger » sous la partie sommitale du plan de grille qui est obturée. Le critère d'une vitesse normale inférieure à 0.5 ms^{-1} est ainsi bien respecté à Las Rives, même lorsque la prise d'eau fonctionne à son débit maximum.

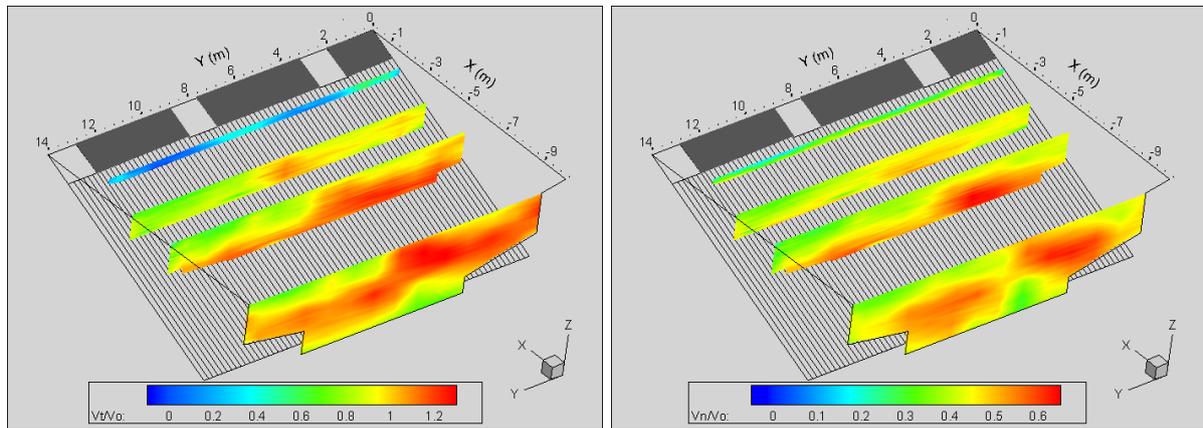


FIGURE 3.22 – Cartographies de V_t/V_o (à gauche) et V_n/V_o (à droite) mesurées à Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

La Figure 3.23 présente la cartographie du rapport entre les vitesses tangentielles et normales V_t/V_n . Au niveau des 3 transects situés à 10 m, 6 m et 4 m en amont du sommet de grille, ce rapport varie globalement entre 1.5 et 2.5, avec des valeurs moyennes de l'ordre de 2, conformes à la valeur théorique attendue. Au niveau du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille (environ 0.15 m en amont de l'entrée des exutoires), le rapport est proche de 0 entre les exutoires et proche de 1.0 à 1.5 en face des exutoires, conformément à l'évolution des composantes tangentielles vu précédemment.

La Figure 3.24 présente une vue de dessus de la moyenne sur la hauteur des vecteurs vitesse ($V_x ; V_y$) de l'écoulement. L'orientation ainsi que la longueur des vecteurs renseignent sur la direction ainsi que l'intensité de l'écoulement en amont des grilles. Les vecteurs sont bien dirigés dans l'axe de la prise d'eau au niveau des trois transects situés à 10 m, 6 m, 4 m, avec des valeurs proches de la vitesse débitante V_o . Au niveau du transect à 2 m, l'orien-

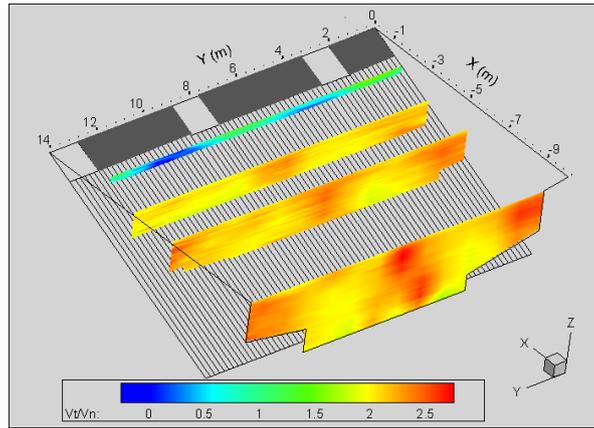


FIGURE 3.23 – Cartographie du rapport V_t/V_n mesurées à Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

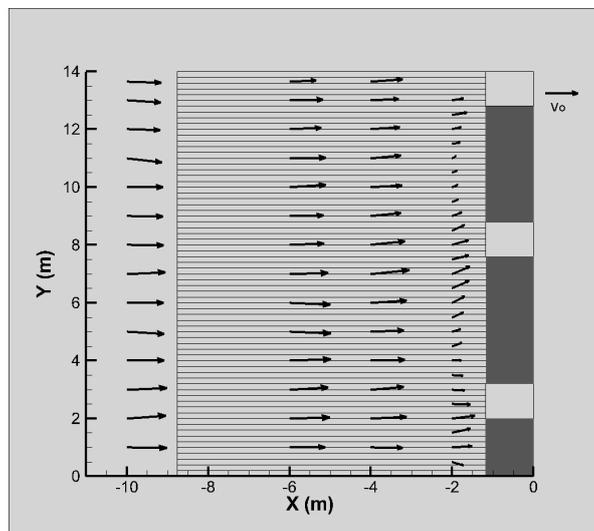


FIGURE 3.24 – Vue de dessus des vecteurs des vitesses moyennées sur la hauteur, au niveau des quatre transects à Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

tation des vecteurs vitesse évolue sous l'effet de l'entonnement vers chacun des exutoires, avec des valeurs réduites entre les exutoires (zones obturées) et restant de l'ordre de 0.5 à 0.7 fois V_o en face des exutoires.

Comparaison des mesures avec le modèle numérique

La Figure 3.25 présente la cartographie des composantes V_x et V_z de la vitesse adimensionnée modélisée, au niveau des 4 transects. Le plan de grille est ainsi visualisé depuis l'amont.

La vitesse V_x a la même valeur que la vitesse débitante V_o pour les trois premiers transects (à 10 m, 6 m et 4 m). Ces cartographies sont plus homogènes que les cartographies in situ (Figure 3.20) vu l'absence des biais dûs à la configuration de la prise d'eau dans la simulation numérique.

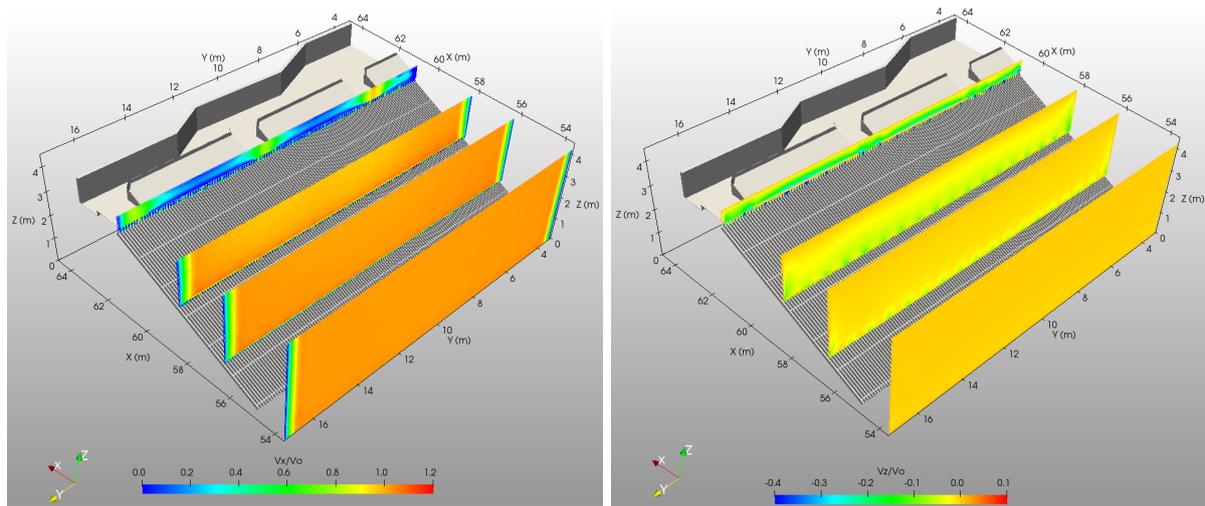


FIGURE 3.25 – Cartographies des vitesses adimensionnées V_x/V_o (à gauche) et V_z/V_o (à droite) modélisées de Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

Au niveau du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille (environ 0.15 m en amont de l'entrée des exutoires), les composantes V_x diminuent significativement en dehors des exutoires en lien avec l'obturation du sommet de la grille sur la même profondeur que les exutoires avec des valeurs entre 0 et 0.4 fois V_o et restent de l'ordre de 0.4 à 0.8 fois V_o en face des exutoires. Les composantes V_x sont conformes aux vitesses mesurées en terrain (Figure 3.20).

Les composantes verticales de la vitesse V_z sont faibles au niveau des 3 premiers transects. Au niveau du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille, les composantes V_z deviennent négatives (orientées vers le fond), avec des valeurs de l'ordre de -0.2 fois V_o . Ces vitesses sont similaires aux vitesses mesurées in situ (Figure 3.20).

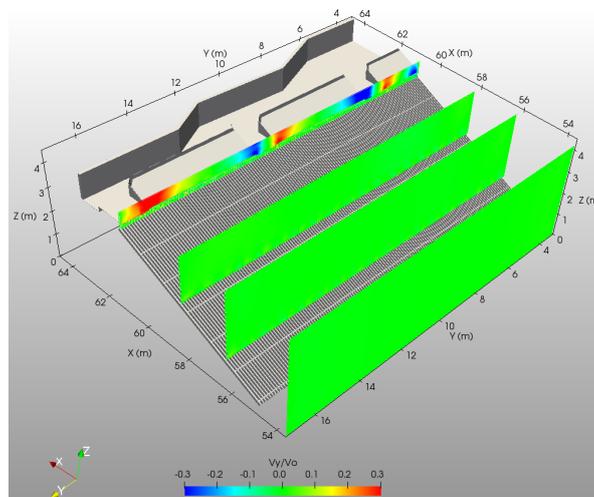


FIGURE 3.26 – Cartographies des vitesses adimensionnées V_y/V_o modélisées de Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

La Figure 3.26 présente la cartographie des composantes de vitesse normalisée transversale V_y . Les composantes transversales sont quasiment nulles au niveau des trois transects les plus à l'amont. Au niveau du transect à 2 m, l'attractivité latérale est démarquée par l'augmentation de la vitesse V_y près des exutoires dans les deux sens avec une zone plus grande orientée dans le sens positif Z comme sur la Figure 3.24. Cela confirme les valeurs positives en V_y relevées sur le terrain en amont des exutoires.

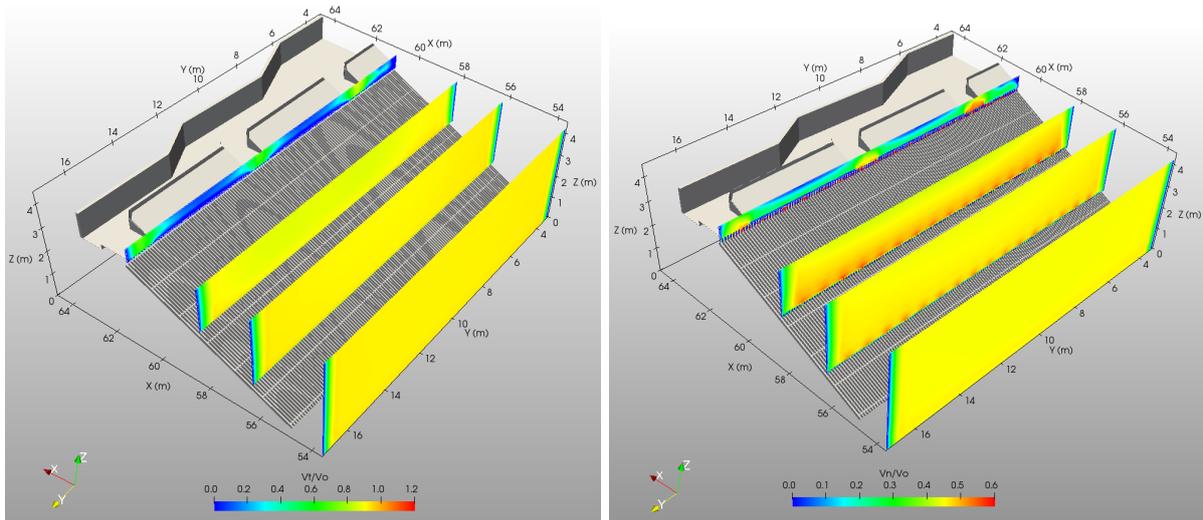


FIGURE 3.27 – Cartographies de V_t/V_o (à gauche) et V_n/V_o (à droite) modélisées de Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

La Figure 3.27 présente la cartographie des composantes tangentielles V_t et normales V_n de la vitesse adimensionnée simulée, par rapport au plan de grille, au niveau des 4 transects. Au niveau des 3 transects situés à 10 m, 6 m et 4 m en amont du sommet de grille, les composantes tangentielles V_t sont uniformes et présentent des valeurs égales à la vitesse débitante V_o . Ces vitesses sont donc équivalentes à la moyenne des valeurs mesurées. Au niveau du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille, la variation des composantes V_t est nulle entre les exutoires et de l'ordre de 0.2 à 0.6 fois V_o en face des exutoires.

Au niveau des 3 transects situés à 10 m, 6 m et 4 m en amont du sommet de grille, les composantes normales V_n sont similaires et présentent des valeurs 0.4 à 0.6 fois V_o . En face des exutoires, les composantes V_n sont de l'ordre de 0.4 fois V_o et diminuent entre 0.1 et 0.3 fois V_o devant les zones obturées. Les composantes V_n varient entre 0.08 et 0.49 ms^{-1} et sont donc inférieures à la limite préconisée de 0.5 ms^{-1} . Ces valeurs correspondent aux valeurs in situ (Figure 3.22).

La Figure 3.28 présente la cartographie du rapport entre les vitesses tangentielles et normales V_t/V_n . Ce rapport varie globalement entre 1.5 et 2.5, avec des valeurs moyennes de l'ordre de 2, conformes à la valeur théorique attendue et aux mesures in situ (Figure 3.23).

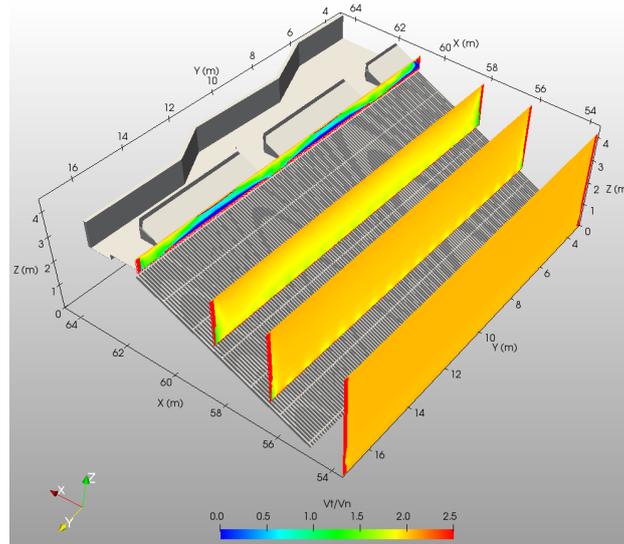


FIGURE 3.28 – Cartographie du rapport V_t/V_n modélisées de Las Rives, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

Au niveau du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille, le rapport est proche de 0 entre les exutoires et proche de 1.0 à 1.5 en face des exutoires, conformément à l'évolution des composantes tangentielles vu précédemment. La simulation reproduit donc les mesures réalisées à Las Rives et cet outil pourra être utilisé pour le dimensionnement d'autres centrales.

3.3.3 Attractivité des exutoires

L'attractivité des exutoires constitue la dernière section de ce chapitre. Ceci permet de relever l'efficacité de ce dispositif d'un point de vue hydraulique en association avec le plan de grille pour la dévalaison des poissons.

Comparaison de la vitesse mesurée devant les exutoires avec le modèle numérique

Au niveau du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille, la Figure 3.29 présente la cartographie de la composante transversale V_y de la vitesse mesurée (valeurs positives dirigées vers la rive gauche et valeurs négatives dirigées vers la rive droite). Globalement, les composantes de la vitesse V_y présentent des valeurs essentiellement comprises entre -0.1 et 0.3 fois V_o , soit entre -0.08 et 0.24 ms^{-1} . Ces différentes représentations permettent d'apprécier l'attractivité latérale des exutoires, avec des changements de directions (changements de signe) de V_y sur la largeur de la prise d'eau :

- L'exutoire situé le long de la rive gauche (entre $Y = 12.95$ et 14 m) attire l'écoulement sur tout l'espace le séparant de l'exutoire central (jusqu'à $Y = 8.52$ m). Les valeurs de V_y sont assez faibles, de l'ordre de 0.05 à 0.08 ms^{-1} , en lien probablement avec la

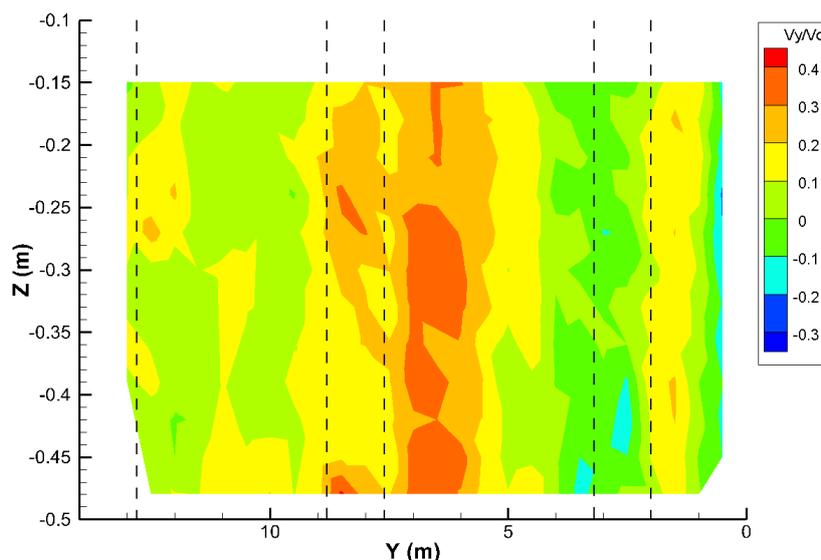


FIGURE 3.29 – Cartographie de V_y/V_o du transect situé à 2 m en amont du sommet de grille. Le sens positif est orienté de la rive droite vers la rive gauche. La position des exutoires est délimitée par les traits verticaux, $V_o = 0.8 \text{ ms}^{-1}$.

plus faible valeur de débit transitant par cet exutoire ($0.184 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

- L'exutoire central (entre $Y = 7.47$ et 8.52 m) n'attire pas l'écoulement depuis la rive gauche, mais attire bien l'écoulement depuis la rive droite sur une distance de l'ordre de 3.5 m (jusqu'à $Y = 4$ m environ).
- L'exutoire situé rive droite (entre $Y = 2.0$ et 3.05 m) attire l'écoulement depuis la rive gauche sur une distance de l'ordre de 1 m (jusqu'à $Y = 4.0$ m environ), mais avec des valeurs de V_y faibles ($< 0.05 \text{ ms}^{-1}$) et depuis la rive droite sur une distance de l'ordre de 1.0 m. Il y a une zone entre cet exutoire et la rive droite où l'écoulement n'est pas dirigé vers l'exutoire. La largeur de cette zone de recirculation de l'écoulement est de l'ordre de 0.5 à 1.0 m.

Globalement l'attractivité latérale des exutoires apparaît bonne avec seulement 1 zone de taille réduite au niveau de laquelle les poissons dévalant ne sont pas guidés vers un exutoire par la courantologie (le long de la rive droite entre la rive et $Y = 0.5$ à 1.0 m). Les vitesses transversales V_y sont majoritairement dirigées de la rive droite vers la rive gauche, en lien avec l'arrivée majoritaire du débit dans la moitié rive droite de la prise d'eau.

La Figure 3.30 est un plan (x,y) des exutoires qui présente la vitesse axiale normalisée V_x/V_o et les vecteurs de vitesse (V_x, V_y). La vitesse axiale diminue à l'approche des exutoires et augmente dans les entrées respectives. La vitesse dans l'exutoire 1 (en partant de la gauche) est de l'ordre de 0.4 ms^{-1} , de 0.7 ms^{-1} dans l'exutoire 2 et de 0.9 ms^{-1}

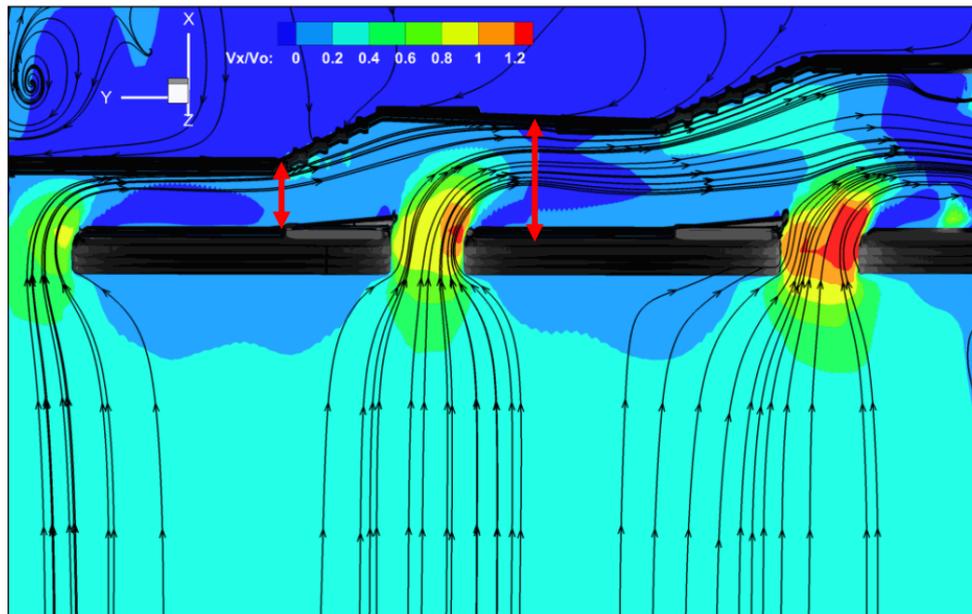


FIGURE 3.30 – Plan (x,y) en vue de dessus de la norme de la vitesse et des vecteurs de vitesse de la simulation numérique avec les positions de mesure in situ en flèches rouges.

dans l'exutoire 3. Toutefois, le plan permet de montrer l'évolution de la vitesse à travers la goulotte à la largeur graduellement diminuée et ainsi l'impact de ce modèle.

Comparaison des mesures de débit avec le modèle numérique

Le tableau 3.7 présente la répartition des débits dans les exutoires, in situ et simulée.

TABLEAU 3.7 – Répartition des débits dans les exutoires mesurés et simulés à Las Rives.

Exutoires	1	2	3
Débit cumulé in situ adimensionné (-)	0.16	0.59	1
Pourcentage du débit par exutoire (%)	16.22	42.85	40.82
Débit cumulé numérique adimensionné (-)	0.11	0.52	1
Pourcentage du débit par exutoire (%)	10.6	41.28	48.1

Le débit total est évalué à $1.13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, soit 84% de la valeur théorique. Les débits cumulés adimensionnés des exutoires 1 (rive gauche), 2 (central) et 3 (rive droite) sont respectivement de 0.16, 0.43 et 0.41. L'alimentation en débit du premier exutoire apparaît ainsi défavorisée par rapport aux deux autres. C'est un phénomène courant lié aux pertes de charge se produisant le long de la goulotte de collecte des exutoires, mais qui apparaît ici assez intensifié pour l'exutoire 1. Le phénomène est également lié à la dissymétrie de l'écoulement en raison de sa position le long de la berge. La vitesse en entrée de l'exutoire 1 (0.36 ms^{-1}) est par conséquent bien en deçà de la valeur théorique recherchée (0.90

ms^{-1}). Les vitesses en entrée des exutoires 2 et 3 sont en revanche voisines de cette valeur théorique.

Le débit total simulé est égal au débit théorique dans la mesure où celui-ci a été imposée en condition de sortie de la goulotte ($1.349 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Les débits simulés adimensionnés des exutoires 1 (rive gauche), 2 (central) et 3 (rive droite) sont respectivement de 0.11, 0.41 et 0.48. L'exutoire 1 a le débit le plus faible alors que l'exutoire 3 détient le débit le plus élevée. Cette variation de débit est similaire à celle mesurée in situ. Seules des faibles différences résident dans les pourcentages de débit. En effet, l'exutoire 2 a le pourcentage de débit le plus élevé (41.28%) d'après les mesures in situ alors que l'exutoire 3 présente le pourcentage de débit le plus haut (48.1%) dans la simulation numérique et cela est dû à l'orientation de la prise d'eau vers la droite. Les valeurs de vitesse numérique adimensionnée à l'entrée des exutoires se décomposent en une valeur de l'exutoire 2 de 0.98 proche de la valeur théorique, une augmentation de cette valeur pour l'exutoire 3 à 1.49 et une diminution dans l'exutoire 1 à 0.75.

Discussions

Les mesures in situ permettent de valider la courantologie en amont de la grille inclinée implantée à Las Rives et les simulations numériques s'alignent avec les résultats expérimentaux. L'attractivité latérale des exutoires est acceptable et reflète le fonctionnement souhaitée.

Parallèlement, une campagne de radiopistage qui consiste à intégrer un émetteur au poisson afin de le repérer, est réalisée pour estimer le passage des poissons et l'efficacité des aménagements ichtyocompatibles. L'efficacité de la prise d'eau pour la dévalaison des smolts est de 86.3 % (Tetard et al., 2019) et des anguilles de 100% (Tomanova et al., 2019).

3.4 Bilan

Une combinaison d'outils expérimentaux et numériques en laboratoire et à l'échelle réelle, appliquée aux dispositifs de dévalaison, a été déployée pour caractériser et valider les performances et l'efficacité des grilles inclinées dans diverses configurations. Les recommandations existantes ont été confirmées en termes d'efficacité hydraulique et de guidage, tandis que de nouvelles solutions pratiques d'éléments structurels ont été identifiées et validées.

L'étude des formes de barreaux et des supports a pu confirmer leur importance dans les pertes de charge. Les profils Têtard 8 et Plétina permettent de générer notamment moins de pertes. La comparaison des formes utilisées avec celles de l'étude de (Meister et al., 2020a) ont pu conclure sur le choix des dimensions d'une même géométrie et des potentiels

autres formes permettant de réduire les pertes d'énergie.

Par ailleurs, l'influence des supports transversaux sur la courantologie à la traversée de la grille a pu être caractérisée localement par les simulations numériques. Cette courantologie est très influencée par ces supports tant en amont qu'en aval. Ceci dit, en amont, les critères ichtyocompatibles demeurent respectés tandis qu'en aval, l'homogénéité de l'écoulement nécessite plus de distance pour être retrouvée en la présence des supports derrière la grille. Ces outils sont nécessaires au dimensionnement des prises d'eau et permettent une base de connaissance enrichie des différentes possibilités d'implantation des grilles inclinées.

Les données expérimentales et numériques obtenues ont ainsi permis de vérifier et décrire les différentes topologies d'écoulement auxquelles peuvent être soumis le poisson en dévalaison. Des études complémentaires pourront être menées afin d'identifier les trajectoires effectivement suivies par les poissons pour les confronter ensuite aux courantologies observées. En particulier, la notion d'attractivité des exutoires pourra alors être abordée, dans le but d'adapter leur configurations aux trajectoires préférentielles des poissons.

Les nouvelles solutions de barrières physiques

Sommaire

4.1 Les grilles orientées à barreaux horizontaux	94
4.1.1 Pertes de charge	95
4.1.2 Vitesse	104
4.2 Les plaques perforées	111
4.2.1 Pertes de charge	113
4.2.2 Vitesse	119
4.3 Bilan	124

Dans ce chapitre, de nouvelles solutions de barrières physiques sont présentées. Les solutions testées dans le cadre de cette thèse sont les grilles orientées à barreaux horizontaux et les plaques perforées. Ces alternatives sont peu étudiées en France et sont rarement implémentées. L'objectif de cette section est de prédire la perte de charge au travers de ces barrières et de caractériser les vitesses en amont et en aval de ces structures pour ensuite voir comment elles peuvent être installées avec des exutoires. La première partie concerne les grilles orientées à barreaux horizontaux, cette solution étant également étudiée en Suisse dans le projet FITHydro, et la deuxième partie concerne les plaques perforées.

4.1 Les grilles orientées à barreaux horizontaux

La grille orientée à barreaux horizontaux est apparue, comme solution de protection pour la dévalaison des poissons, récemment en Allemagne et a déjà été mise en œuvre à plusieurs prises dans des centrales hydroélectriques dont le débit va jusqu'à $88 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Ebel, 2016). Cependant, les pertes de charge et les champs d'écoulement en amont et en

aval de ces grilles sont encore peu étudiées, seuls quelques articles ont été récemment publiés pour un nombre limité de configurations (Albayrak, Maager et Boes, 2019 ; Böttcher, Gabl et Aufleger, 2019 ; Meister et al., 2020a, 2020b). Une partie des travaux récents ont été effectués dans le projet Fithydro. L'étude expérimentale sur les grilles orientées à barreaux horizontaux vise à tester de larges plages et de nombreuses combinaisons d'angles d'orientation, de formes de barreau et de rapports entre l'espacement et l'épaisseur des barreaux. L'objectif est, en premier, de caractériser l'impact de ces grilles sur l'écoulement, ainsi que les pertes de charge qu'elles génèrent, afin de les positionner dans le contexte des dispositifs de dévalaison et si elles satisfont les critères ichtyocompatibles préconisés par l'OFB. Enfin, une formule d'évaluation des pertes de charge est proposée.

4.1.1 Pertes de charge

Les pertes de charges sont estimées à partir des mesures des hauteurs d'eau en amont et en aval de la grille (présentées dans le chapitre 2). Les configurations de grille testées sont pour deux profils de barreaux (Figure 4.1): rectangulaire (PR) et hydrodynamique (PH), d'une largeur de 5 mm, utilisés également dans l'étude précédente de Raynal et al. (2013a), selon 4 angles d'orientation $\alpha = 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ$ (Figure 4.2) et trois espacements entre les barreaux $e = 5; 10; 20$ mm. Ceux-ci correspondent à des rapports (e / b) de 1, 2 et 4. Pour les grilles orientées à 30° , des points supplémentaires ont été mesurés pour les espacements suivants: 7.5 et 15 mm.

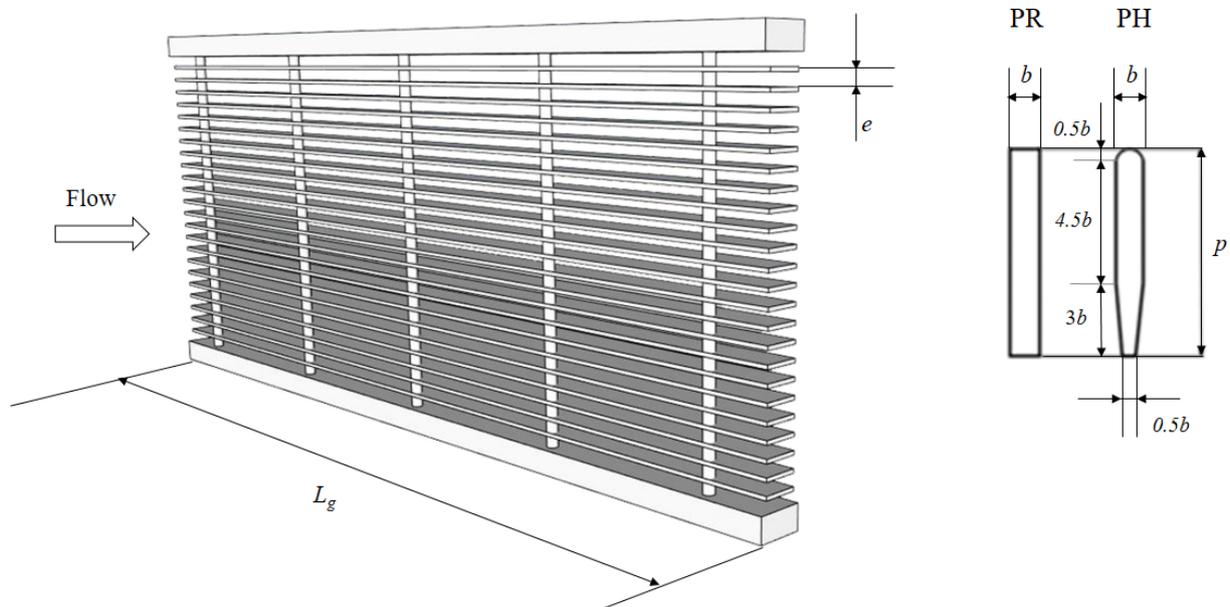


FIGURE 4.1 – Schéma des grilles orientées à barreaux horizontaux avec les différents paramètres et dimensions des barreaux.

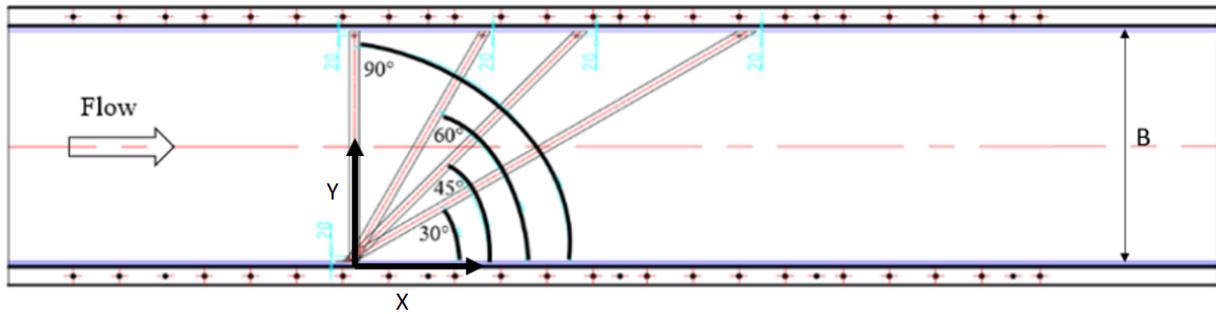


FIGURE 4.2 – Vue de dessus de l'orientation de la grille selon les 4 angles: 30°, 45°, 60°, 90°.

Les dimensions des barreaux (b , e , p), les paramètres des configurations de grilles (α , e/b) ainsi que les paramètres hydrauliques de l'écoulement (Q , H_1 , V_1 , Re , Re_b , Fr) sont résumés dans le tableau 4.1.

TABLEAU 4.1 – Dimensions des constituants de la grille et paramètres hydrauliques des expériences.

Paramètres	Valeurs	Unités
Largeur du barreau b	0.005	(m)
Profondeur du barreau p	0.040	(m)
Espacement entre les barreaux e	0.005-0.010-0.020	(m)
Angle d'orientation α	30-45-60-90	(°)
Ratio e/b	1-2-4	(-)
Débit Q	0.5	(m^3s^{-1})
Largeur du canal B	1	(m)
Hauteur d'eau H_1	0.70	(m)
Vitesse débitante V_1	0.72	(ms^{-1})
Nombre de Reynolds Re (basé sur H_1)	720000	(-)
Nombre de Reynolds du barreau Re_b	3600	(-)
Nombre de Froude Fr	0.275	(-)

Les mesures ont aussi été effectuées pour deux débits (0.35 et $0.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) ce qui correspond à deux vitesses (0.5 et 0.72 ms^{-1}). Ces mesures ont servi à valider le critère d'invariance du coefficient de pertes de charge au nombre de Reynolds du barreau à partir de 3000 et du nombre de Froude à partir de 0.2. Ce critère a été déjà étudié dans plusieurs études dont (Albayrak, Maager et Boes, 2019; Raynal et al., 2013a) et donc seulement le coefficient de pertes de charge sera représenté. Le modèle expérimental est à l'échelle 1:2 par rapport à la similitude de Froude.

La Figure 4.3 présente les points de mesure de la hauteur d'eau. Ces derniers sont repérés, par rapport à la position de montant amont de la grille à $x=0$ m, et sont respectivement

positionnés à $x = -2.82$ m et -1.27 m en amont de la grille et à $+2.36$ m et $+3.26$ m en aval de la grille. Les sondes sont alignées dans le plan médian du canal à $y = 0.5$ m et sont réglées en hauteur de façon à mesurer les variations de la surface sur une plage allant de 0 mm à jusqu'à 350 mm. Le choix des positions comme pour les grilles inclinées a été fait à partir de différentes mesures et la présence de deux sondes en amont et en aval permet de valider les mesures de pertes de charge.

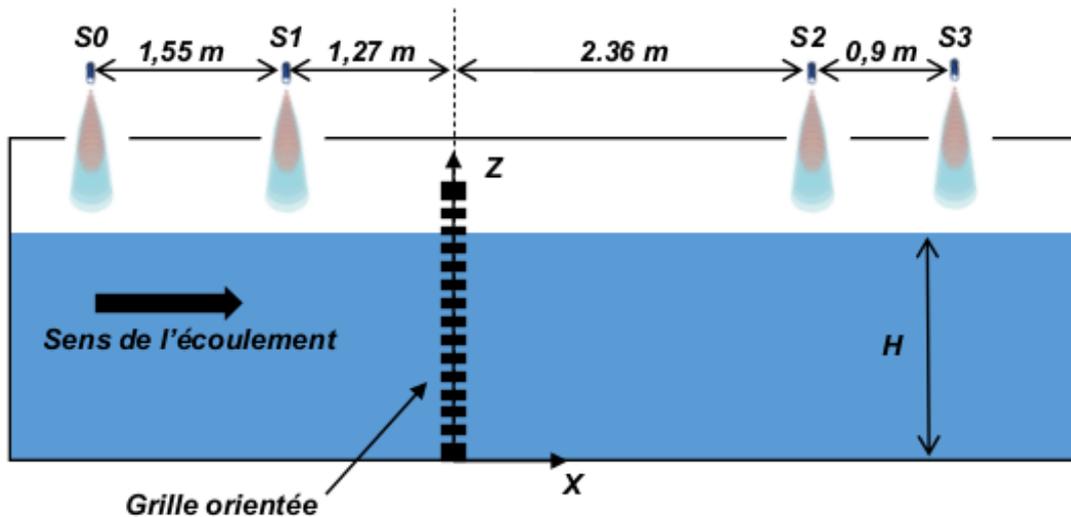


FIGURE 4.3 – Vue de côté du canal avec l'emplacement des sondes de mesure (0, 1) en amont de la grille et (2, 3) en aval de la grille.

Coefficient de pertes de charge expérimental

Le coefficient de perte de charge, calculé à partir l'équation 2.11, est représenté en fonction de l'angle d'orientation et de l'espacement pour chaque profil de barreau (Figure 4.4). Le coefficient de perte de charge maximal est obtenu des barreaux rectangulaires espacés de 5 mm et augmente avec l'angle d'orientation, de 1.4 pour 30° à 4.7 pour 90° . Le coefficient de perte de charge minimal est obtenu des barreaux hydrodynamiques espacés de 20 mm et augmente avec l'angle d'orientation, de 0.3 pour 30° à 0.5 pour 90° . Les grilles perpendiculaires ($\alpha = 90^\circ$), avec des barreaux rectangulaires et l'espacement le plus bas ($e = 5$ mm) génèrent les pertes de charge les plus élevées.

La Figure 4.5 montre l'évolution du coefficient de perte de charge en fonction du ratio entre l'espacement et la largeur des barreaux pour chaque profil, pour $e/b = 1, 2, 4$ et de l'angle d'orientation. Le coefficient de perte de charge diminue avec le rapport e/b qui augmente. Pour un angle de 90° , le coefficient de perte de charge des barreaux au profil hydrodynamique est 4 fois plus élevé pour $e/b = 1$ à $e/b = 4$. Les résultats montrent donc que les grilles orientées à barreaux horizontaux génèrent des pertes de charge qui évoluent

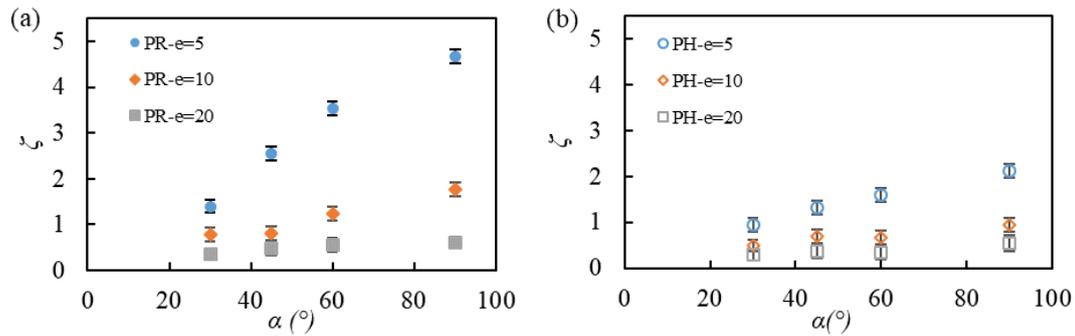


FIGURE 4.4 – Comparaison du coefficient de pertes de charge (a) Profil Rectangulaire (PR), (b) Profil hydrodynamique (PH), pour les trois espacements (e) en fonction de l'angle d'orientation (α).

de la même manière que les résultats obtenus des grilles inclinées et des grilles orientées à barreaux verticaux, par rapport aux effets liés au profil de barreau et à l'angle d'orientation donnant des critères généralisables.

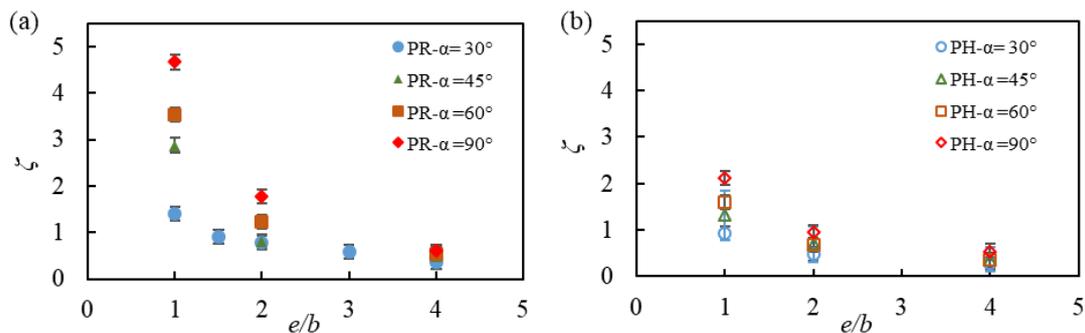


FIGURE 4.5 – Comparaison du coefficient de pertes de charge (a) Profil Rectangulaire (PR), (b) Profil hydrodynamique (PH), pour les 4 angles d'orientation (α) en fonction du ratio entre l'espacement entre les barreaux et la largeur du barreau (e/b).

Comparaison avec les mesures de la littérature

La comparaison entre les mesures récentes effectuées sur les grilles orientées à barreaux horizontaux est présentée sur la Figure 4.6. Dans l'étude de Böttcher, Gabl et Aufferger (2019), les grilles orientées à barreaux horizontaux cylindriques d'un diamètre de 5 mm ont été testées pour trois angles (30° , 45° et 90°) et 3 espacements entre les barreaux (5, 10 et 15 mm et $e/b = 1, 2, 3$). Albayrak, Maager et Boes (2019) ont également étudié des grilles à barreaux horizontaux orientées à 30° et 45° , avec $e/b = 1, 2, 3$ et des barreaux de profils rectangulaire (PR) et hydrodynamique non identique à celui de Raynal et al. (2013a), noté (PH2). L'étude de Szabo-Meszaros et al. (2018) concernait plusieurs configurations de grilles (orientées à barreaux horizontaux ou verticaux, inclinées) pour un seul

angle de 30° , une largeur de barreau de 8 mm et un espacement entre les barreaux égal à 15 mm ($e/b = 1,87$), avec deux profils de barreaux (rectangulaire et hydrodynamique). Plus récemment, Meister et al. (2020a) ont étudié les grilles à barreaux horizontaux orientées à 30° et 45° , avec $e/b = 1.25, 2.5$ et 3.75 et 4 formes de barreaux différents (rectangulaire, rond+plat, forme de feuille, ellipsoïdal) détaillées dans le chapitre 3 dans la Figure 3.5.

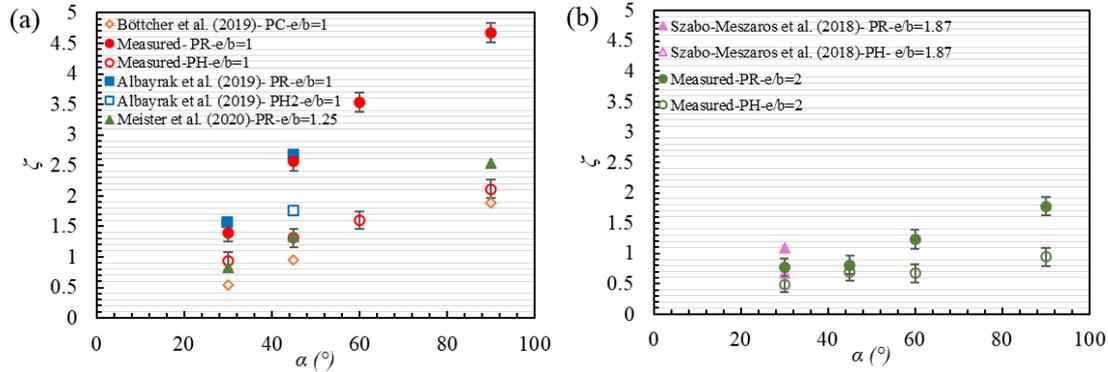


FIGURE 4.6 – Comparaison du coefficient de pertes de charge mesuré avec ceux de la littérature, en fonction de l’angle d’orientation (α); (a) pour $e/b=1$ ou 1.25 et (b) pour $e/b=2$ ou 1.87 ; PC: Profil Cylindrique, PR: Profil Rectangulaire, PH: Profil Hydrodynamique, PH2: Profil Hydrodynamique de l’étude de Albayrak, Maager et Boes (2019).

La tendance des points est essentiellement la même entre différentes configurations, en particulier pour les mêmes rapports d’espacement et les mêmes formes de barreaux. Néanmoins, le profil cylindrique semble générer le coefficient de perte de charge le plus faible. Ceci est proche de celui généré par les barreaux hydrodynamiques dans les études actuelles. Bien que cela semble intéressant, selon les auteurs, ce type de forme peut induire d’autres problèmes comme les vibrations générées par les détachements tourbillonnaires. Pour l’angle d’orientation de 30° , les coefficients de perte de charge trouvés dans les différents articles se superposent bien pour les différents profils de barreau.

Comparaison des mesures avec les formules de la littérature

Le coefficient de perte de charge a également été comparé aux formules de la littérature. Étant donné que la géométrie des grilles orientées à barreaux horizontaux et la géométrie des grilles inclinées sont identiques, les formules de Raynal et al. (2013a) et Meusburger (2002) avec quelques adaptations sont d’abord étudiées. Ensuite, les formules développées pour les grilles à barreaux horizontaux par Albayrak, Maager et Boes (2019) et Meister et al. (2020a) sont comparées.

La formule adaptée du coefficient de perte de charge ξ_R modélisée par Raynal et al.

(2013a) est présentée dans l'équation 4.1:

$$\xi_R = A_i \left(\frac{O_b}{1 - O_b} \right)^{1.65} \sin^2 \alpha + C \left(\frac{O_{sp,H}}{1 - O_{sp,H}} \right)^{0.77} \quad (4.1)$$

Avec: $O_b = \frac{N_b \times b}{H_1}$: et : $O_{sp,H} = (1 - O_b) \frac{N_{sp} \times D_{sp}}{B}$

A_i est le coefficient de la forme du barreau (-), O_b le degré d'obstruction dû aux barreaux (-), $O_{sp,H}$ le degré d'obstruction des entretoises sur la largeur du canal (-), N_b le nombre de barreau (-), b la largeur du barreau (m), H_1 la hauteur d'eau amont (m), N_{sp} le nombre de barres d'entretoises (-), D_{sp} le diamètre des entretoises (m), B la largeur du canal (m), α l'angle d'inclinaison (°) et $C = 1.79$ le coefficient de forme des entretoises (-).

La formule du coefficient de perte de charge ξ_M modélisée par Meusbarger (2002) est présentée dans l'équation 4.2:

$$\xi_M = K_i \left(\frac{P}{1 - P} \right)^{1.5} \sin^2 \alpha \quad (4.2)$$

Avec: $P = \frac{A_b + A_s}{A_t}$

K_i est le coefficient de la forme du barreau (-), P le degré d'obstruction dû aux barreaux (-), A_b l'aire des barreaux (m²), A_s l'aire des entretoises (m²), A_t l'aire totale de la grille (m²), α l'angle d'orientation (°).

La formule du coefficient de perte de charge ξ_A modélisée par Albayrak, Maager et Boes (2019) est présentée dans l'équation 4.3:

$$\xi_A = K_i \left(\frac{P}{1 - P} \right)^{1.88} C_l C_\alpha \quad (4.3)$$

Avec: $P = \frac{A_b + A_s}{A_t}$

K_i est le coefficient de la forme du barreau (-), P le degré d'obstruction dû aux barreaux (-), A_b l'aire des barreaux (m²), A_s l'aire des entretoises (m²), A_t l'aire totale de la grille (m²), C_l le coefficient de pertes de charge dû à la profondeur barreau (-) et C_α le coefficient de pertes de charge dû à l'orientation de la grille (-).

La formule du coefficient de perte de charge ξ_{Mei} modélisée par Meister et al. (2020a) pour les barreaux rectangulaires est présentée dans l'équation 4.4:

$$\xi_{Mei} = 2.33 \left(\frac{BR}{1 - BR} \right)^{3/2} \sin^4 \alpha C_{Db} C_{Ov} \quad (4.4)$$

Avec BR le degré d'obstruction dû aux barreaux (-), C_{Ov} le coefficient de pertes de charge dû au colmatage (-), C_{Db} le coefficient de pertes de charge dû à la profondeur du barreau (-) et α l'angle d'orientation (°).

Les tracés de la Figure 4.7 représentent les coefficients de perte de charge, en fonction de e/b , pour différents angles d'orientation avec un profil de barreau rectangulaire afin de

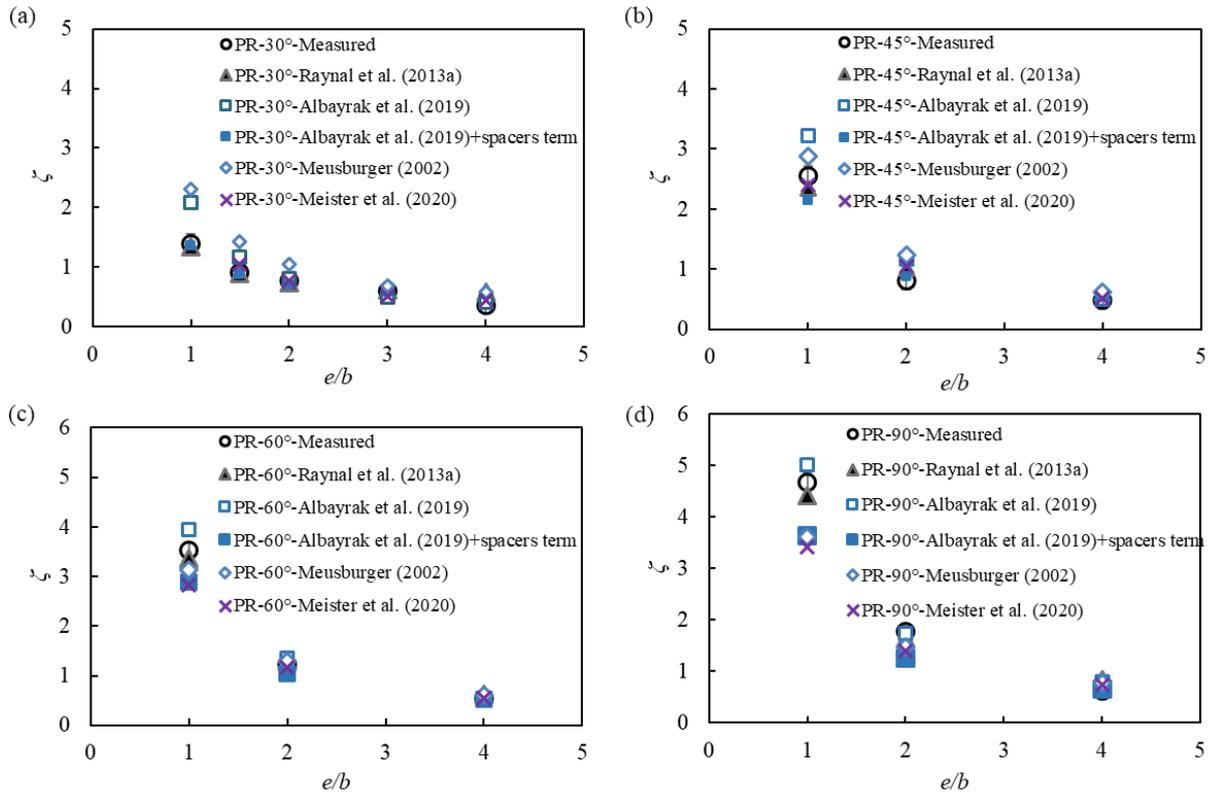


FIGURE 4.7 – Comparaison du coefficient de pertes de charge modélisé avec ceux de la littérature, en fonction de e/b ; (a) pour $\alpha = 30^\circ$; (b) pour $\alpha = 45^\circ$; (c) pour $\alpha = 60^\circ$; (d) pour $\alpha = 90^\circ$; pour le profil de barreau rectangulaire (PR).

comparer les résultats expérimentaux aux valeurs prédites par les formules de Raynal et al. (2013a), Albayrak, Maager et Boes (2019), Meusburger (2002) et Meister et al. (2020a).

La concordance entre les valeurs expérimentales et prédites est donnée par l'écart moyen entre les points mesurés et les différentes formules (tableau 4.2). La formule de Raynal et al. (2013a), dont les écarts varient de 0.04 à 0.07, fournit la meilleure approximation. Ces résultats montrent l'applicabilité de cette formule initialement produite pour les grilles inclinées.

En outre, la formule de Albayrak, Maager et Boes (2019) surestime les valeurs expérimentales du coefficient, générant notamment les écarts les plus significatifs pour les faibles valeurs de e/b . Cette différence peut-être attribuée due à la non-séparation du terme dû aux entretoises dans cette formule alors qu'elle est explicitement modélisée par Raynal et al. (2013a) par le terme $+C \left(\frac{O_{sp,H}}{1-O_{sp,H}} \right)^{0.77}$. Si dans la formule de Albayrak et al. (2019), nous distinguons le terme dû aux entretoises et le terme dû aux barreaux, et ajoutons le modèle de Raynal et al. (2013a) pour le terme dû aux entretoises, nous obtenons la courbe repérée par Albayrak et al. (2019) + terme dû aux entretoises.

Une fois modifié afin de tenir compte du terme proposé par Raynal et al. (2013a) pour modéliser la présence des entretoise, la formule d'Albayrak et al. (2019) donne une prédic-

tion satisfaisante pour les angles de 30° et 45°. Cependant les écarts augmentent pour des angles d'orientation plus élevés et des rapports e/b faibles, qui illustrent que cette formule n'a pas été validée pour ces configurations.

Les formules de Meusbürger (2002) et de Albayrak, Maager et Boes (2019) surestiment pour les angles bas (30° et 45°) et sous estiment pour les angles élevés (60° et 90°), les valeurs mesurées. Ceci est indiqué par les écarts du tableau 4.2 qui se situent entre 0.13 et 0.38 pour Meusbürger (2002) et entre 0.09 et 0.45 pour Meister et al. (2020a).

TABLEAU 4.2 – Moyenne des écarts absolus entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites du coefficient de pertes de charge ξ à partir des différentes formules en fonction de l'angle d'orientation (α).

α (°)	Raynal et al. (2013a)	Albayrak et al. (2019)	Albayrak et al. (2019)+spacers term	Meusbürger (2002)	Meister et al. (2020)
30	0.06	0.20	0.05	0.25	0.09
45	0.07	0.18	0.13	0.13	0.07
60	0.04	0.15	0.24	0.15	0.30
90	0.04	0.10	0.34	0.38	0.45

Comparaison du coefficient de pertes de charge entre les différentes configurations de grilles orientées

Les grilles orientées à barreaux horizontaux étant une nouvelle topologie de grille orientée, il est intéressant de comparer les pertes de charge qu'elles induisent par rapport aux autres. Les coefficients de pertes de charge sont donc comparés dans différentes configurations de grilles orientées. La Figure 4.8 illustre les configurations de grille: orientée avec barreaux horizontaux (HB), orientée avec barreaux verticaux perpendiculaires au plan de grille (VPB) et orientée avec barreaux verticaux dans le sens de l'écoulement (VSB).

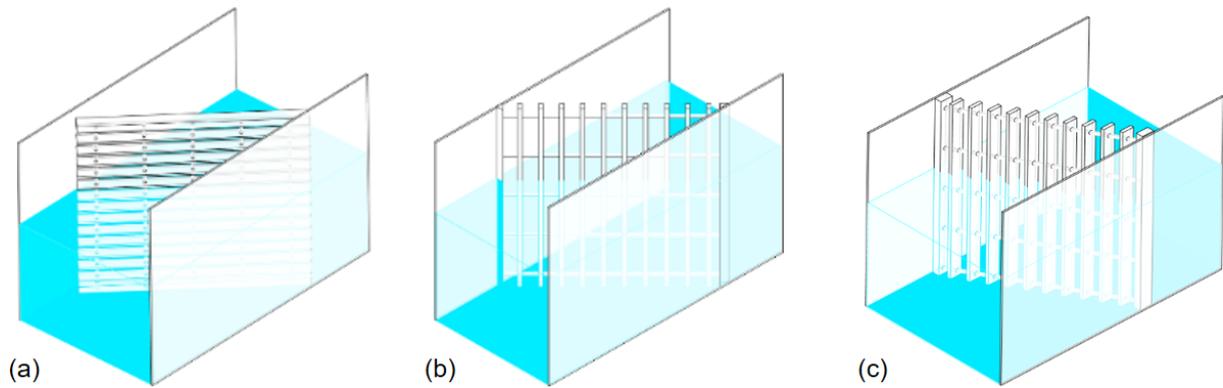


FIGURE 4.8 – Grilles orientées avec: (a) barreaux horizontaux (HB), (b) barreaux verticaux perpendiculaires (VPB), (c) barreaux dans le sens de l'écoulement (VSB).

La Figure 4.9 montre une comparaison des coefficients de perte de charge des grilles orientées à barreaux verticaux perpendiculaires au plan de grille calculés avec la formule de Raynal et al. (2013b) dans l'équation 4.5, des grilles orientées à barreaux verticaux dans le sens de l'écoulement calculés avec la formule de Raynal et al. (2014) dans l'équation 4.6 et des grilles orientées à barreaux horizontaux calculés avec la formule de l'équation 4.1.

$$\xi = K_i \left(\frac{O_g}{1 - O_g} \right)^{1.6} \left(1 + k_i \left(\frac{90^\circ - \alpha}{90^\circ} \right)^{2.35} \left(\frac{1 - O_g}{O_g} \right)^3 \right) \quad (4.5)$$

$$\xi = K_i \left(\frac{O_g}{1 - O_g} \right)^{1.6} \quad (4.6)$$

K_i et k_i sont les coefficients de forme des barreaux (-), O_g le degré d'obstruction total de la grille (-) et α l'angle d'orientation de la grille (°).

D'une grille droite ($\alpha = 90^\circ$) à une grille à faible angle d'orientation, les coefficients de perte de charge des grilles orientées à barreaux verticaux perpendiculaires à l'écoulement augmentent de manière exponentielle, les coefficients des grilles orientées à barreaux verticaux dans le sens de l'écoulement sont constants et les coefficients des grilles orientées à barreaux horizontaux diminuent. Les grilles à barreaux horizontaux sont donc les plus favorables dans la diminution de la perte de charge suivies par les grilles à barreaux dans

le sens de l'écoulement. Cette comparaison conforte les avantages de l'implémentation de ce nouveau type de grille dans les centrales hydroélectriques.

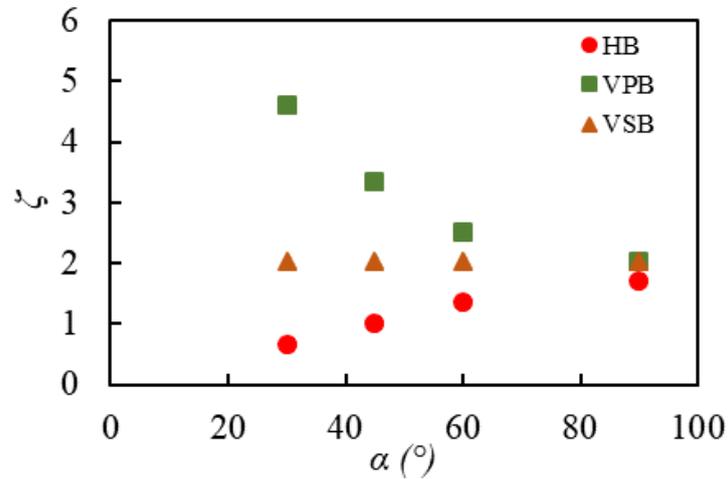


FIGURE 4.9 – Comparaison du coefficient de pertes de charge en fonction de l'angle d'orientation (α) pour VPB, VSB et HB avec des barreaux rectangulaires et $e/b=2$.

4.1.2 Vitesse

Deux profils de vitesse sont mesurés, à 50 mm en amont de la grille et 400 mm en aval de la grille avec les sondes ADV. Ils sont présentés dans cette section et discutés afin de vérifier les critères favorables au guidage des poissons depuis l'amont et pour évaluer l'homogénéité du débit en aval de ce type de grille par rapport à l'efficacité des turbines.

Résultats expérimentaux

La Figure 4.10 présente les profils de vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante amont en fonction de la coordonnée Y normalisée sur la largeur du canal B , pour un profil de barreau rectangulaire, un espacement entre les barreaux égal à 10 mm et les différents angles d'orientation, mesurés à 50 mm le long de la grille en amont. Les 4 courbes de la vitesse axiale V_x normalisée (amont et aval) sont similaires, et les valeurs sont constantes à environ 1 fois V_o , marquées par des oscillations dues aux décélérations au niveau des barres d'entretoises, ne montrant aucun effet de l'angle d'orientation et aucune hétérogénéité sur la largeur du canal. La vitesse normale normalisée V_n varie d'environ $0.5 V_o$ pour un angle de 30° à $1 V_o$ pour un angle de 90° , et est quasiment constante sur la largeur du canal et en accord avec la valeur théorique $V_n / V_o = \sin \alpha$. Par conséquent, le rapport entre les vitesses tangentielle et normale V_t / V_n varie d'environ 0 pour $\alpha = 90^\circ$, à environ 1 pour $\alpha = 45^\circ$ et 1.73 pour $\alpha = 30^\circ$, en accord avec la valeur théorique $V_t / V_n = 1 / \tan(\alpha)$.

La Figure 4.11 expose le profil de vitesse tangentielle V_t normalisée pour les barreaux

PH et PR. Les profils varient avec l'angle d'orientation, approchant 0 pour 90° , contre 0.8 V_o pour 30° , l'angle le plus bas testé, sans aucun effet du profil du barreau. Les valeurs sur la largeur du canal sont presque constantes et sont en accord avec la valeur théorique $V_t / V_o = \cos \alpha$.

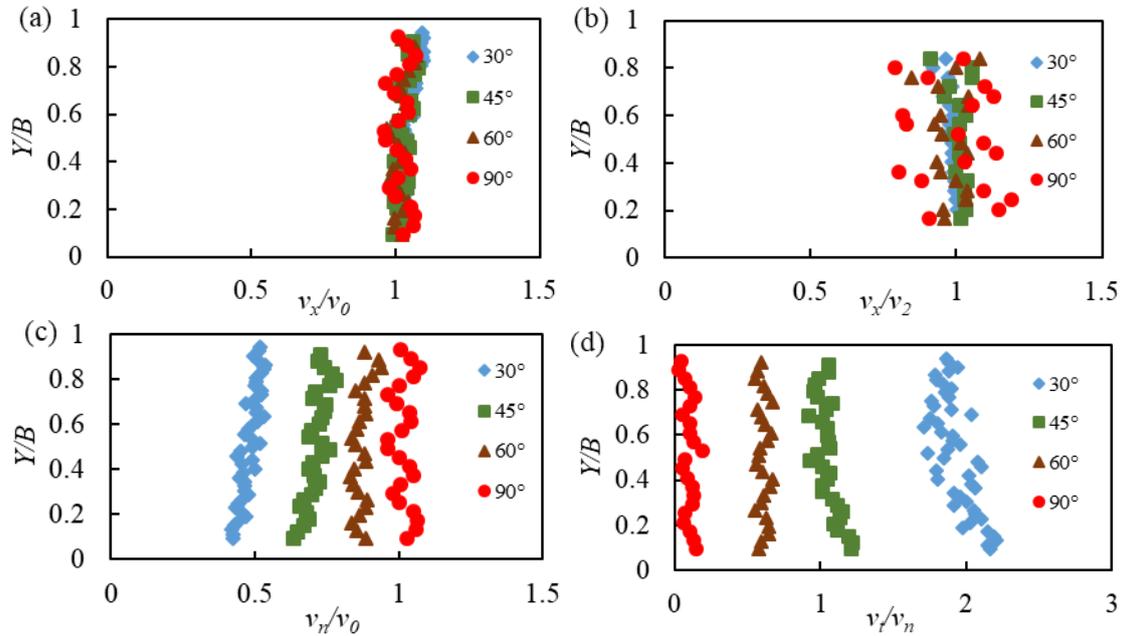


FIGURE 4.10 – Comparaison des profils de vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante amont pour Profil Rectangulaire (PR), $e = 10$ mm et les différents angles (α). (a) vitesse axiale amont, (b) vitesse axiale aval normalisée par V_2 la vitesse débitante aval, (c) vitesse normale amont, (d) ratio des vitesses tangentielle et normale.

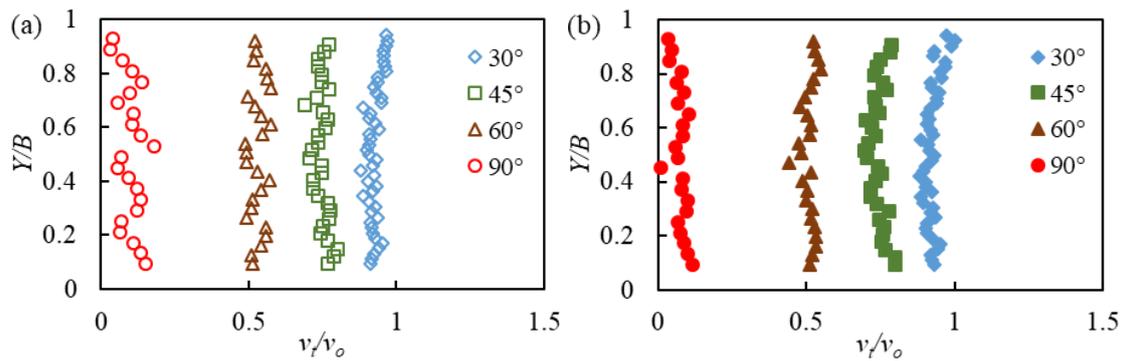


FIGURE 4.11 – Comparaison des profils de vitesse tangentielle normalisée par V_o la vitesse débitante amont pour $e = 10$ mm et les différents angles (α). (a) Profil Hydrodynamique (PH), (b) Profil Rectangulaire (PR).

La Figure 4.12 montre des profils de vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante amont pour l'angle d'orientation de 30° en fonction de la forme des barreaux et de l'espacement entre les barreaux. La superposition des courbes est perceptible et prouve l'invariance du profil de vitesse avec le rapport entre l'espacement et la largeur du barreau. La vitesse normalisée V_x est influencée par les barres d'entretoises arrondies verticales entraînant des déficits de vitesse en amont de chaque support et une accélération entre les barres d'entretoises. Le profil de vitesse aval présente une décélération à l'extrémité de la grille, située à $Y/B > 0.9$. Ce phénomène est dû au blocage provoqué par l'angle d'orientation où l'écoulement est contraint entre la paroi du canal et l'extrémité de la grille.

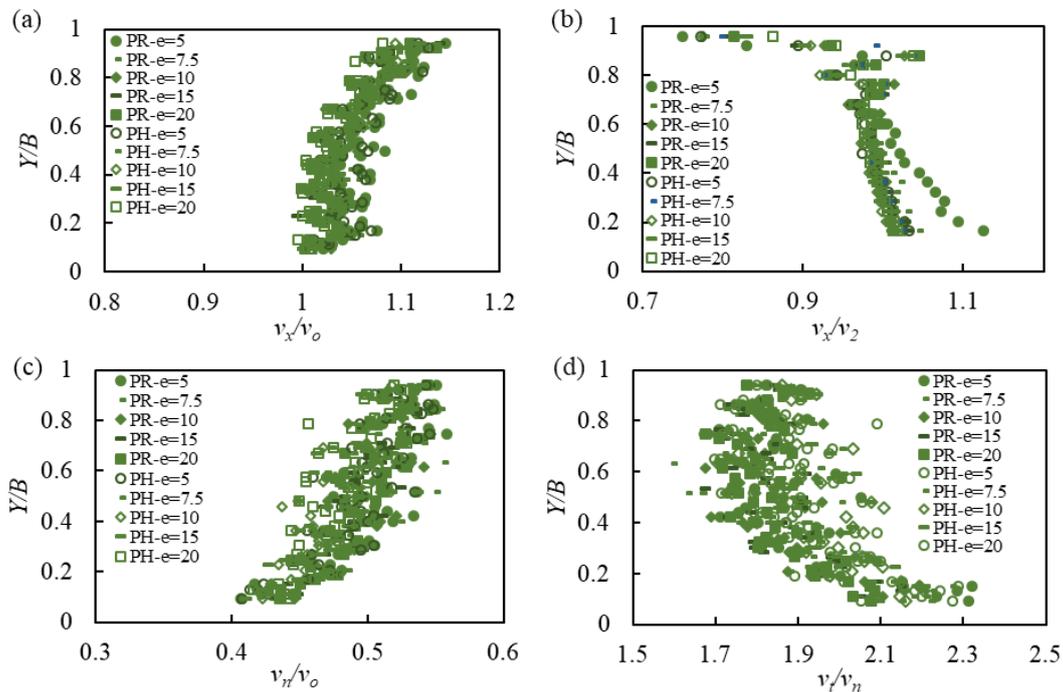


FIGURE 4.12 – Profils transversaux de vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante amont en fonction des deux formes de barreau et les différents espacements entre les barreaux (e) pour un angle $\alpha = 30^\circ$. (a) vitesse axiale amont, (b) vitesse axiale avale normalisée par V_2 la vitesse débitante avale, (c) vitesse normale amont, (d) ratio des vitesses tangentielle et normale.

Comparaison des profils de vitesse des grilles orientées

Les profils de vitesse des grilles orientées pour différentes configurations de barreaux (HB, VPB, VSB), sont comparés afin d'évaluer le respect des critères biologiques en amont des différentes grilles. La position des deux profils de vitesse est la même pour les trois études (50 mm en amont de la grille et 400 mm en aval de la grille, à la mi-profondeur $z = 350$ mm du fond du canal).

Les Figures 4.13 et 4.14 comparent les profils des vitesses normalisées normale et tangentielle V_t / V_o et V_n / V_o , et du rapport V_t / V_n mesurés en amont de la grille, pour un rapport e/b égal à 2, les deux formes de barreaux (Profil Rectangulaire PR et Profil Hydrodynamique PH) et deux angles (30° et 45°).

Les trois profils de vitesse le long de la grille à barreaux horizontaux et le long de la grille à barreaux verticaux dans le sens de l'écoulement sont similaires et presque homogènes sur la largeur du canal. En revanche, les profils de vitesse le long de la grille à barreaux verticaux perpendiculaires montrent des tendances différentes, avec une augmentation de V_t/V_o et V_n/V_o et une diminution de V_t/V_n de l'amont vers l'aval. Ceci est observé pour les deux formes de barreaux et les deux angles. Les profils V_t/V_o et V_t/V_n diminuent avec l'augmentation de l'angle d'orientation de 30° à 45° alors que les profils V_n/V_o augmentent. L'influence de l'angle est donc remarquable.

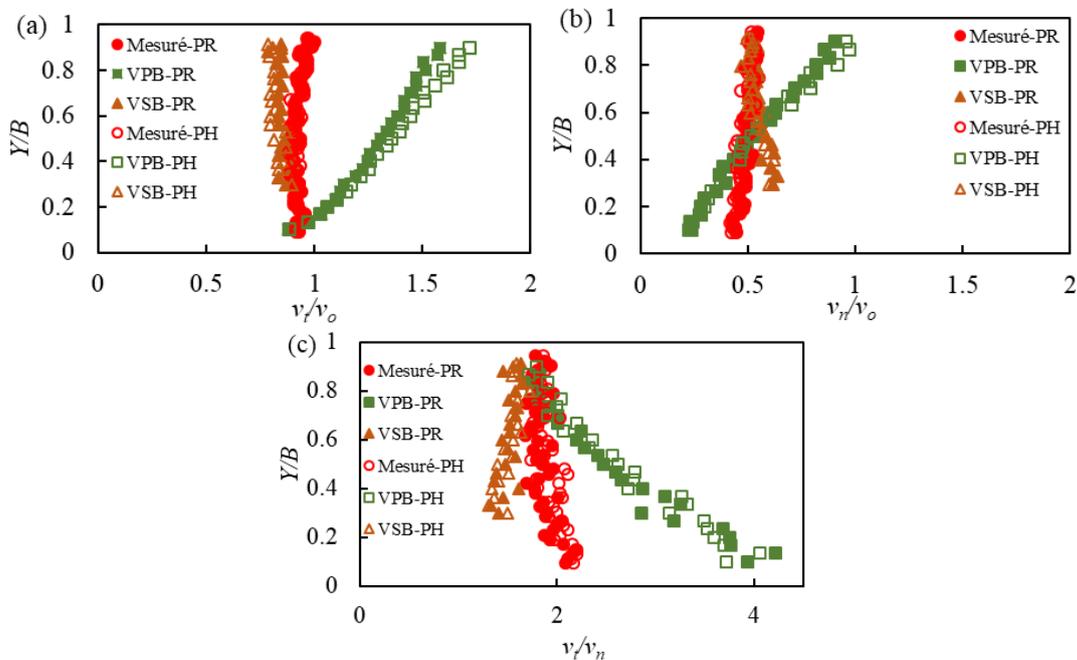


FIGURE 4.13 – Profils de vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante amont en fonction des grilles VPB, VSB and HB, pour un espacement entre les barreaux $e = 10$ mm, les deux formes de barreaux et un angle $\alpha = 30^\circ$. (a) vitesse tangentielle amont, (b) vitesse normale amont, (c) ratio des vitesses tangentielle et normale.

La Figure 4.15 compare les profils de vitesse normalisée axiale V_x par la vitesse débitante aval V_2 , mesurés en aval des grilles, pour un rapport e/b égal à 2, pour les barreaux rectangulaires et un angle de 45° pour les configurations de grilles orientées. Le profil des grilles VPB génère un profil asymétrique tandis que les grilles VSB et HB présentent des profils homogènes sur 80 à 90% de la largeur du canal et des vitesses réduites dans les 10 à 20% à gauche le long d'une rive (du côté de l'extrémité amont de la grille VSB et du côté de

l'extrémité aval du grille HB). Le positionnement d'un exutoire serait donc favorable pour $Y/B = 1$ vers l'extrémité droite de la grille afin que le poisson soit redirigé correctement sans effet local d'un gradient de vitesse important.

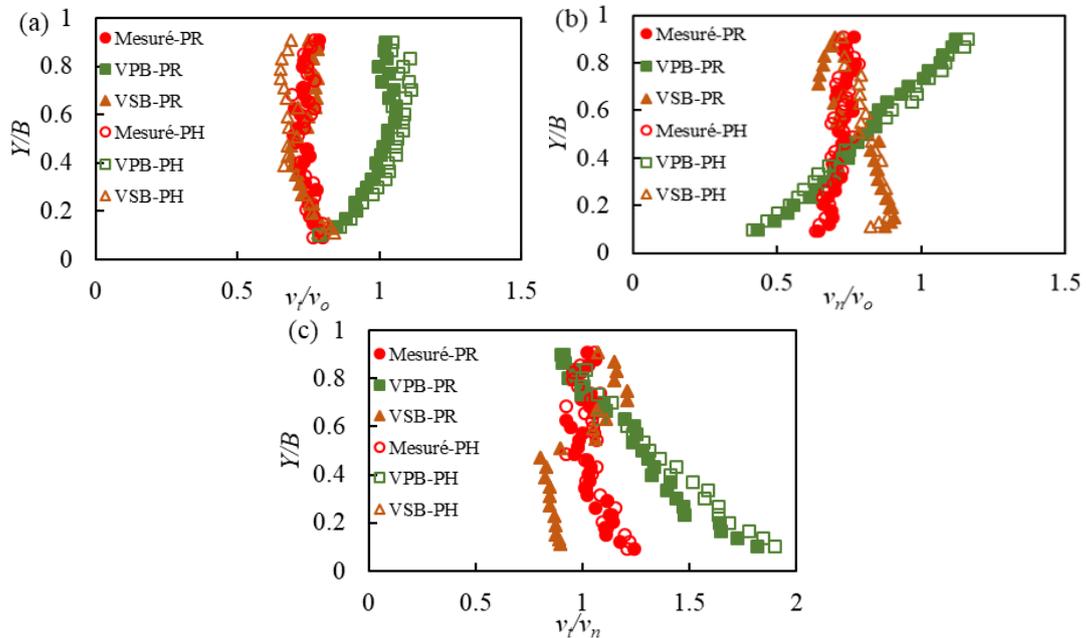


FIGURE 4.14 – Profils de vitesse normalisée par V_0 la vitesse débitante amont en fonction des grilles VPB, VSB and HB, pour un espacement entre les barreaux $e = 10$ mm, les deux formes de barreaux et un angle $\alpha = 45^\circ$. (a) vitesse tangentielle amont, (b) vitesse normale amont, (c) ratio des vitesses tangentielle et normale.

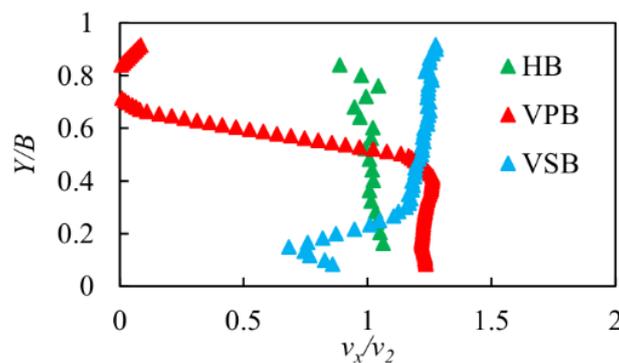


FIGURE 4.15 – Profils de vitesse axiale avale normalisée par la vitesse débitante avale V_2 en fonction des grilles VPB, VSB and HB, pour un espacement entre les barreaux $e = 10$ mm, PR et un angle $\alpha = 45^\circ$.

Vérification des critères biologiques

Les profils de vitesse amont le long des grilles orientées à barreaux horizontaux étant en accord avec les valeurs théoriques, le respect des critères de guidage $V_t / V_n \geq 1$ est

obtenu pour un angle d'orientation $\alpha \leq 45^\circ$. La vitesse d'approche maximale en amont qui satisfait aux critères d'impact ($V_n \leq 0,5 \text{ ms}^{-1}$) peut être déterminée en utilisant l'équation suivante:

$$V_{n,max} = K \times \sin\alpha \times V_o \text{ avec } V_{n,max} \leq 0.5 \text{ms}^{-1} \quad (4.7)$$

- K=1.2 pour les grilles orientées à barreaux verticaux dans le sens de l'écoulement (VSB)
- K=1.7 pour les grilles orientées à barreaux verticaux perpendiculaires au sens de l'écoulement (VPB)
- K=1.0 pour les grilles orientées à barreaux horizontaux (HB)

Avec K le ratio entre la valeur théorique et la valeur mesurée de la vitesse normale obtenu pour les VSB et VPB dans (Raynal et al., 2014). Le ratio K=1 est le critère proposé pour les grilles orientées à barreaux horizontaux. La valeur de vitesse d'approche maximale est de 0.7 ms^{-1} pour un angle d'orientation $\alpha = 45^\circ$. Pour les valeurs supérieures à 0.7 ms^{-1} , l'angle doit être diminué pour éviter le risque de placage des poissons contre la grille. Par exemple, pour une valeur usuelle de vitesse dans les centrales hydroélectriques de 0.8 à 0.9 ms^{-1} , l'angle de la grille doit être entre 38° et 33° , respectivement. Ces critères sont proches des critères imposés pour les grilles orientées à barreaux dans le sens de l'écoulement proposés par Raynal et al. (2014). Néanmoins, ces deux types de grilles s'accordent mieux avec les critères biologiques que les grilles orientées à barreaux perpendiculaires au plan de grille (Albayrak et al., 2017 ; Raynal et al., 2013b).

Discussions

L'étude des grilles orientées à barreaux horizontaux a permis d'analyser cette configuration de grille sous différents aspects. La perte de charge induite par ces grilles augmente avec le taux de blocage et est moindre pour les profils hydrodynamiques que pour les profils rectangulaires. Elle diminue également en fonction de l'angle d'orientation de la grille. Les résultats de ces mesures sont cohérents et proches de ceux de la littérature récente (Albayrak, Maager et Boes, 2019 ; Böttcher, Gabl et Aufleger, 2019 ; Meister et al., 2020a ; Szabo-Meszaros et al., 2018). De plus, la formule de pertes de charge proposée par Raynal et al. (2013a) pour les grilles inclinées convient également pour les grilles orientées à barreaux horizontaux.

Les profils de vitesse montrent peu d'influence de l'angle d'orientation et aucune hétérogénéité sur la largeur du canal. Par conséquent, les composantes normale et tangentielle de la vitesse le long de la grille sont en accord avec leurs valeurs théoriques données par décomposition angulaire. Le respect du critère $V_t / V_n \geq 1$ est obtenu pour un angle d'orientation $\alpha \leq 45^\circ$. La vitesse moyenne en amont pour laquelle les critères d'impact ($V_n \leq 0.5$

ms^{-1}) est satisfaite dépend de l'angle ($V_1=0.7, 0.8$ et 0.9 ms^{-1} à $\alpha = 45^\circ, 38^\circ$ et 33° , respectivement).

En résumé, ces résultats confirment que les grilles orientées à barreaux horizontaux sont moins contraignantes que les grilles orientées à barreaux verticaux perpendiculaires au plan de grille, et légèrement moins contraignantes que les grilles orientées à barreaux verticaux dans le sens de l'écoulement. Les grilles orientées à barreaux horizontaux ou verticaux dans le sens de l'écoulement sont donc deux solutions intéressantes pour concilier les objectifs de protection des poissons et le fonctionnement optimal des prises d'eau. Ces résultats sont également influencés par la nature des supports pour maintenir la grille (nombre d'entretoise et support) même si cela n'a pas été étudié. Pour cette configuration, les aspects liés aux supports obtenus dans le chapitre 3 doivent être ajoutés. Les grilles orientées à barreaux horizontaux ont déjà été installées dans plusieurs prises de centrales hydroélectriques en Allemagne avec un débit jusqu'à $88 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ dont les spécifications et l'association des exutoires adaptées sont étudiées par Ebel (2016), alors qu'à notre connaissance il y a seulement quelques installations de grilles orientées à barreaux horizontaux en France avec peu de retour d'expérience.

4.2 Les plaques perforées

D'autres solutions que les grilles à faible espacement entre les barreaux, existent également. Les grilles Eicher ou «skimming» (Figure 4.16), à faible angle d'inclinaison, ont été développées dans des prises d'eau à surface libre, dans des tuyaux ou dans des conduites forcées pour détourner le poisson vers la goulotte de dévalaison en surface. La grille est constituée de barres en fil de fer de section triangulaire de 2 mm espacées de 2 mm. Ce type de grilles, bien qu'efficace en terme de guidage de poisson, a été peu implémentée du fait qu'il génère de fortes pertes de charges (Courret et Larinier, 2008). Dans les régions montagneuses, certaines des prises d'eau sont des prises tyroliennes, en particulier sur les ruisseaux à fort transport de sédiments et les sites à accès complexe. Pour chacun des trois types de ces prises, des solutions de barrières ont été adaptées:

- Prise d'eau Lépine: l'eau tombe sur une plaque perforée. Ce type de prise d'eau est assez fréquent en France (Figure 4.17).
- Prise d'eau «classique»: l'eau passe par une grille à barreaux longitudinaux, plus ou moins inclinées vers l'aval (Figure 4.18).
- Prise d'eau Coanda: l'eau passe par une grille à barreaux transversaux utilisant l'effet Coanda qui est l'attraction ou l'attachement d'un jet de fluide par une surface convexe sur laquelle il s'écoule (Figure 4.19).

L'ensemble de ces solutions semble innovant et requière davantage d'études pour déterminer entre autre leur application sur d'autre type de prise d'eau. Dans ce contexte, les plaques perforées paraissent intéressantes en dehors des prises d'eau Lépine. En effet, l'inclinaison ou l'orientation de ce dispositif dans une prise d'eau classique serait une alternative possible aux grilles à faible espacement entre les barreau, représentées dans la Figure 4.20. De plus, ce genre de dispositif pourrait être un moyen de guidage des poissons adéquat et peut être plus facilement nettoyé. Afin de répondre aux questionnements sur l'efficacité des plaque perforées, cette partie vient quantifier les pertes de charge qu'elles génèrent et analyser la courantologie amont et aval de ce type de dispositif.

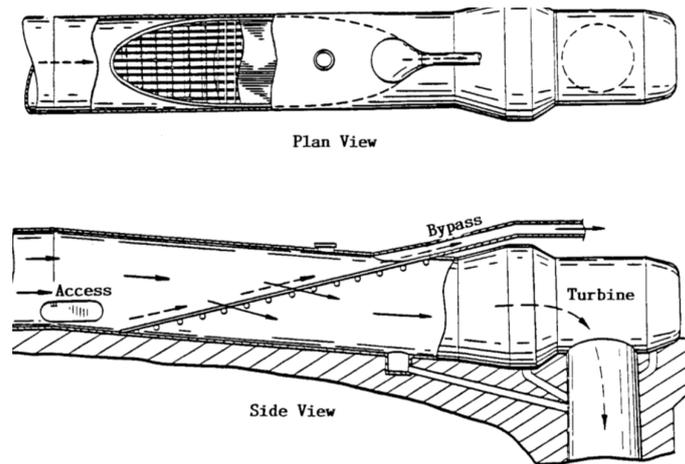
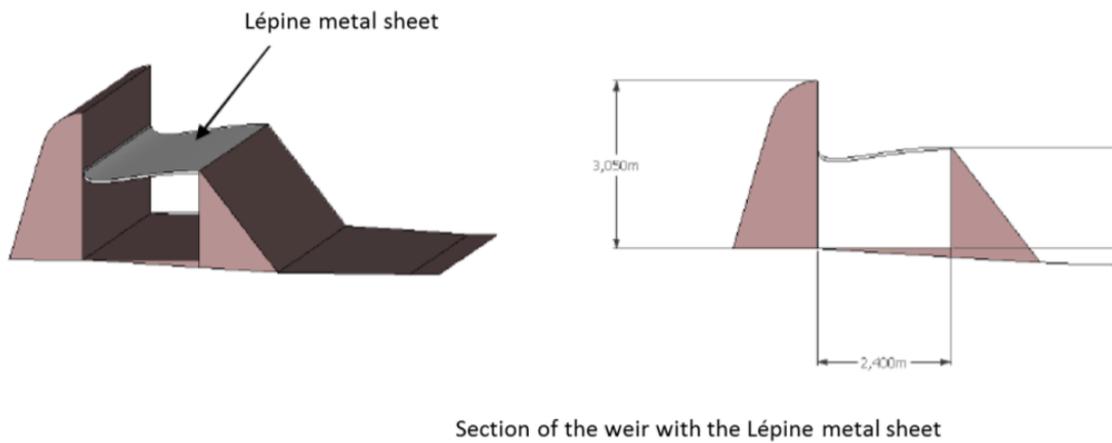


FIGURE 4.16 – Grille Eicher (EPRI, 1987).



Section of the weir with the Lépine metal sheet



FIGURE 4.17 – Diagramme de la prise d'eau Lépine (en haut) et exemple de la prise d'eau Brides les Bains (d'altitude 695 m) sur la rivière du Doron des Allues – France (en bas et sans eau) (Dewitte et David, 2018).



FIGURE 4.18 – Exemple d’une prise d’eau tyrolienne classique: Saint Marcel sur le Doron de la rivière de Belleville (d’altitude 1437 m) (à gauche) et Bocognano sur la rivière du Gravone (d’altitude 890 m) (à droite) – France (Dewitte et David, 2018).

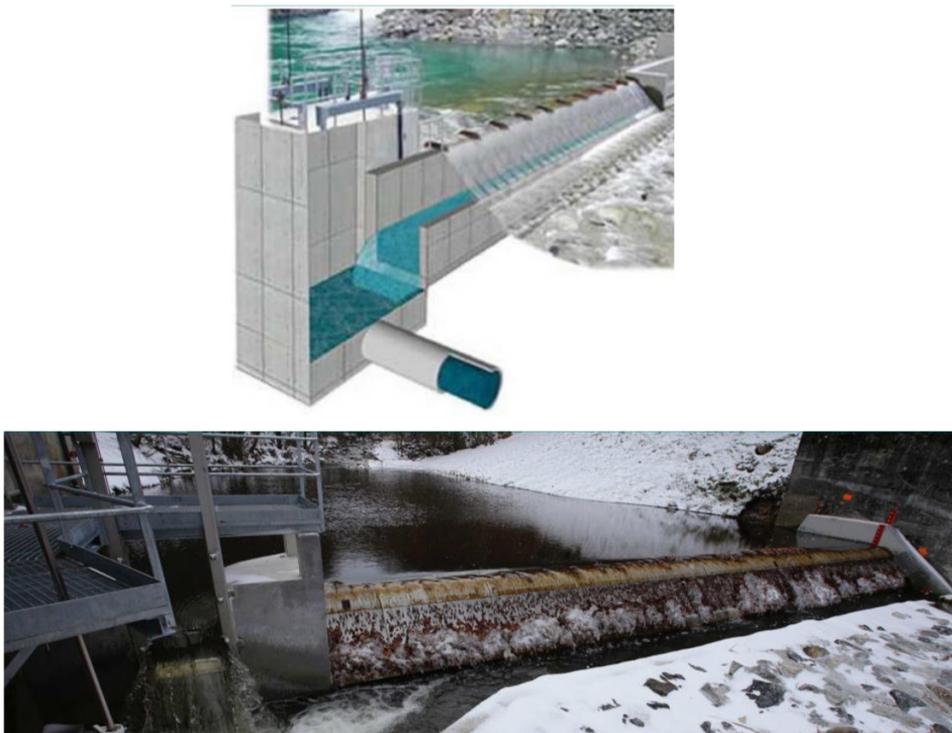


FIGURE 4.19 – Diagramme d’une prise d’eau Coanda et exemple de la prise d’eau Coanda d’Escouloubre (d’altitude 977 m) sur la rivière de l’Aude – France (Dewitte et David, 2018).

4.2.1 Pertes de charge

La plaque perforée testée est une plaque en acier d’une épaisseur de 3 mm, percée d’orifices de forme oblongue. Comme la grille à faible espacement entre les barreaux, la taille de l’orifice est caractérisée par sa largeur a_1 et sa hauteur a_2 mais aussi la distance entre les orifices successifs p_1 et p_2 (Figure 4.21). Ils peuvent être placés parallèlement (a), ou en quinconce verticalement (b) ou horizontalement (c) (Figure 4.22). La largeur des orifices

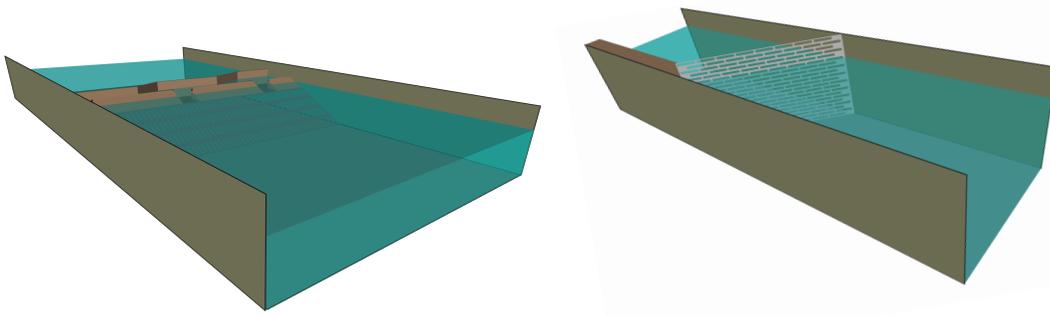


FIGURE 4.20 – Exemple de mise en place de plaques perforées associées à des exutoires, inclinée (à gauche) et orientée (à droite).

doit être inférieure à la plus petite dimension du poisson, sa largeur pour le trou oblong vertical et sa hauteur pour le trou oblong horizontal pour constituer une barrière physique. Les poissons étant capables de se 'pencher', il est préférable de toujours considérer la largeur. Les mêmes critères que pour les grilles à faible espacement entre les barreaux et les valeurs choisies sont directement appliquées à l'espèce de poisson.

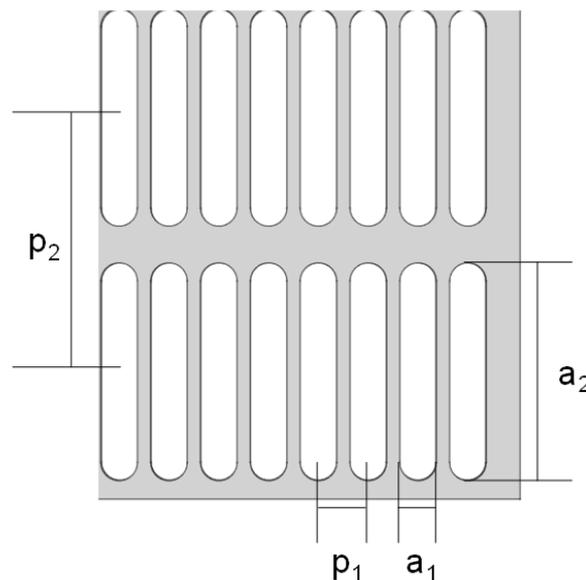


FIGURE 4.21 – Dimensions des orifices des plaques perforées.

Le taux de blocage, fixé par des raisons de tenue mécanique, a été calculé pour une grille composée de barreaux d'un rapport entre la largeur du barreau et l'espacement entre les barreaux $e/b = 2$ et nous avons obtenu un blocage de 0.35 ou une porosité de 65%. Ceci correspond aux grilles préconisées aujourd'hui.

Pour une porosité fixe de 66% proche de la valeur calculée, nous avons testé différentes hauteurs (100; 200 mm) et largeurs (10; 15; 20 mm) d'orifices, des orifices parallèles ou en

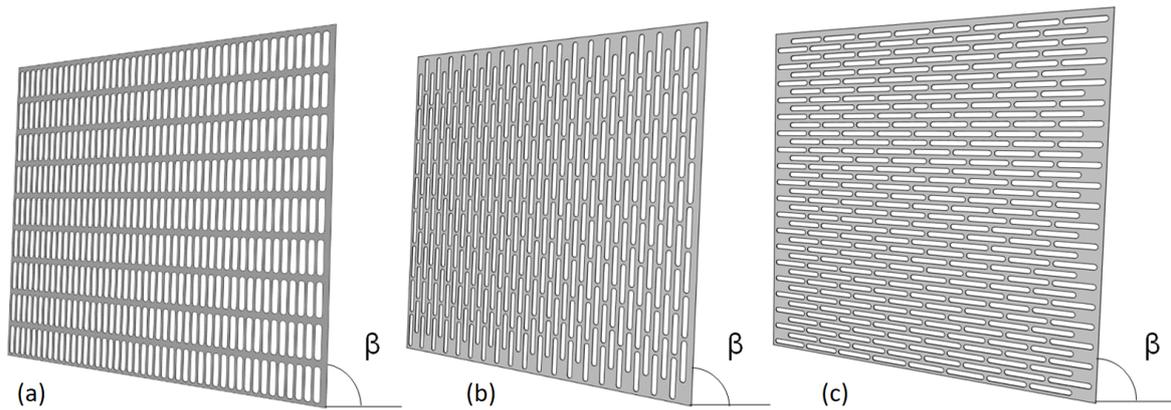


FIGURE 4.22 – Types des plaques perforées: (a) avec des orifices parallèles, (b) avec des orifices en quinconce verticaux et (c) avec des orifices en quinconce horizontaux .

TABLEAU 4.3 – Paramètres des plaques perforées testées.

a_1 (mm)	a_2 (mm)	p_1 (mm)	p_2 (mm)	Type	Porosité (%)
15	100	42	108	Quinconce verticaux	66
10	100	28	108	Quinconce verticaux	66
20	200	58	208	Quinconce verticaux	66
15	200	44	207	Quinconce verticaux	66
15	100	21	108	Parallèle verticaux	66
10	100	14	108	Parallèle verticaux	66
20	200	29	208	Parallèle verticaux	66
15	200	22	207	Parallèle verticaux	66
100	15	108	42	Quinconce horizontaux	66

quinconce, et des orifices horizontaux ou verticaux. L'objectif est de pouvoir choisir la taille des orifices en fonction des espèces cibles. Un total de neuf plaques perforées est comparé avec le même taux de blocage et pour 6 angles d'inclinaison de la plaque β (15° , 25° , 35° , 45° , 60° , 90°). Le tableau 4.3 résume les paramètres géométriques des différentes plaques testées. Chaque plaque est maintenue par deux supports latéraux dans lesquels elle est encastrée et quelques tiges transversales de diamètre 10 mm sur lesquelles elle repose (Figure 4.23), qui ajoutent une obstruction supplémentaire. La vitesse amont est fixée à 0.72 ms^{-1} et la hauteur d'eau amont H_1 est imposée à 0.7 m pour la mesure des hauteurs d'eau ainsi que de la vitesse après avoir vérifié que les résultats ne varient pas avec la vitesse. Le nombre de Froude est 0.275 et le nombre de Reynolds calculé à partir de la hauteur d'eau 720000.

Les sondes utilisées pour la mesure de la hauteur d'eau sont repérées par rapport au

pie de grille situé à $x=0$ et respectivement positionnées à $x = -2$ m et $x = -1$ m en amont de la grille et à $x = +2.6$ m et $x = +3.6$ m en aval de la grille. Elles sont situées dans le plan médian du canal à $y=0.5$ m du canal. La Figure 4.24 schématise l'emplacement des sondes dans le plan (x,z) et du maillage des profils de vitesse en rouge en amont et en aval des grilles.

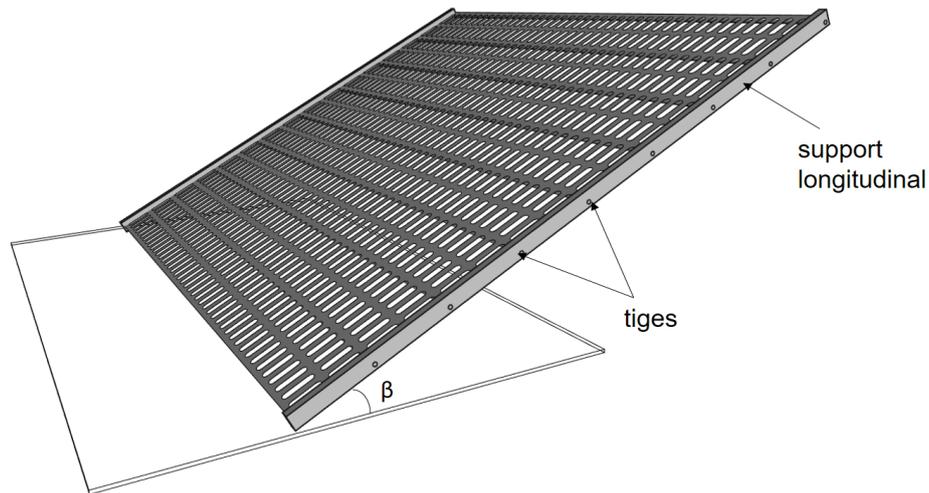


FIGURE 4.23 – Plaques perforées testées avec les supports longitudinaux et les tiges transversales.

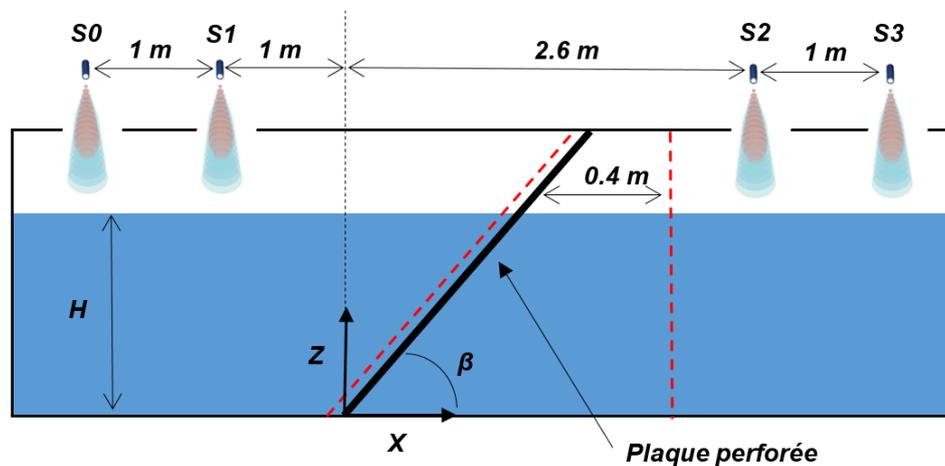


FIGURE 4.24 – Vue de côté du canal à surface libre avec la plaque perforée inclinée. L'emplacement des profils de vitesse est repéré en rouge à 50 mm en amont et à 400 mm en aval de la plaque. Les sondes de la hauteur d'eau sont repérées par S_0 , S_1 , S_2 , S_3 .

La Figure 4.25 montre l'évolution du coefficient de perte de charge en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes plaques perforées. Le coefficient diminue avec l'angle de la même manière que les coefficients de la grille inclinée. Les barres transversales qui supportent la plaque n'affectent pas le coefficient au plus petit angle (15°) en raison de leur

faible diamètre contrairement aux entretoises qui séparent les barreaux. Les plaques avec des orifices parallèles fournissent le même coefficient de perte de charge que les plaques avec des orifices en quinconce à angle égal. Si l'on considère maintenant l'orientation de l'orifice, la plaque avec des orifices horizontaux en quinconce produit un coefficient de perte de charge plus élevé que la plaque avec des orifices verticaux de même largeur et hauteur, ce qui pourrait être attendu du fait de son opposition face à l'écoulement.

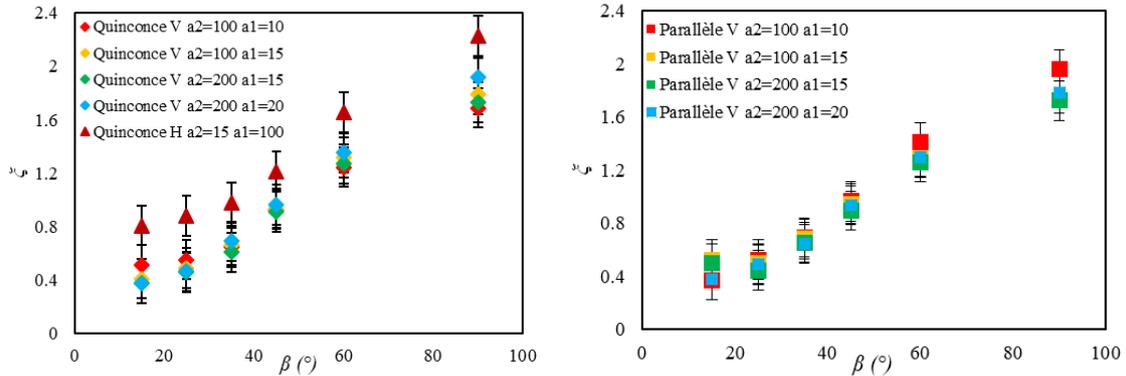


FIGURE 4.25 – Coefficient de pertes de charge mesurés des plaques perforées en fonction de l'angle d'inclinaison. Pour les orifices (verticaux V et horizontaux H) en quinconce (à gauche), pour les orifices parallèles (à droite) et les différentes largeurs a_1 et hauteurs a_2 .

Les formules de perte de charge ont été évaluées à partir de ces mesures pour pouvoir prédire la perte d'énergie pour de telles configurations comparables. La formule de Raynal et al. (2013a) est testée et validée sur les résultats expérimentaux présentée dans l'équation 4.8:

$$\xi_{Raynal} = \xi_{plaques} + \xi_{entretoises} \quad (4.8)$$

$$\xi_{plaques} = A_i \left(\frac{O_b}{1 - O_b} \right)^{1.65} \sin^2 \beta \quad (4.9)$$

$$\xi_{entretoises} = C \left(\frac{O_{sp}}{1 - O_{sp}} \right)^{0.77} \quad (4.10)$$

$$A_i = \frac{(\xi - \xi_{entretoises})}{\xi_{plaques}} \quad \text{avec } \beta = 90^\circ \quad (4.11)$$

Les coefficients de forme identifiés par ces équations varient entre 3.3 et 3.7 (tableau 4.4) pour la plaque à orifices verticaux parallèles ou en quinconce et est plus élevé pour la plaque à orifices horizontaux. Les coefficients R^2 sont très proches de 1 ce qui signifie que les valeurs mesurées sont très bien approximées par la formule et ces coefficients. Pour comparer avec les grilles à barreaux, le coefficient de forme d'un barreau rectangulaire est de 3.85 et les formes de barreaux modifiées, étudiés dans le chapitre précédent, ont donné des coefficients inférieurs à 3.

TABLEAU 4.4 – Coefficient A_i modélisé pour les différentes configurations des plaques.

Type	Quinconce				Parallèle				Quinconce H
a_1 (mm)	10	15	15	20	10	15	15	20	100
a_2 (mm)	100	100	200	200	100	100	200	200	15
A_i	3.2	3.4	3.3	3.7	3.7	3.3	3.3	3.4	4.3
R^2	0.993	0.998	0.998	0.998	0.987	0.997	0.994	0.992	0.998
Global A_i	3.33 avec $R^2=0.964$								4.3

Pratiquement, la plaque perforée à orifices oblongs verticaux parallèles pourrait constituer une alternative techniquement simple aux barreaux. Il paraît possible de rigidifier la plaque en y soudant des barreaux verticaux fins, ou horizontaux dans le sens de l'écoulement sans augmenter les pertes de charge si les trous sont parallèles.

TABLEAU 4.5 – Comparaison des pertes de charge ΔH (mm) pour une grille inclinée à barreaux hydrodynamique et Têtard 8 et pour une plaque perforée pour trois espacements e (10, 15 et 20 mm), une largeur de barreau $b = 7$ mm et deux angles d'inclinaison β (15 et 25°) et une vitesse de 0.7 ms^{-1} et 11 barres d'entretoises pour 15° et 7 barres pour 25°.

ΔH (mm)	Grille inclinée $b = 7$ mm				Plaque perforée	
	15		25		15	25
Forme de barreau	HYD	Têtard 8	HYD	Têtard 8	-	-
$e = 10$ mm	7.0 mm	6.1 mm	11.2 mm	8.6 mm	3 mm	7.9 mm
$e = 15$ mm	6.5 mm	5.9 mm	8.8 mm	7.4 mm	3 mm	7.9 mm
$e = 20$ mm	6.4 mm	6.1 mm	7.9 mm	7.1 mm	3 mm	7.9 mm

Le tableau 4.5 compare les pertes de charge générées par les grilles inclinées à barreaux hydrodynamiques et Têtard 8 et les plaques perforées pour trois espacements e (10, 15 et 20 mm), une largeur de barreaux $b = 7$ mm et deux angles d'inclinaison β (15 et 25°). Ce tableau montre que les plaques perforées génèrent moins de pertes de charge que les grilles inclinées à barreaux hydrodynamiques. Les barreaux Têtard 8 génèrent moins de pertes de charge que les barreaux hydrodynamiques mais la différence avec les plaques perforées est du même ordre. Les plaques perforées réduisent encore plus les pertes de charge que les autres configurations de grille en raison de l'absence des entretoises. Dans ce cas, si les barres de soutien sont soudées derrière les plats de maintien, les pertes de charge dues au support disparaissent.

4.2.2 Vitesse

Deux profils de vitesse ont été mesurés: un à 50 mm en amont le long de la plaque afin de vérifier les critères ichtyocompatibles et un à 400 mm en aval de la plaque afin de vérifier la symétrie de l'écoulement en direction des turbines.

Profils de vitesse en amont des plaques

La composante axiale de la vitesse normalisée par V_o la vitesse débitante en amont, les composantes normale et tangentielle de la vitesse et le rapport entre la vitesse tangentielle et la vitesse normale en fonction de la coordonnée Z sur la hauteur d'eau H , sont représentées à 25° pour la plaque avec des orifices en quinconce (Figure 4.26) ou parallèles (Figure 4.27) verticaux à différentes largeurs a_1 et hauteurs a_2 .

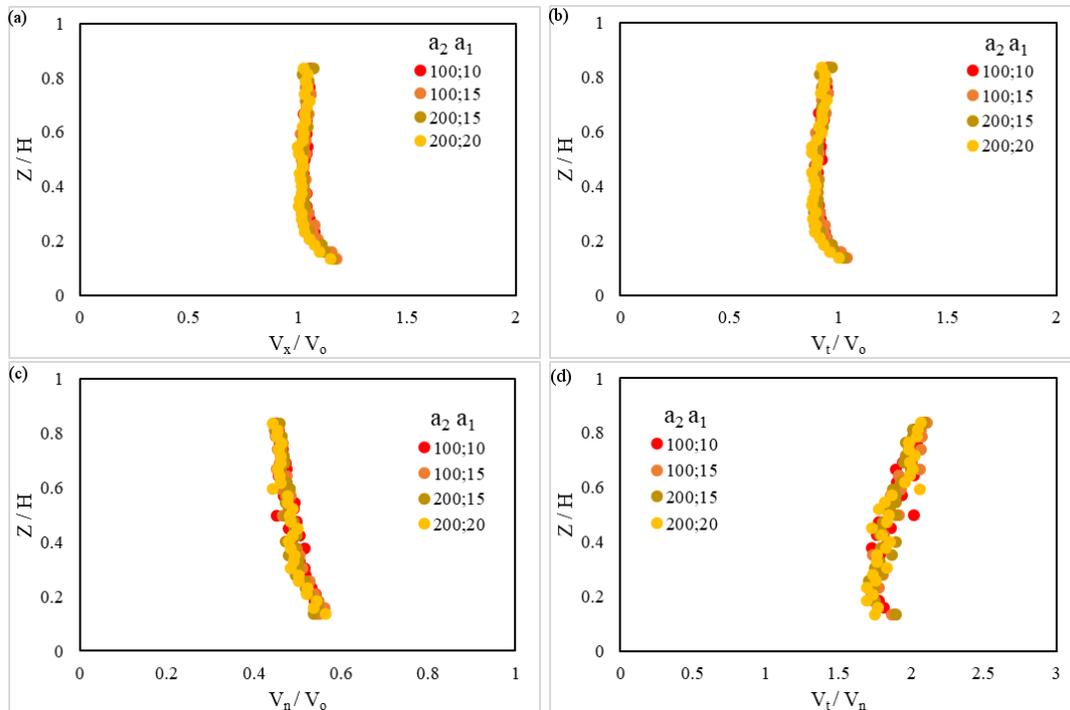


FIGURE 4.26 – Comparaison des vitesses normalisées sur V_o la vitesse débitante en amont, (a) de la composante axiale, (b) de la composante tangentielle, (c) de la composante normale et (d) du ratio des vitesses tangentielles et normales des plaques perforées à orifices verticaux en quinconce, pour des différentes largeurs a_1 et hauteurs a_2 , en fonction de Z/H .

La vitesse axiale est proche de $1 V_o$ et une faible augmentation de vitesse apparaît en bas et est vraisemblablement liée au support de la plaque qui introduit un petit blocage au pied de la plaque. La vitesse tangentielle est quasiment constante le long de la plaque avec une petite accélération au pied de la plaque. L'accélération locale est plus élevée pour les orifices verticaux parallèles. La vitesse normale diminue légèrement de 0.58 à $0.5 V_o$ avec la profondeur de l'eau pour les orifices verticaux en quinconce tandis qu'elle augmente

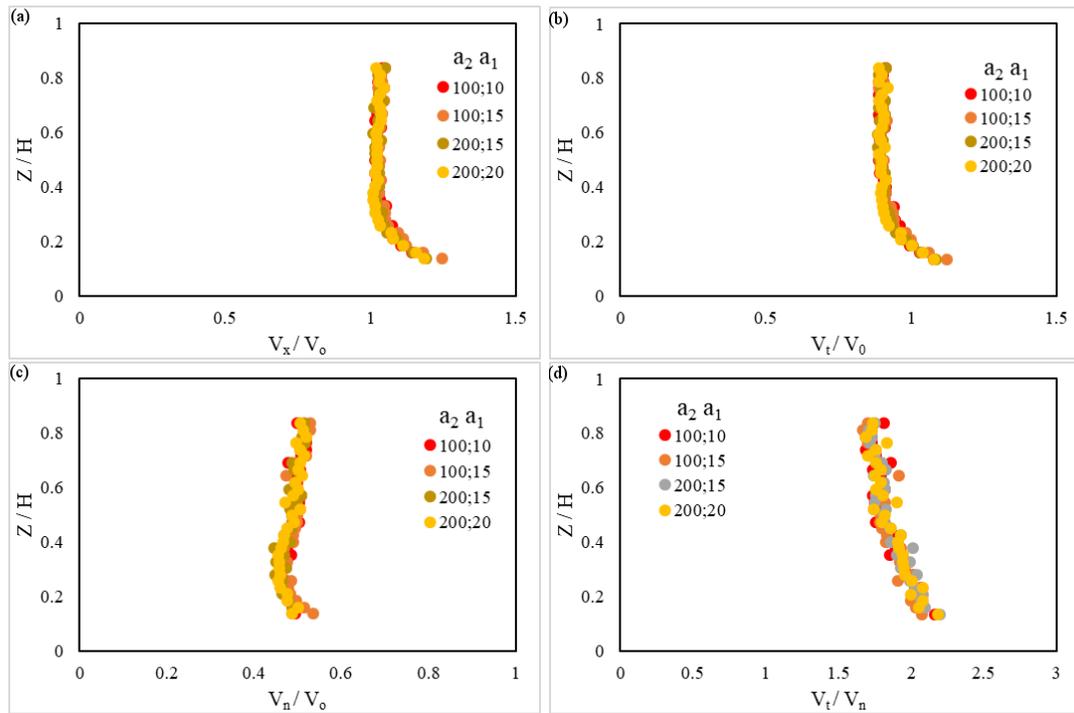


FIGURE 4.27 – Comparaison des vitesses normalisées sur V_o la vitesse débitante en amont, (a) de la composante axiale, (b) de la composante tangentielle, (c) de la composante normale et (d) du ratio des vitesses tangentielles et normales des plaques perforées à orifices verticaux parallèles, pour des différentes largeurs a_1 et hauteurs a_2 , en fonction de Z/H .

pour les orifices verticaux parallèles. Enfin, le rapport V_t / V_n varie de 1.8 à 2 en fonction de la hauteur pour les orifices en quinconce tandis que ce rapport diminue de 2 à 1.8 à la surface de l'eau pour les orifices parallèles.

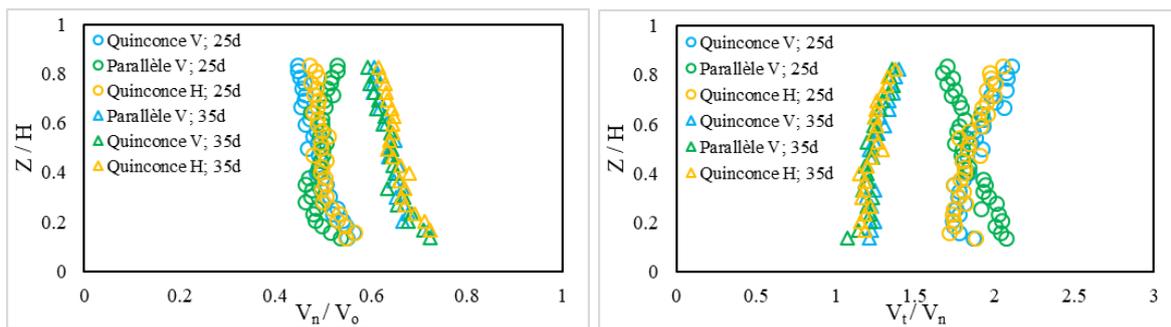


FIGURE 4.28 – Comparaison des vitesses normalisées sur V_o la vitesse débitante en amont, (a) de la composante normale et (b) du ratio des vitesses tangentielles et normales des plaques perforées à orifices en quinconce verticaux (V) et parallèles verticaux (V) et les orifices en quinconce horizontaux (H), pour $a_1 = 15$ mm et $a_2 = 100$ mm, en fonction de Z/H , pour deux angles d'inclinaison $\beta = 25^\circ$ et 35° .

Cette influence des orifices verticaux en quinconce ou parallèles est également visible

pour l'inclinaison de la plaque de 35° du fait de la constitution des lignes de courant de l'écoulement en lien avec les orifices (Figure 4.28). Les comportements des différentes composantes de la vitesse et du rapport V_t / V_n pour la plaque perforée à orifices horizontaux en quinconce sont similaires à ceux obtenus pour les orifices verticaux en quinconce (Figure 4.28).

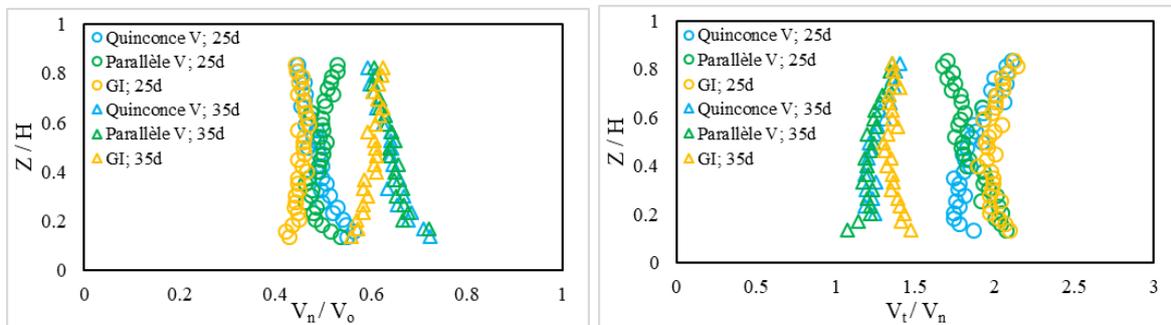


FIGURE 4.29 – Comparaison des vitesses normalisées sur V_o la vitesse débitante en amont, (a) de la composante normale et (b) du ratio des vitesses tangentielle et normale des plaques perforées à orifices en quinconce verticaux (V) et parallèles verticaux (V) et les grilles inclinées (GI) ($e/b=2$; PR), pour $a_1 = 15$ mm et $a_2 = 100$ mm, en fonction de Z/H , pour deux angles d'inclinaison $\beta = 25^\circ$ et 35° .

La Figure 4.29 représente la comparaison des profils de vitesse mesurés avec une grille inclinée avec le même blocage. Les résultats sont similaires pour la vitesse normale et le rapport V_t / V_n en ce qui concerne la plaque perforée avec des orifices en quinconce pour les deux angles d'inclinaison 25° et 35° . En conclusion, les vitesses en amont des plaques perforées sont invariantes à la disposition des orifices et à leurs dimensions et valident les critères ichtycompatibles souhaitées. Aussi, cette invariance permet de choisir les dimensions des orifices optimales en fonction des espèces cibles de poissons et de pouvoir en même temps une facilité de nettoyage pour le producteur de la centrale hydroélectrique.

Profils de vitesse en aval des plaques

En aval des plaques perforées, la vitesse axiale est analysée pour voir leur effet sur l'uniformité de l'écoulement en direction des turbine. Toutes les vitesses sont mesurées à 400 mm en aval de la grille. Les autres composantes de la vitesse (V_y et V_z) sont négligeables. La Figure 4.30 présente les profils de la vitesse axiale normalisée par V_2 la vitesse débitante en aval des plaques perforées à orifices verticaux en quinconce et parallèles, inclinées à 25° , pour différentes hauteurs a_2 (100 et 200 mm) et largeurs a_1 (10; 15 et 20 mm). Les profils se superposent et montrent l'invariance de la vitesse par rapport aux dimensions des orifices mais aussi à leur disposition sur la plaque.

La Figure 4.31 présente les profils de la vitesse axiale normalisée par V_2 la vitesse

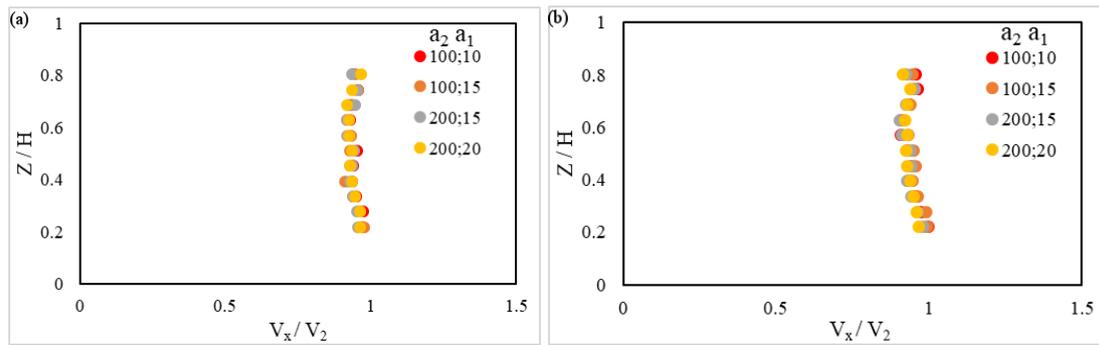


FIGURE 4.30 – Comparaison des vitesses normalisées sur V_2 la vitesse débitante en aval, de la composante axiale des plaques perforées à orifices en quinconce verticaux (a) et parallèles verticaux (b) pour différents a_1 et a_2 , en fonction de Z/H , pour un angle d'inclinaison $\beta = 25^\circ$.

débitante en aval des plaques perforées à orifices verticaux en quinconce et parallèles et à orifices horizontaux en quinconce, inclinées à 25° et 35° , pour une hauteur $a_2 = 100$ mm et une largeur $a_1 = 15$ mm. Les profils sont identiques et prouvent l'invariance par rapport à l'angle d'inclinaison. Il y a quelques légères différences à proximité de la surface libre où pour les orifices horizontaux en quinconce, pour l'angle 25° , le profil est décéléré à Z/H de 0.7 à 0.8.

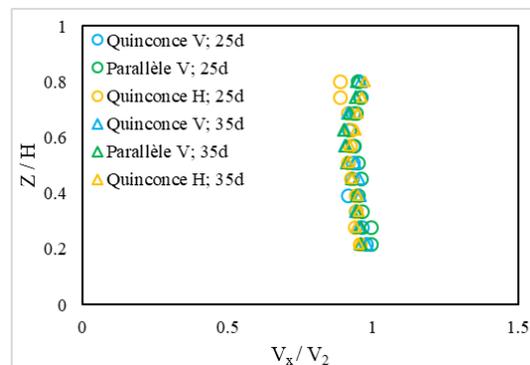


FIGURE 4.31 – Comparaison des vitesses normalisées sur V_2 la vitesse débitante en aval, de la composante axiale des plaques perforées à orifices en quinconce et parallèles verticaux et en quinconce horizontaux pour différents $a_1 = 15$ mm et $a_2 = 100$ mm, en fonction de Z/H , pour deux angle d'inclinaison $\beta = 25^\circ$ et 35° .

La Figure 4.32 présente les profils de la vitesse axiale normalisée des plaques perforées à orifices verticaux en quinconce et parallèles, pour une hauteur $a_2 = 100$ mm et une largeur $a_1 = 15$ mm et des grilles à barreaux rectangulaires de ratio $e/b = 2$, inclinées à 25° et 35° . Les profils sont surposés et enregistrent la même progression.

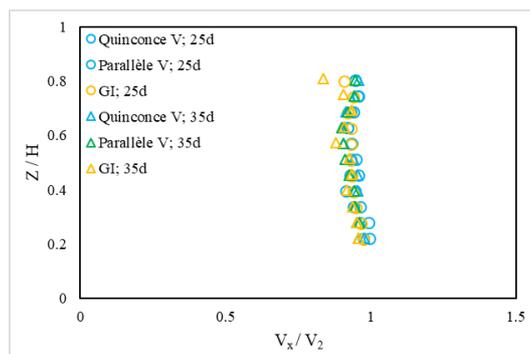


FIGURE 4.32 – Comparaison des vitesses normalisées sur V_2 la vitesse débitante en aval, de la composante axiale des plaques perforées à orifices en quinconce et parallèles verticaux et une grille inclinée pour différents $a_1 = 15$ mm et $a_2 = 100$ mm, en fonction de Z/H , pour deux angle d'inclinaison $\beta = 25^\circ$ et 35° .

Discussions

L'étude des plaques perforées montre que l'adoption de cette alternative aux grilles à faible espacement entre les barreaux réduit les pertes de charge de 20 à 50% en fonction de l'angle. En effet, la mesure et la modélisation des pertes d'énergie n'ont montré aucune influence de la disposition des orifices, ni de leurs dimensions ce qui amène à un choix spécifique en fonction des espèces cibles. De plus, l'avantage des plaques à orifices parallèles est tel que les barres de maintien peuvent être dissimulés en dehors des orifices ce qui minimise par conséquent les pertes de charge.

Par ailleurs, l'analyse de la courantologie en amont de ces plaques confirme leur validation des critères ichtyocompatibles et sont donc favorables au guidage des poissons vers les exutoires de contournement. Ces exutoires n'ont pas été étudiés lors de cette thèse mais seraient dimensionnés selon les critères adoptés pour les grilles inclinées, à savoir une largeur de 1m et une hauteur de 0.5m avec les préconisations présentes dans (Courret et Larinier, 2008) pour l'espacement et le nombre adéquats, détaillés dans le chapitre 1.

Contrairement à ce qui est observé pour les grilles munies de barreaux, la courantologie en aval des plaques perforées présente des profils quasiment homogènes en direction des turbines, ce qui n'altère pas le fonctionnement de celles-ci si elles sont placées juste en aval direct des plaques. Cette meilleure homogénéité de l'écoulement aval réduit donc les contraintes d'implantation des plaques qui peuvent potentiellement être positionnées à proximité immédiate de la chambre d'eau. D'autre part, ces plaques peuvent être placées de façon orientées et formeront également une solution alternative aux grilles orientées à barreaux horizontaux.

4.3 Bilan

Les grilles orientées à barreaux horizontaux semblent des alternatives performantes aux grilles orientées à barreaux perpendiculaires au plan de grille et sont aussi, voire plus efficaces que les grilles orientées à barreaux verticaux dans le sens de l'écoulement. Les résultats des plaques perforées montrent que celles-ci constituent une alternative possible aux grilles inclinées conventionnelles. L'invariance des résultats vis à vis de l'orientation et de la disposition des orifices choisis indique également que les plaques perforées pourraient être utilisées en remplacement de grilles orientées, ou, plus généralement, être adaptées à des ouvrages pour lesquelles une disposition de plaques plus complexe devrait être envisagé en termes d'inclinaison, d'orientation ou de combinaison de ces deux paramètres. En termes pratiques, il reste à déterminer quel type de rigidificateurs peuvent être adoptés sur ces plaques afin de limiter les pertes de charge additionnelles. Les plaque perforées pourraient alors être adaptées à des sections de forme quelconque et à de multiples configurations de canaux d'amenée sans modification majeure du génie civil.

Conclusion

Ce travail de thèse avait pour objectif d'optimiser les grilles ichtyocompatibles existantes et d'étudier d'autres configurations de grilles possibles en cherchant à assurer à la fois la dévalaison des poissons et l'efficacité de production des centrales hydroélectriques. Le premier dessein était de quantifier les pertes d'énergie dues aux grilles inclinées avec des supports et des formes différentes de barreau, tels qu'employées dans certaines centrales mais non modélisées jusqu'à maintenant. Ensuite, le suivi de ces grilles implantées dans les centrales a été effectué à travers des campagnes de mesure de la courantologie à la centrale de Las Rives. Cette dernière a été également modélisée numériquement dans le but de constituer un outil de prédiction. Enfin, dans le cadre des nouvelles solutions de barrières physiques, la grille orientée à barreaux horizontaux et la plaque perforée ont été étudiées.

Dans cette démarche d'analyse hydrodynamique de l'écoulement à travers les différents dispositifs, plusieurs outils (sondes à ultrason, ADV, ADCP, courantomètre électromagnétique et simulations RANS) ont été déployés. L'objectif était, à partir d'expériences de laboratoire, in situ et de simulations numériques, de répondre aux questionnements physiques et théoriques.

Les premières problématiques posées étaient les pertes de charge de différents profils de barreau et l'addition de structures derrière la grille. Cette étude a permis d'identifier des profils de barreaux qui conduisent à une réduction des pertes de charge. En particulier, le profil Têtard 8 divise par 3 la perte de charge induite par un barreau rectangulaire classique. Cependant, la question de la forme optimale de barreau reste ouverte, car la comparaison avec les formes étudiées par Meister et al. (2020a) indique des limites au delà desquelles le profilage du barreau tend à dégrader les performances de la grille.

De plus, les supports transversaux qui maintiennent la grille introduisent de fortes de pertes de charge. L'avantage apporté par les barreaux améliorés et l'inclinaison de la grille peut devenir négligeable si les pertes liées au support sont trop importantes. Dans ce sens, une proposition de support en forme profilée a été suggérée afin de réduire les pertes in-

duites par ces structures. La modélisation de ces supports a également été accomplie dans le but de permettre une prédiction plus rigoureuse des pertes de charge par les ingénieurs en tenant compte de tous les éléments constitutants de la grille. L'impact des supports et des entretoises sur les vitesses a été simulé numériquement avec une grille à l'échelle du laboratoire avec une approche VOF. Ceci a révélé la perturbation que ces éléments induisent sur les champs de vitesse en aval des grilles.

En parallèle, la caractérisation de l'écoulement autour des grilles déjà installées en centrales hydroélectriques a été réalisée ainsi que l'attractivité des exutoires au cours de campagnes de mesure en Ariège à la centrale hydroélectrique de Las Rives. Cette caractérisation a permis de confirmer le caractère ichtyocompatible de ces grilles et d'estimer l'efficacité hydraulique des exutoires. Ces campagnes hydrauliques ont été complétées dans le cadre des projets Fithydro et Efigri, par des validations biologiques, qui ont montré une efficacité remarquable.

L'outil numérique a été employé afin de modéliser cette prise d'eau et a été validé après comparaison avec les mesures in situ. Des développements ultérieurs de ce modèle en diphasique, étant donné que les simulations ont été effectuées en monophasique, sont une des perspectives de cette thèse pour tenir compte de l'ensemble de la prise d'eau. Des études complémentaires, numériques comme expérimentales, sont aujourd'hui possibles pour caractériser davantage la trajectoire exacte des poissons dans ces dispositifs vis à vis de l'écoulement et mieux évaluer l'influence des masques sur la partie supérieure.

L'analyse de nouvelles solutions de barrières physiques a été proposée. Les grilles orientées à barreaux horizontaux se sont avérées meilleures que les grilles orientées à barreaux perpendiculaires au plan de grille et sont plus performantes que les grilles orientées à barreaux verticaux dans le sens de l'écoulement. Les critères biologiques ont été vérifiés en amont de celles-ci ainsi que l'homogénéité des profils en direction des turbines pour une gamme d'angle bien déterminée. L'application de la formule de Raynal et al. (2013a) définie au départ pour les grilles inclinées, a été validée également pour les grilles orientées à barreaux horizontaux. Les plaques perforées aménagées dans une prise d'eau, sont équivalentes aux grilles inclinées en terme de guidage des poissons et sont d'autant plus avantageuse en terme d'énergie pour le producteur dans le cas où on cherche à réduire l'espacement.

Conjointement aux études antérieures sur les grilles inclinées (Raynal et al., 2013a), sur des grilles orientées à barreaux perpendiculaires au plan de la grille (Raynal et al., 2013b) et sur des grilles orientées à barreaux dans le sens de l'écoulement (Raynal et al., 2014), ce travail de thèse devrait aider les ingénieurs à choisir la solution pour concevoir une prise d'eau ichtyocompatible, en tenant compte d'autres aspects tels que les contraintes de génie civil, le dégrillage, l'évacuation des débris et le coût total. Les dernière solutions

CONCLUSION

telles que les plaques perforées restent cependant à être validées biologiquement lors des essais hydrodynamiques et surtout biologiques sur des centrales.

Références

- Adam, B., U. Schwevers et U. Dumont (1999). « Behavioral Survey of Eels (*Anguilla anguilla*) Migrating Downstream under Laboratory Conditions ». In : *Verlgag Natur & Wissenschaft* 16.1, p. 1-63.
- Albayrak, I., C. R. Kriewitz, W. H. Hager et R. M. Boes (2017). « An Experimental Investigation on Louvres and Angled Bar Racks ». In : *Journal of Hydraulic Research* 56.1, p. 59-75. DOI : 10.1080/00221686.2017.1289265.
- Albayrak, I., F. Maager et R. M. Boes (2019). « An Experimental Investigation on Fish Guidance Structures with Horizontal Bars ». In : *Journal of Hydraulic Research* 58.3, p. 516-530. DOI : 10.1080/00221686.2019.1625818.
- Amaral, S. V., F. C. Winchell, B. J. McMahon et D. Dixon (2003). « Evaluation of Angled Bar Racks and Louvers for Guiding Silver Phase American Eels ». In : *Proceedings of biology, management and protection of Catadromous Eels*. Bethesda/MD, American Fisheries Society, Symposium, 33, p. 367-376.
- Bates, D. W. et R. Vinsonhaler (1957). « Use of Louvers for Guiding Fish ». In : *Transactions of the American Fisheries Society* 86.1, p. 38-57.
- Beaulieu, C., G. Pineau, A. Ballu, L. David et D. Calluauud (2015). « Démarche D'estimation Des Incertitudes De Mesure Dans Un Laboratoire De Recherche : Apport Et Perspectives Exemple D'un Laboratoire De Recherche En Hydrologie Des Milieux Aquatiques ». In : *17th International Congress of Metrology*. EDP Sciences, p. 1-7. DOI : <https://doi.org/10.1051/metrology/20150005003>.
- Beck, C. (2020). « Fish Protection and Fish Guidance Using Innovative Curved-bar Rack Bypass Systems ». Thèse de doct. ETH Zurich.
- Beck, C., I. Albayrak, J. Meister et R. M. Boes (2019a). « Hydraulic Performance of Fish Guidance Structures with Curved Bars – Part 1 : Head Loss Assessment ». In : *Journal of Hydraulic Research* 58.5, p. 807-818. DOI : 10.1080/00221686.2019.1671515.

-
- (2019b). « Hydraulic Performance of Fish Guidance Structures with Curved Bars – Part 2 : Flow Fields ». In : *Journal of Hydraulic Research* 58.5, p. 819-830. DOI : 10.1080/00221686.2019.1671516.
- Berezinski, I. (1958). *Hydraulisches Handbuch*. Moscow : Hrsg. Mostkov. M.A., Moscou.
- Berger, C. (2018). « Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten) Schrägrechen anhand ethohydraulischer Studien (Screen Losses and Design of Inclined (and Electrified) Screens with Horizontal Bars on the Basis of Ethohydraulic Studies) ». Thèse de doct. Darmstadt : University of Darmstadt.
- Béguier-pon M., M. Casonguay S. Shan J. Benchetrit et J. Dodson (2015). « Direct Observations of American Eels Migrating across the Continental Shelf to the Sargasso ». In : *Nature Communications* 6.8705, p. 1-9.
- Bie, J. de, G. Peirson et P. S. Kemp (2018). « Effectiveness of Horizontally and Vertically Oriented Wedge-wire Screens to Guide Downstream Moving Juvenile Chub (*Squalius Cephalus*) ». In : *Ecological Engineering* 123, p. 127-134. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2018.07.038.
- Boubée, J. A. T. et E. K. Williams (2006). « Downstream Passage of Silver Eels at a Small Hydroelectric Facility ». In : *Fisheries Management and Ecology* 13.3, p. 165-176.
- Böttcher, H., R. Gabl et M. Aufleger (2019). « Experimental Hydraulic Investigation of Angled Fish Protection Systems : Comparison of Circular Bars and Cables ». In : *Water* 11.5, p. 1056. DOI : 10.3390/w11051056.
- Cada, G. F. et M. J. Sale (1993). « Status of Fish Passage Facilities at Non Federal Hydro-power Projects ». In : *Fisheries* 18.7, p. 4-12.
- Calles, O., S. Karlsson, M. Hebrand et C. Comoglio (2012). « Evaluating Technical Improvements for Downstream Migrating Diadromous Fish at a Hydroelectric Plant ». In : *Ecological Engineering* 48, p. 30-37.
- Calles, O., S. Karlsson, P. Vezza, C. Comoglio et J. Tielman (2013). « Success of a Low-sloping Rack for Improving Downstream Passage of Silver Eels at a Hydroelectric Plant ». In : *Freshwater Biology* 58.10, p. 2168-2179. DOI : 10.1111/fwb.12199.
- Chatellier, L., R.-W. Wang, L. David, D. Courret et M. Larinier (2011). « Experimental Characterization of the Flow across Fish-friendly Trashrack ». In : *IAHR*.
- Cooke, S. J., G. T. Crossin et S. G. Hinch (2011). « Fish Migrations | Pacific Salmon Migration : Completing the Cycle ». In : *Encyclopedia of Fish Physiology*, p. 1945-1952. DOI : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374553-8.00260-4>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123745538002604>.
- Courret, D. et M. Larinier (2008). *Guide Pour La Conception De Prises D'eau « Ichtyocompatibles » Pour Les Petites Centrales*. Rapp. tech. Toulouse, France : ADEME, p. 78.

- Dewitte, M. et L. David (2018). *A List of Solutions, Models, Tools and Devices, Their Application Range on a Regional and Overall Level, the Identified Knowledge Gaps and the Recommendations to Fill These*. Rapp. tech. France : Fishfriendly Innovative Technologies for Hydropower, p. 539.
- Ebel, G. (2013). *Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. (Fish Protection and Downstream Fish Migration at Hydropower Plants – Hand Book for Fish Guidance and Bypass System)*. Germany : Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie.
- (2016). *Fischschutz Und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen. Handbuch Rechen- Und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung Und Prognose, Bemessung Und Gestaltung (Fish Protection and Downstream Passage at Hydro Power Stations. Handbook of Bar Rack and Bypass Systems. Bioengineering Principles, Modelling and Prediction, Dimensioning and Design)*. 4. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie.
- Egg, L., M. Mueller, J. Pander, J. Knott et J. Geist (2017). « Improving European Silver Eel (*Anguilla anguilla*) Downstream Migration by Undershot Sluice Gate Management at a Small-scale Hydropower Plant ». In : *Ecological Engineering* 106, p. 349-357.
- EPRI, Electric Power Research Institute (1987). *Hydraulic Model Evaluation of the Eicher Passive Pressure Screen Fish Bypass System*. Rapp. tech. Portland, Oregon : EPRI Prepared by Eicher associates, Inc.
- (1998). *Review of Downstream Fish Passage and Protection Technology Evaluations and Effectiveness*. Rapp. tech. 111517. Palo Alto, CA : EPRI.
- (2001). *Review and Documentation of Research and Technologies on Passage and Protection of Downstream Migrating Catadromous Eels at Hydroelectric Facilities*. Rapp. tech. EPRI.
- EPRI, Electric Power Research Institute et Dominion Millstone Laboratories DML (2001). *Evaluation of Angled Bar Racks and Louvers for Guiding Fish at Water Intakes*. Rapp. tech. 1005193. Palo Alto, CA : EPRI.
- Escande, L. (1947). *Pertes de charge à la traversée de la grille*. France.
- Feigenwinter, L., D. F. Vetsch, S. Kammerer, C. R. Kriewitz et R. M. Boes (2019). « Conceptual Approach for Positioning of Fish Guidance Structures Using CFD and Expert Knowledge ». In : *Sustainability* 11, p. 1-21.
- Fellenius, W. et E. Lindquist (1929). *Verluste an Rechen (Head Loss through Racks)*. Hydr. Lab. Practice, ASME, New York, USA.
- Ghamry, H. et C. Katopodis (2009). « A Numerical Investigation to Select a Turbulence-closure Model for Simulating Turbulent Flows near Trashracks (bar Racks) ». In : *33rd IAHR Congress : Water Engineering for a Sustainable Environment*, p. 4045-4054.

-
- Godde, D. (1994). *Experimentelle Untersuchung zur Anströmung von Rohrturbinen : Ein Beitrag zur Optimierung des Turbineneinlaufs (Experimental investigation of bulb turbine admission flow : Contribution to the intake optimization)*. Rapp. tech. Munich, Germany : Obernach Research Institute, Chair of Hydraulic et Water Resources Engineering TU Munich.
- Goring, D. et V. Nikora (2002). « Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data ». In : *Journal of Hydraulic Engineering* 128.1, p. 117-126.
- Greenshield, C. J. (2018). *User Guide*. OpenFOAM Foundation Ltd.
- Gross, M R., R M. Coleman et R M. Mcdowall (1988). « Aquatic Productivity and the Evolution of Diadromous Fish Migration ». In : *Science* 239, p. 1291-1293.
- Harden Jones, F.R. (1968). *Fish Migration*. London : Edward Arnold (Publishers) Ltd., p. 325.
- Hasler, A.D. (1966). *Underwater Guideposts : Homing of Salmon*. The University of Wisconsin Press, Madison, Milwaukee, et London, p. 155.
- Havn, T. B., E. B. Thorstad, J. Borcharding, L. Heermann, M. A. K. Teichert, D. Ingendahl, M. Tambets, S. A. Saether et F. Okland (2020). « Impacts of a Weir and Power Station on Downstream Migrating Atlantic Salmon Smolts in a German River ». In : *River Research and Applications*. DOI : 10.1002/rra.3590.
- Idel'cik, I. E. (1979). *Mémento des pertes de charge - Coefficients de pertes de charge singulières et pertes de charge par frottement*. Collection de la direction des études et recherches d'Electricité De France, Paris.
- Kirschmer, O. (1926). « Untersuchungen Über Den Gefällsverlust an Rechen (Investigation of Head Losses at Racks) ». Thèse de doct. Munich, Germany.
- Kriewitz, C. R. (2015). « Leitrechen an Fischabstiegsanlagen : Hydraulik Und Fischbiologische Effizienz (Screen Guidance Systems of Downstream Fish Migration : Hydraulics and Fish Biological Efficiency) ». Thèse de doct. ETH Zurich.
- Le Coz, J., B. Camenen, G. Dramais, J. Ribot-Bruno, M. Ferry et et Rosique JL (2011). *Contrôle des débits réglementaires Application de l'article L 214-18 du Code de l'environnement*. Rapp. tech. ONEMA, p. 475.
- Le Coz, J., F. Larrarte, G. Saysset, G. Pierrefeu, J. F. Brochot et P. Marchand (2009). « Mesures Hydrologiques Par Profileur à Effet Doppler (ADCP) En France : Application Aux Cours D'eau Et Aux Réseaux Urbains ». In : *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau* 17.5, p. 115-122.
- Lucas, M.C. et E. Baras (2001). *Migration of Freshwater Fishes*. Great Britain : Blackwell Science, p. 420.
- Manceau, R. (2018). *Codes De Calcul Industriels Pour La Simulation Des Écoulements Turbulents*. Pau.
-

- McCleave, J.D., Arnold G. P., Dodson J. J. et W. H. Neill (1984). *Mechanisms of Migration in Fishes*. Plenum Press, New York et London : NATO conference series. IV Marine Series, Vol. 14., p. 574.
- McDowal, I R.M. (1988). *Diadromy in Fishes*. Portland, Oregon : Timber Press, p. 308.
- McKeown, B.A. (1984). *Fish Migration*. London : Croom-Helm, p. 224.
- Meister, J., H. Fuchs, C. Beck, I. Albayrak et R. M. Boes (2020a). « Head Losses of Horizontal Bar Racks As Fish Guidance Structures 1 ». In : *Water* 12.2, p. 475. DOI : 10.3390/w12020475.
- (2020b). « Velocity Fields at Horizontal Bar Racks As Fish Guidance Structures 2 ». In : *Water* 12.1, p. 280. DOI : 10.3390/w12010280.
- Metrology JCGM, Joint Committee for Guides in (2008). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Sous la dir. de Switzerland Geneva.
- Meusburger, H. (2002). « Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken (Perte De Charge Au Niveau Des Grilles De Prise D'eau Des Centrales Hydroélectriques) ». Thèse de doct. ETH Zurich, p. 272.
- Morais, P. et F. Daverat (2016). *An Introduction to Fish Migration*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Mosonyi, E. (1966). *Wasserkraftwerke. Band 1, Niederdruckanlagen (Hydropower Plants, Volume 1, Low Pressure Systems)*. Düsseldorf : VDI Verlag.
- Nakamura, H. (1969). *Tuna : Distribution and Migration*. London : Fishing News Ltd., p. 76.
- Odeh, M. (1999). *A Summary of Environmentally Friendly Turbine Design Concepts*. Rapp. tech. 1218115. EERE Publication et Product Library : S. O. Conte Anadromous Fish Research Center.
- Raynal, S. (2013). « Etude Expérimentale Et Numérique Des Grilles Ichtyocompatibles ». Thèse de doct. Université de Poitiers.
- Raynal, S., L. Chatellier, D. Courret, M. Larinier et L. David (2014). « Streamwise Bars in Fish-friendly Angled Trashracks ». In : *Journal of Hydraulic Research* 52.3, p. 426-431. ISSN : 0022-1686.
- Raynal, S., D. Courret, L. Chatellier, M. Larinier et L. David (2013a). « An Experimental Study on fish-friendly Trashracks - Part 1. Inclined Trashracks ». In : *Journal of Hydraulic Research* 51.1, 56–66.
- (2013b). « An Experimental Study on fish-friendly Trashracks – Part 2 : Angled Trashracks ». In : *Journal of Hydraulic Research* 51.1, 67–75.
- Roule, L. (1933). *Fishes Their Journeys and Migrations*. London : George Routledge & Sons Ltd., p. 270.

-
- Schuler, V. J. et L. L. Larson (1975). « Improved Fish Protection at Intake Systems ». In : *Journal of Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers* 101.336, 897–910.
- Schwevers, U. et B. Adam (2020). *Fish Protection and Technologies and Fish Ways and for Downstream and Migration*. Springer Nature Switzerland AG.
- Scruton, C. et C.W. Newberry (1963). « On the Estimation of Wind Loads for Building and Structural Design ». In : *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 25.2, p. 97-126.
- Spangler, J. (1928). *Untersuchungen über den Verlust an Rechen bei schräger Zuströmung (Investigations into the head loss of racks with an inclined approach flow)*. Oldenbourg : Mitteilungen des Hydraulik Instituts der TH Munchen.
- Szabo-Meszaros, M., C. U. Navaratnam, J. Aberle, A. T. Silva, T. Forseth, O. Calles, H.-P. Fjeldstad et K. Alfredsen (2018). « Experimental Hydraulics on Fish-friendly Trash-racks : An Ecological Approach ». In : *Ecological Engineering* 113, p. 11-20. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2017.12.032.
- Szabo-Meszaros, M., T. Forseth, H. Baktoft, H. Fjeldstad, A. T. Silva, K. Ø. Gjelland, F. Økland, I. Uglem et K. Alfredsen (2019). « Modelling Mitigation Measures for Smolt Migration at Dammed River Sections ». In : *Ecohydrology* e2131, p. 1-13.
- Taft, E. P., P. Hofmann, P. J. Eisle et T. Horst (1976). « An Experimental Approach to the Design of Systems for Alleviating Fish Impingement at Existing and Proposed Power Plant Intake Structures ». In : *Third National Workshop on Entrainment and Impingement*, p. 343-365.
- Tetard, S., R. Roy, S. Tomanova, D. Courret, O. Mercier, S. Richard, V. Mataix, T. Lagarrigue, A. Frey et E. De-Oliveira (sept. 2019). « Effectiveness of Fine-spaced Low-sloping Racks to Protect Atlantic Salmon Smolts at Four Hydro Powerplants in South-western France ». In : *American Fisheries Society & The Wildlife Society 2019 Joint Annual Conference*.
- Tomanova, S., D. Courret et A. Alric (2017). « Protecting Fish from Entering Turbines : The Efficiency of a Low-sloping Rack for Downstream Migration of Atlantic Salmon Smolts ». In : *La Houille Blanche* 1, p. 11-13. DOI : 10.1051/lhb/2017002.
- Tomanova, S., D. Courret, A. Alric, E. De Oliveira, T. Lagarrigue et S. Tétard (2018). « Protecting Efficiently Sea-migrating Salmon Smolts from Entering Hydropower Plant Turbines with Inclined or Oriented Low Bar Spacing Racks ». In : *Ecological Engineering* 122, p. 143-152. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2018.07.034.
- Tomanova, S., D. Courret, O. Mercier, S. Richard, E. De-Oliveira, V. Mataix, T. Lagarrigue, A. Frey et S. Tetard (2019). « Efficiency of Downstream Passage Devices to Protect Migrating Silver Eels Assessed with Radiotelemetry ». In : *5th International Conference on Fish Telemetry*. Arendal, Norway.
-

- Travade, F. et M. Larinier (1992). « La Migration De Dévalaison : Problèmes Et Dispositifs ». In : *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture* 326-327, p. 165 -176.
- Videler, J. J. (1993). *Fish swimming*. Chapman & Hall.
- Zimmermann, J. (1969). *Widerstand schräg angeströmter Rechengitter (Resistance of Angled Racks)*. Versuchsanstalt für Wasserbau und Kulturtechnik, Theodor - Rehbock - Flussbaulaboratorium, Universität Fridericiana Karlsruhe.

Annexes

TABLEAU A – Matrice d’essais des mesures expérimentales des grilles inclinées avec les différentes formes de barreau. (PDC: Pertes de charge)

Profil du barreau	Épaisseur du barreau (mm)	Espacement (mm)	Angle d’inclinaison (°)	Mesure
Plétina	12	20	15	PDC
Plétina	12	20	25	PDC
Plétina	12	20	35	PDC
Plétina	12	20	45	PDC
Plétina	12	20	60	PDC
Plétina	12	20	90	PDC
Plétina	12	30	15	PDC
Plétina	12	30	25	PDC
Plétina	12	30	35	PDC
Plétina	12	30	45	PDC
Plétina	12	30	60	PDC
Plétina	12	30	90	PDC
Tétard 8	8	20	15	PDC
Tétard 8	8	20	25	PDC
Tétard 8	8	20	35	PDC
Tétard 8	8	20	45	PDC
Tétard 8	8	20	60	PDC
Tétard 8	8	20	90	PDC
Tétard 8	8	30	15	PDC
Tétard 8	8	30	25	PDC
Tétard 8	8	30	35	PDC
Tétard 8	8	30	45	PDC
Tétard 8	8	30	60	PDC
Tétard 8	8	30	90	PDC
Tétard 10	10	20	15	PDC
Tétard 10	10	20	25	PDC
Tétard 10	10	20	35	PDC
Tétard 10	10	20	45	PDC
Tétard 10	10	20	60	PDC
Tétard 10	10	20	90	PDC
Tétard 10	10	30	15	PDC

Tétard 10	10	30	25	PDC
Tétard 10	10	30	35	PDC
Tétard 10	10	30	45	PDC
Tétard 10	10	30	60	PDC
Tétard 10	10	30	90	PDC
Goutte d'eau	10	20	15	PDC
Goutte d'eau	10	20	25	PDC
Goutte d'eau	10	20	35	PDC
Goutte d'eau	10	20	45	PDC
Goutte d'eau	10	20	60	PDC
Goutte d'eau	10	20	90	PDC
Goutte d'eau	10	30	15	PDC
Goutte d'eau	10	30	25	PDC
Goutte d'eau	10	30	35	PDC
Goutte d'eau	10	30	45	PDC
Goutte d'eau	10	30	60	PDC
Goutte d'eau	10	30	90	PDC
Hydrodynamique	5	10	15	PDC
Hydrodynamique	5	10	25	PDC
Hydrodynamique	5	10	35	PDC
Hydrodynamique	5	10	45	PDC
Hydrodynamique	5	10	60	PDC
Hydrodynamique	5	10	90	PDC
Hydrodynamique	5	15	15	PDC
Hydrodynamique	5	15	25	PDC
Hydrodynamique	5	15	35	PDC
Hydrodynamique	5	15	45	PDC
Hydrodynamique	5	15	60	PDC
Hydrodynamique	5	15	90	PDC
Rectangulaire	5	10	15	PDC
Rectangulaire	5	10	25	PDC
Rectangulaire	5	10	35	PDC
Rectangulaire	5	10	45	PDC
Rectangulaire	5	10	60	PDC
Rectangulaire	5	10	90	PDC

Rectangulaire	5	15	15	PDC
Rectangulaire	5	15	25	PDC
Rectangulaire	5	15	35	PDC
Rectangulaire	5	15	45	PDC
Rectangulaire	5	15	60	PDC
Rectangulaire	5	15	90	PDC

TABLEAU B – Matrice d’essais des mesures expérimentales des grilles inclinées avec les supports. (PDC: Pertes de charge)

Type de support	Profil du barreau	Espacement (mm)	Angle d’inclinaison (°)	Mesure
U	hydrodynamique	10	15	PDC
U	hydrodynamique	10	25	PDC
U	hydrodynamique	10	35	PDC
U	hydrodynamique	10	45	PDC
U	hydrodynamique	10	60	PDC
U	hydrodynamique	10	90	PDC
U	rectangulaire	10	15	PDC
U	rectangulaire	10	25	PDC
U	rectangulaire	10	35	PDC
U	rectangulaire	10	45	PDC
U	rectangulaire	10	60	PDC
U	rectangulaire	10	90	PDC
U	hydrodynamique	15	15	PDC
U	hydrodynamique	15	25	PDC
U	hydrodynamique	15	35	PDC
U	hydrodynamique	15	45	PDC
U	hydrodynamique	15	60	PDC
U	hydrodynamique	15	90	PDC
U	rectangulaire	15	15	PDC
U	rectangulaire	15	25	PDC
U	rectangulaire	15	35	PDC
U	rectangulaire	15	45	PDC
U	rectangulaire	15	60	PDC
U	rectangulaire	15	90	PDC
Profilé	hydrodynamique	10	15	PDC
Profilé	hydrodynamique	10	25	PDC
Profilé	hydrodynamique	10	35	PDC
Profilé	hydrodynamique	10	45	PDC
Profilé	hydrodynamique	10	60	PDC
Profilé	hydrodynamique	10	90	PDC
Profilé	rectangulaire	10	15	PDC

Profilé	rectangulaire	10	25	PDC
Profilé	rectangulaire	10	35	PDC
Profilé	rectangulaire	10	45	PDC
Profilé	rectangulaire	10	60	PDC
Profilé	rectangulaire	10	90	PDC
Profilé	hydrodynamique	15	15	PDC
Profilé	hydrodynamique	15	25	PDC
Profilé	hydrodynamique	15	35	PDC
Profilé	hydrodynamique	15	45	PDC
Profilé	hydrodynamique	15	60	PDC
Profilé	hydrodynamique	15	90	PDC
Profilé	rectangulaire	15	15	PDC
Profilé	rectangulaire	15	25	PDC
Profilé	rectangulaire	15	35	PDC
Profilé	rectangulaire	15	45	PDC
Profilé	rectangulaire	15	60	PDC
Profilé	rectangulaire	15	90	PDC

TABLEAU C – Matrice d’essais des mesures expérimentales des grilles orientées à barreaux horizontaux. (PDC: Pertes de charge; Profil de vitesse amont et aval: VAA)

Épaisseur du barreau (mm)	Espacement (mm)	Vitesse (ms^{-1})	Angle d’orientation ($^{\circ}$)	Profil du barreau	Mesures
5	5	0.72	30	rectangulaire	PDC/ VAA
5	7.5	0.72	30	rectangulaire	PDC/ VAA
5	10	0.72	30	rectangulaire	PDC/ VAA
5	15	0.72	30	rectangulaire	PDC/ VAA
5	20	0.72	30	rectangulaire	PDC/ VAA
10	10	0.72	30	rectangulaire	PDC/ VAA
5	5	0.53	30	rectangulaire	PDC
5	5	0.68	30	rectangulaire	PDC
5	20	0.66	30	rectangulaire	PDC
5	20	0.77	30	rectangulaire	PDC
5	5	0.72	30	hydrodynamique	PDC/ VAA
5	7.5	0.72	30	hydrodynamique	PDC/ VAA
5	10	0.72	30	hydrodynamique	PDC/ VAA
5	15	0.72	30	hydrodynamique	PDC/ VAA
5	20	0.72	30	hydrodynamique	PDC/ VAA
5	20	0.53	30	hydrodynamique	PDC
5	20	0.6	30	hydrodynamique	PDC
5	20	0.66	30	hydrodynamique	PDC
5	20	0.77	30	hydrodynamique	PDC
5	10	0.66	30	hydrodynamique	PDC
5	10	0.77	30	hydrodynamique	PDC
5	10	0.68	30	hydrodynamique	PDC
5	5	0.72	45	rectangulaire	PDC/ VAA
5	10	0.72	45	rectangulaire	PDC/ VAA
5	20	0.72	45	rectangulaire	PDC/ VAA
5	5	0.72	45	hydrodynamique	PDC/ VAA
5	10	0.72	45	hydrodynamique	PDC/ VAA
5	20	0.72	45	hydrodynamique	PDC/ VAA
5	5	0.72	60	rectangulaire	PDC/ VAA
5	10	0.72	60	rectangulaire	PDC/ VAA
5	20	0.72	60	rectangulaire	PDC/ VAA

5	5	0.72	60	hydrodynamique PDC/ VAA
5	10	0.72	60	hydrodynamique PDC/ VAA
5	20	0.72	60	hydrodynamique PDC/ VAA
5	5	0.72	90	rectangulaire PDC/ VAA
5	10	0.72	90	rectangulaire PDC/ VAA
5	20	0.72	90	rectangulaire PDC/ VAA
5	5	0.63	90	rectangulaire PDC
5	20	0.66	90	rectangulaire PDC
5	20	0.68	90	rectangulaire PDC
5	20	0.77	90	rectangulaire PDC
5	5	0.72	90	hydrodynamique PDC/ VAA
5	10	0.72	90	hydrodynamique PDC/ VAA
5	20	0.72	90	hydrodynamique PDC/ VAA
5	20	0.66	90	hydrodynamique PDC
5	20	0.68	90	hydrodynamique PDC
5	20	0.77	90	hydrodynamique PDC

TABLEAU D – Matrice d’essais des mesures expérimentales des plaques perforées. (PDC: Pertes de charge; Profil de vitesse amont et aval: VAA)

Largeur (mm)	a_1 (mm)	Hauteur (mm)	a_2	Disposition des trous	Angle d’inclinaison (°)	Mesures
15		100		Quinconce V	15	PDC
15		100		Quinconce V	25	PDC/ VAA
15		100		Quinconce V	35	PDC/ VAA
15		100		Quinconce V	45	PDC
15		100		Quinconce V	60	PDC
15		100		Quinconce V	90	PDC
15		200		Quinconce V	15	PDC
15		200		Quinconce V	25	PDC/ VAA
15		200		Quinconce V	35	PDC/ VAA
15		200		Quinconce V	45	PDC
15		200		Quinconce V	60	PDC
15		200		Quinconce V	90	PDC
15		100		Parallèle V	15	PDC
15		100		Parallèle V	25	PDC/ VAA
15		100		Parallèle V	35	PDC/ VAA
15		100		Parallèle V	45	PDC
15		100		Parallèle V	60	PDC
15		100		Parallèle V	90	PDC
10		100		Quinconce V	15	PDC
10		100		Quinconce V	25	PDC/ VAA
10		100		Quinconce V	35	PDC/ VAA
10		100		Quinconce V	45	PDC
10		100		Quinconce V	60	PDC
10		100		Quinconce V	90	PDC
20		200		Quinconce V	15	PDC
20		200		Quinconce V	25	PDC/ VAA
20		200		Quinconce V	35	PDC/ VAA
20		200		Quinconce V	45	PDC
20		200		Quinconce V	60	PDC
20		200		Quinconce V	90	PDC
20		200		Parallèle V	15	PDC

20	200	Parallèle V	25	PDC/ VAA
20	200	Parallèle V	35	PDC/ VAA
20	200	Parallèle V	45	PDC
20	200	Parallèle V	60	PDC
20	200	Parallèle V	90	PDC
10	100	Parallèle V	15	PDC
10	100	Parallèle V	25	PDC/ VAA
10	100	Parallèle V	35	PDC/ VAA
10	100	Parallèle V	45	PDC
10	100	Parallèle V	60	PDC
10	100	Parallèle V	90	PDC
15	200	Parallèle V	15	PDC
15	200	Parallèle V	25	PDC/ VAA
15	200	Parallèle V	35	PDC/ VAA
15	200	Parallèle V	45	PDC
15	200	Parallèle V	60	PDC
15	200	Parallèle V	90	PDC
100	15	Quinconce H	15	PDC
100	15	Quinconce H	25	PDC/ VAA
100	15	Quinconce H	35	PDC/ VAA
100	15	Quinconce H	45	PDC
100	15	Quinconce H	60	PDC
100	15	Quinconce H	90	PDC
