



HAL
open science

Étude numérique et expérimentale de l'écoulement turbulent au sein des passes à poissons à fentes verticales. Analyse de l'écoulement tridimensionnel et instationnaire

Aurélien Ballu

► **To cite this version:**

Aurélien Ballu. Étude numérique et expérimentale de l'écoulement turbulent au sein des passes à poissons à fentes verticales. Analyse de l'écoulement tridimensionnel et instationnaire. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de Poitiers, 2017. Français. NNT : 2017POIT2256 . tel-01858324

HAL Id: tel-01858324

<https://theses.hal.science/tel-01858324>

Submitted on 20 Aug 2018

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.

THESE

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 : SI-MMEA (Sciences et Ingénierie en Matériaux,
Mécanique, Energétique et Aéronautique)

Secteur de Recherche : Mécanique des Fluides

Présentée par :

Aurélien Ballu

ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DE L'ECOULEMENT TURBULENT AU
SEIN DES PASSES À POISSONS À FENTES VERTICALES.
ANALYSE DE L'ECOULEMENT TRIDIMENSIONNEL ET INSTATIONNAIRE.

Directeurs de Thèse :

Gérard Pineau

Damien Calluau

Soutenue le 20 mars 2017

devant la Commission d'Examen

JURY

R. MOSÉ	Professeur, Université de Strasbourg, ICube	(Rapporteur)
A. PINHEIRO	Professeur, Université de Lisbonne, IST	(Rapporteur)
C. BOURBON	Responsable Qualité Sécurité Eau Environnement, VNF	(Examinatrice)
P. SAGNES	Directeur Pôle Ecohydraulique, ONEMA	(Examinateur)
P. ROUMIEU	Directeur Pôle Hydraulique, CNR	(Examinateur)
G. PINEAU	Professeur, Université de Poitiers, Institut P'	(Examinateur)
D. CALLUAUD	Maitre de conférences (HDR), Université de Poitiers, Institut P'	(Examinateur)
L. DAVID	Professeur, Université de Poitiers, Institut P'	(Examinateur)

REMERCIEMENTS

Ce manuscrit est le résultat de trois ans de recherche au sein de l'axe HYDEE de l'Institut P' (Université de Poitiers - CNRS) et je souhaite remercier ici tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail.

Dans un premier temps, je tiens à remercier mes deux directeurs de thèse, Gérard Pineau (Professeur) et Damien Calluau (Maître de conférences HDR) ainsi que Laurent David (Professeur) pour la qualité de leur encadrement. Je tiens à leur témoigner toute mon affection et ma reconnaissance pour les nombreux conseils avisés qu'ils m'ont prodigués et qui m'ont fait évoluer tout au long de ces trois ans de thèse, tant au niveau professionnel que personnel. Merci à Gérard pour sa jovialité, sa rigueur scientifique et ses fines analyses de pêcheur à la truite. Merci à Damien pour son enthousiasme, la pertinence de ses analyses et son franc-parler toujours agrémenté d'un zeste d'humour. Enfin je tiens particulièrement à remercier Laurent qui, depuis le début de mon stage de master, m'a accordé sa confiance et m'a donné l'opportunité de travailler sous contrat sur différents projets qui m'ont à chaque fois permis de développer de nouvelles compétences. Je le remercie également de m'avoir permis de travailler sur ce sujet de thèse, de m'avoir guidé tout au long de ce travail et également pour tous les bons moments partagés au cours de ces dernières années, je pense notamment aux différentes expériences de terrain que nous avons menées ensemble. Un grand merci à Marc Michaud et Grégoire Vaillé pour le gros travail expérimental qu'ils ont mené sur la partie biologique ainsi que pour leurs analyses.

Je tiens également à remercier l'AFB (ex ONEMA) et VNF pour le financement de cette thèse. Je remercie particulièrement Pierre Sagnes, Dominique Courret, Michel Larinier et Sylvain Richard de l'AFB et Christine Bourbon de VNF pour la qualité des nombreux échanges que nous avons eus durant ces trois ans.

Je remercie Monsieur le Professeur Antonio Pinheiro et Monsieur le Professeur Robert Mosé de m'avoir fait l'honneur de rapporter mon mémoire de thèse ainsi que Monsieur Pierre Roumieu, Directeur du pôle hydraulique de la CNR d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

J'adresse toute ma gratitude à l'ensemble du personnel du laboratoire, tout particulièrement à Laurent Dupuis, Christian Refin et Ludovic Mascarenhas pour tout le travail de conception et de maintenance qui a été fait autour du montage expérimental et pour la préparation des expériences de terrain. Merci à Francis Boissonneau de m'avoir initié à l'utilisation du calculateur qui m'a permis de réaliser l'ensemble des simulations présentées dans ce document, de sa disponibilité, de sa réactivité, merci aussi pour toutes nos discussions liées à la mécanique « VAG ». Je remercie également Jean-Marc Mougenot pour son aide lors des manipulations, je garderai longtemps en mémoire ces douces effluves de tomates qu'il diffusait dans le couloir en buvant sa soupe. Merci à Romain Bellanger pour son aide lors de l'installation des matériels liés à la mesure, pour son humour et pour nous avoir fait redécouvrir Tino Rossi. Enfin je tiens à remercier Bastien Robert pour la fabrication des cylindres flexibles.

Je remercie également Carole Beaulieu du LNE pour sa collaboration et son expertise sur la méthode d'évaluation des incertitudes liées à la mesure des hauteurs d'eau.

Je remercie l'ensemble des doctorants et jeunes docteurs du bâtiment H2, Léo-Paul, Yann, Arthur, Mathias, André, Paul, Stanley, Thomas O., Manu, Clément G., Thomas E. et tous les autres pour tous les moments conviviaux que nous avons partagés. Merci tout particulièrement à Clément Caplier, mon premier collègue de bureau qui était également le premier lorsqu'il s'agissait de prendre un verre au Moe's, pour tout ce qu'on a partagé ces dernières années. Je

remercie également Guillaume Gomit, mon second collègue de bureau (impitoyable joueur de squash), pour ses conseils et son soutien pendant ma rédaction et Gwenaël Acher pour nos nombreuses discussions de fin de soirée au labo.

Merci à ma famille, particulièrement mes parents pour avoir cru en moi, pour m'avoir toujours encouragé dans tous mes projets. Je les remercie également pour la relecture du manuscrit et la vérification de l'orthographe.

Enfin je remercie Charlotte de m'avoir épaulé et soutenu tout au long de ce travail, de partager ma vie depuis nos insouciantes années de lycéens, pour tous les bons moments passés et à venir, pour avoir été là dans les moments difficiles...

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
TABLE DES MATIERES	IV
LISTE DES FIGURES	VIII
NOTATIONS	XVI
<hr/>	
INTRODUCTION	1
<hr/>	
I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I.1 Les passes à poissons à fentes verticales.....	6
I.1.1 Comportement hydraulique	6
I.1.2 L'écoulement dans les passes à poissons à fentes verticales.....	12
I.2 L'écoulement au-dessus d'obstacles en canal.....	33
I.2.1 Ecoulement au-dessus d'un seuil rectangulaire.....	33
I.2.2 Ecoulement de parois et de canopée.....	37
I.3 Conclusion.....	45
<hr/>	
II. MOYENS EXPERIMENTAUX ET OUTILS D'ANALYSE.....	47
II.1 Dispositif expérimental.....	48
II.1.1 Le modèle de passe à poissons à l'échelle 1/4	48
II.1.2 Critères de similitude	49
II.1.3 Les configurations étudiées.....	50
II.2 Coefficient de débit.....	55
II.2.1 Position des sondes de hauteur.....	55
II.2.2 Acquisition et post-traitement des données.....	56
II.2.3 Incertitudes de mesures	61
II.3 Profils de vitesses et topologies	66
II.3.1 Position des profils de vitesses.....	68
II.3.2 Conditions de mesure de la topologie	69
II.3.3 Acquisition et post-traitement des données.....	71
II.3.4 Incertitudes de mesures	73
II.4 Analyse du comportement des poissons	74
II.4.1 Présentation de l'installation expérimentale	74
II.4.2 Configurations testées et protocole expérimental	75
II.4.3 Dépouillement des vidéos et traitement des données.....	78
II.5 Conclusion	80
<hr/>	
III. MOYENS NUMERIQUES	83
III.1 L'outil numérique.....	84
III.1.1 La discrétisation spatiale et la méthode de résolution.....	84
III.1.2 Les méthodes RANS/URANS et les modèles de fermeture	84
III.1.3 La méthode LES	86
III.1.4 La modélisation de l'interaction fluide/structure (FSI).....	88
III.2 Mise en place des simulations numériques.....	90
III.2.1 Caractéristiques des simulations	90
III.2.2 Choix du pas de temps et convergence des calculs.....	96
III.2.3 Validation des résultats numériques en configuration radier lisse.....	99
III.3 Conclusion.....	103
<hr/>	

IV.	ETUDE DE L'INFLUENCE DES SEUILS	105
IV.1	Topologie de l'écoulement.....	106
IV.2	Coefficient de débit.....	108
IV.3	Influence de la hauteur des seuils sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement.....	110
IV.3.1	Influence de la hauteur des seuils en petite largeur ($B/b=6,67$).....	111
IV.3.2	Influence de la hauteur des seuils en grande largeur ($B/b=9$).....	112
IV.4	Analyse de l'écoulement avec un seuil de hauteur $h_s/b=1$	116
IV.4.1	Validation des modèles numériques	116
IV.4.2	Etude de l'écoulement.....	119
IV.4.3	Influence de la présence d'un seuil sur les paramètres clés de l'écoulement.....	125
IV.5	Influence des seuils sur le comportement des poissons	128
IV.5.1	Identification des zones de stabulation (repos).....	128
IV.5.2	Indices généraux.....	129
IV.5.3	Temps de séjour.....	135
IV.5.4	Stabulation.....	137
IV.5.5	Trajectoires.....	138
IV.6	Conclusion	140
<hr/>		
V.	ETUDE DE L'INFLUENCE DES MACRO-RUGOSITES	143
V.1	Topologie de l'écoulement.....	144
V.2	Coefficient de débit.....	145
V.3	Influence de la densité de macro-rugosités sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement.....	148
V.4	Analyse de l'écoulement avec une densité de macro-rugosité $d_r=15\%$	153
V.4.1	Validations des modèles numériques.....	153
V.4.2	Etude de l'écoulement	156
V.4.3	Influence de la présence de macro-rugosités sur les paramètres clés de l'écoulement.....	170
V.5	Influence des macro-rugosités sur le comportement des poissons	173
V.5.1	Identification des zones de stabulations.....	173
V.5.2	Synthèse sur les indices généraux.....	174
V.5.3	Synthèse sur les temps de séjour et de stabulation	174
V.5.4	Synthèse sur les trajectoires	176
V.6	Conclusion.....	176
<hr/>		
VI.	ETUDE DE L'INFLUENCE DES STRUCTURES FLEXIBLES	179
VI.1	Coefficient de débit.....	180
VI.2	Influence des structures souples sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement	182
VI.2.1	Influence des structures souples en grande largeur ($B/b=9$).....	182
VI.2.2	Influence des structures souples en petite largeur ($B/b=6,67$).....	185
VI.3	Analyse de l'interaction fluide/structure	189
VI.3.1	Comparaison des résultats numériques et expérimentaux	189
VI.3.2	Analyse de l'écoulement et du comportement des structures pour la grande largeur de bassin ($B/b=9$).....	191
VI.4	Influence des structures souples sur le comportement des poissons	196
VI.4.1	Identification des zones de stabulations	197
VI.4.2	Synthèse sur les indices généraux	197
VI.4.3	Synthèse sur les temps de stabulation	198
VI.4.4	Synthèse sur les trajectoires.....	198
VI.5	Conclusion	199

VII. AMELIORATION DU DIMENSIONNEMENT DES PASSES A POISSONS A FENTES VERTICALES : LOIS DE PREDICTION DU COEFFICIENT DE DEBIT	201
VII.1 Démarche générale.....	204
VII.2 Estimation de la topologie de l'écoulement.....	205
VII.3 Estimation du débit adimensionné Q^*	206
VII.4 Conclusion	210

CONCLUSION GENERALE	211
BIBLIOGRAPHIE.....	215

LISTE DES FIGURES

Figure I-1. Géométries des bassins étudiées (designs 1 à 7), avec b_0 la largeur de fente (Rajaratnam et al., 1986). ..	6
Figure I-2. Coefficients de débit (C_d) obtenus pour différents designs de bassin et différentes hauteurs d'eau relatives (y_0/b_0) avec b_0 la largeur de fente (Rajaratnam et al., 1986).....	7
Figure I-3. Géométries des bassins étudiées (designs 8 à 18), avec b_0 la largeur de fente (Rajaratnam et al., 1992). 8	8
Figure I-4. Vue globale de la géométrie des bassins (Bermúdez et al., 2010).	9
Figure I-5. Dimensions géométriques des bassins testés, avec b la largeur de la fente, B et L respectivement la largeur et la longueur d'un bassin et N le nombre de bassins (Bermúdez et al., 2010).....	10
Figure I-6. Courbes de débit adimensionné en fonction des 16 géométries de bassins. Les résultats numériques incluent les pentes $s=5\%$ et 10% (Bermúdez et al., 2010).	10
Figure I-7. Régressions de l'équation (eq.I-7) sur les coefficients des équations (eq.I-6) et (eq.I-2) et régression linéaire sur Q^* à partir de la Hell's Gate avec $h_1 = Z_0$, $h_2 = Z$, $C_1 = \xi$, $C_2 = C_d$ et $\beta_1 = c$: (a) régression sur ξ ; (b) régression sur C_d ; (c) régression sur Q^* (Fuentes-Pérez et al., 2014).	11
Figure I-8. Hauteurs de chute (a) et hauteurs d'eau à mi-bassin (b) observées expérimentalement et prédites par l'algorithme sur la passe VSF-1 (Fuentes-Pérez et al., 2014).	12
Figure I-9. Topologie d'écoulement en fonction de la largeur des bassins. (a) en grande largeur ($B/b=9$), topologie de type 1 ; (b) en petite largeur ($B/b=6,67$), topologie de type 2 (Tarrade, 2007).....	12
Figure I-10. Topologie d'écoulement en fonction de la pente pour $B/b=7,67$. (a) $s=5\%$; (b) $s=10\%$; (c) $s=15\%$ (Tarrade, 2007).	13
Figure I-11. Topologie d'écoulement pour différentes pentes (s), débits (Q) et largeurs (B/b) (Wang et al., 2010). .	14
Figure I-12. Topologie d'écoulement pour différentes pentes (l), et largeurs (B/S) avec S la largeur de la fente (Musall et al., 2014).	14
Figure I-13. Vitesse moyenne (m/s) à l'échelle 1:1, $B/b=9$, $Q^A=4,8$, $Z/b=2$: a) pente $s=5\%$; b) pente $s=15\%$ (Tarrade, 2007).	15
Figure I-14. Energie cinétique turbulente (m^2/s^2) à l'échelle 1:1, $B/b=5,67$, $Q^A=4,8$, $Z/b=2$: a) pente $s=5\%$; b) pente $s=15\%$ (Tarrade, 2007).	15
Figure I-15. Profils de vitesse moyenne en X_j (Tarrade, 2007).	16
Figure I-16. Vitesse moyenne adimensionnée en $Y_j=0$, $B/b=9$, $Q^A=4,8$ et $Z/b=2$ (Tarrade, 2007).	16
Figure I-17. Résultats du modèle $k-\varepsilon$ haut Reynolds (à gauche) et bas Reynolds (à droite), $B/b=9$ (Bourtal, 2012). .	18
Figure I-18. Vue isométrique du maillage d'un des bassins (Khan et al., 2006).	18
Figure I-19. Variations spatiales de la norme de la vitesse (en niveau de gris) et lignes de courant pour quatre plans parallèles au radier : a) $d/D=0,95$; b) $d/D=0,67$; c) $d/D=0,33$ et d) $d/D=0,05$ avec d la position verticale du plan et D la position de la surface libre (Khan et al., 2006).....	19
Figure I-20. a) trajectoires étudiées (A, B et C) ; b), c) et d) respectivement les variations spatiales de la vitesse, de la force de trainée et de la dépense d'énergie le long des trajectoires A B et C (Khan et al., 2006).	20
Figure I-21. Localisation des zones de stabulation les plus fréquemment utilisées, Zone 1 et Zone 2, et trajectoires-types des truites lors des expérimentations (Wang et al., 2010).	22
Figure I-22. Champs de vorticités de l'écoulement moyen, $s=10\%$ et $Q^A=4,8$. a) $B/b=6,67$, b) $B/b=9$ (Tarrade et al., 2011).	22
Figure I-23. Champs de vitesses instantanées obtenus par PIV, caractérisant les phases de l'écoulement. $B/b=9$, $s=10\%$ et $Q^A=4,8$ (Tarrade et al., 2011).	23
Figure I-24. Champs de vitesses instantanées obtenus par PIV, caractérisant les phases de l'écoulement. $B/b=6,67$, $s=10\%$ et $Q^A=4,8$ (Tarrade et al., 2011).	23
Figure I-25. Passe à poissons de Rivière, vue de dessus et vue de côté ; a) passe à poissons existante b) future passe à poissons, géométrie initiale (Bousmar et al., 2014).	24
Figure I-26. Images de l'écoulement dans le bassin 6 ; a) géométrie initiale ; b) et c) géométrie finale (Bousmar et al., 2014).	25
Figure I-27. Simulation numérique de l'écoulement avec Telemac 2D, géométrie initiale ; a) bassin 2 ; b) bassin 4 (Bousmar et al., 2014).	26
Figure I-28. Visualisations de l'écoulement, $s=10\%$, $Q^A=4,8$. a) $B/b=9$; b) $B/b=6,67$ (Tarrade, 2007).	27
Figure I-29. Adjonction d'une paroi rugueuse (a) et d'un seuil (b) (Mallen-Cooper et al., 2008).	28
Figure I-30. Schéma de l'installation expérimentale pour l'étude des macro-rugosités. (Cassan et al., 2014).	29
Figure I-31. Position des profils de vitesses. (a) technique ADV (b) technique PIV (Bourtal, 2012).	29
Figure I-32. Lignes de courant et champs de vitesses moyennes et d'énergie cinétique turbulente en présence de macro-rugosités pour $Z/b=2$ et $Z/b=0,93$ (Bourtal, 2012).	30
Figure I-33. Représentation des 4 zones d'écoulement définies par Calluaud et al. (2014) dans la configuration sans cylindre (a) et avec cylindre (b) pour $B/b=9$	32
Figure I-34. Représentation des 4 zones d'écoulement définies par Calluaud et al. (2014) dans la configuration sans cylindre (a) et avec cylindre (b) pour $B/b=6,67$	32

Figure I-35. Ecoulement par-dessus un déversoir rectangulaire à crête mince noyé sous une grande hauteur d'eau (Rajaratnam & Muralidhar, 1969).	33
Figure I-36. Vue générale de l'écoulement (Rajaratnam & Muralidhar, 1969).	34
Figure I-37. Profils de vitesses (Rajaratnam & Muralidhar, 1969).	34
Figure I-38. Régimes pour des déversoirs rectangulaires à crêtes minces : a) jet incident ; b) vague déferlante ; c) vague ondulante ; d) jet de surface (Wu et al., 1996).	34
Figure I-39. Frontières entre les régimes d'écoulement. Au-dessus de la courbe 2 : jet de surface ; en dessous de la courbe 1 : jet plongeant ; entre les deux ; zone de transition (Wu et al., 1996).	35
Figure I-40. Schéma de l'installation expérimentale et des systèmes de coordonnées associées. a) vue de côté de la zone d'essais ; b) et c) esquisses montrant les différentes régions de l'écoulement derrière respectivement le bloc carré et le bloc semi-circulaire. X_r est la longueur de rattachement et L_r la longueur de la bulle de séparation (Agelinchaab et al., 2008).	35
Figure I-41. Evolution de la position de la ligne de courant séparatrice dans la région de recirculation en fonction de la forme des blocs. x' est dans la direction de l'écoulement et à son origine au point de décollement. h est la hauteur du bloc (Agelinchaab et al., 2008).	36
Figure I-42. Profils de vitesses moyenne U (a) et V (b) à différentes positions dans la région de recirculation et pour les trois formes de bloc (Agelinchaab et al., 2008).	36
Figure I-43. Différentes régions d'une couche limite turbulente (Chassaing, 2000).	38
Figure I-44. Couche limite turbulente rugueuse dans le cas d'une rivière (Detert, 2008).	39
Figure I-45. Canal hydraulique (Florens, 2010).	40
Figure I-46. Configurations de rugosités homogènes étudiées par Florens (2010). a) configuration de cubes alignés S_1 ; b) configuration de cubes en décalés S_2	40
Figure I-47. Schéma du principe d'acquisition des plans verticaux (Florens, 2010).	41
Figure I-48. Dispersion spatiale D_s normalisée, calculée pour différentes grandeurs statistiques représentatives de l'écoulement moyen et de la turbulence (Florens et al., 2013).	42
Figure I-49. Installation expérimentale (Nepf & Vivoni, 2000).	43
Figure I-50. À gauche : évolution du coefficient de trainée C_D sur la colonne d'eau dans la canopée (h : hauteur de la canopée) ; à droite évolution de la densité de la canopée sur la colonne d'eau (Nepf & Vivoni, 2000).	44
Figure I-51. Configuration expérimentale (Ghisalberti & Nepf, 2002).	45
Figure I-52. Schéma montrant les caractéristiques des tourbillons générés dans un écoulement au-dessus d'une canopée végétale responsable du fléchissement périodique des plantes (monami) (Ghisalberti & Nepf, 2002).	45
Figure II-1. Passe à poissons du laboratoire (échelle $\frac{1}{4}$).	48
Figure II-2. Géométrie des bassins de la passe à poissons du laboratoire.	49
Figure II-3. Hauteurs des seuils étudiées : (a) $h_s/b=0,5$; (b) $h_s/b=1$; (c) $h_s/b=1,5$	51
Figure II-4. Macro-rugosités utilisées pour les expériences dans la passe à poissons.	52
Figure II-5. Densité de macro-rugosités $d_r=10\%$ (a) et $d_r=15\%$ (b).	52
Figure II-6. Disposition des plots pour $d_r=10\%$ (à gauche), vue en 3D d'un bassin de la passe à poissons avec une densité de macro-rugosités $d_r=10\%$ (à droite)	53
Figure II-7. Disposition des plots pour $d_r=15\%$ (à gauche), vue en 3D d'un bassin de la passe à poissons avec une densité de macro-rugosités $d_r=15\%$ (à droite)	53
Figure II-8. Fixation des structures souples sur leur plaque support et sur la plaque disposée sur le radier de la passe à poissons.	54
Figure II-9. Positions de la sonde acoustique dans le bassin 3.	55
Figure II-10. Evolution du coefficient de débit sur la largeur du bassin.	56
Figure II-11. Position des sondes acoustiques dans les bassins.	56
Figure II-12. Montage des sondes acoustiques dans les bassins.	57
Figure II-13. Schéma de la chaîne d'acquisition des hauteurs d'eau dans les bassins.	57
Figure II-14. Zone de détection des sondes acoustiques.	57
Figure II-15. En arrière-plan : visualisation des variations de hauteur d'eau dans chaque bassin. Au premier plan : cadran circulaire à aiguilles et graphe déroulant pour la visualisation de l'état d'équilibre des hauteurs d'eau.	58
Figure II-16. Spectre du signal de hauteur pour une acquisition de 15 minutes.	59
Figure II-17. Exemple d'une acquisition de hauteur comportant des valeurs aberrantes dues à la perte de signal du capteur.	60
Figure II-18. Signal de hauteur (en bleu) et sa dérivée (en vert) pour la détection des pics.	60
Figure II-19. Signal non filtré (en bleu) et signal après filtrage (en rouge).	61
Figure II-20. Correction sur la hauteur mesurée. En rouge la hauteur corrigée, en vert la hauteur mesurée, en bleu le niveau d'eau dans le bassin. α correspond à l'angle d'inclinaison de la passe à poissons.	63
Figure II-21. Contribution moyenne des différentes grandeurs d'entrées sur les incertitudes élargies moyennes associées aux mesures du coefficient de débit.	65
Figure II-22. Histogramme de l'incertitude relative sur la mesure du coefficient de débit pour l'ensemble des points de mesures.	66

Figure II-23. Position et orientation du repère lié à la passe à poissons (X,Y,Z) et de l'axe Z' définissant la direction verticale du repère absolu (repère terrestre).....	68
Figure II-24. Profils de vitesses définis pour étudier l'écoulement dans la passe à poissons.....	68
Figure II-25. Topologies d'écoulement T1 et T2 dans les passes à poissons à fentes verticales.....	70
Figure II-26. Position du point de mesure (croix bleue) pour la détermination de la topologie de l'écoulement.....	70
Figure II-27. Positionnement des points utilisés pour l'analyse de la convergence en temps des signaux de vitesses.....	71
Figure II-28. Taux de convergence temporel sur les composantes de vitesses moyennes aux points 1 (a), 2 (b), 3 (c) et 4 (d).....	72
Figure II-29. Taux de convergence temporel sur les composantes fluctuantes de vitesse aux points 1 (a), 2 (b), 3 (c) et 4 (d).....	72
Figure II-30. Histogrammes des incertitudes relatives associées à la mesure avec la sonde ADV pour l'ensemble des points de mesures sur : a) la norme de la vitesse (3D) ; b) l'énergie cinétique turbulente (3D).....	74
Figure II-31. Equipement installé sur la passe à poissons du laboratoire lors des manipulations avec les poissons..	75
Figure II-32. Définition des différents mouvements de base.....	78
Figure III-1. Spectre d'énergie en nombre d'onde en turbulence pleinement développée. Frontière entre les échelles résolues et les échelles modélisées en LES.....	86
Figure III-2. Géométrie de la passe à poissons utilisée (configuration radier lisse).....	90
Figure III-3. Conditions aux limites spécifiées sur les frontières du domaine de calcul.....	91
Figure III-4. Maillage de la passe à poissons munie de macro-rugosités utilisé en simulation URANS avec les différents degrés de raffinement.....	92
Figure III-5. Maillage de la passe à poissons munie de structures souples utilisé en simulation URANS avec les différents degrés de raffinement.....	93
Figure III-6. Maillage de la passe à poissons munie de macro-rugosités utilisé en simulation LES avec les différents degrés de raffinement.....	93
Figure III-7. Evolution de la vitesse de frottement adimensionnée u^+ en fonction de la distance à la paroi y^+	95
Figure III-8. Visualisation du critère y^+ sur la paroi : a) Simulation URANS ; b) Simulation LES.....	95
Figure III-9. Niveau d'eau aval imposé en condition initiale en URANS.....	96
Figure III-10. Niveau d'eau imposé en condition initiale en LES.....	96
Figure III-11. Position des points de mesure de vitesses utilisés pour sortir de la boucle sous-itérative.....	97
Figure III-12. Exemples de taux de convergence des vitesses moyennes et RMS calculés au point 3 dans le cas d'une simulation URANS (a) et (b) et d'une simulation LES (c) et (d).....	98
Figure III-13. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=9$. (a), (c) et (e) : norme de la vitesse 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E ; (b), (d) et (f) : énergie cinétique 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E.....	100
Figure III-14. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=6,67$. (a), (c) et (e) : norme de la vitesse 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E ; (b), (d) et (f) : énergie cinétique 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E.....	102
Figure IV-1. Cartographies de la topologie de l'écoulement en fonction de la pente, de la largeur des bassins, du débit et de la hauteur des seuils. (a) configuration radier lisse (Wang et al., 2010), (b) configuration seuil $h_s/b=0,5$, (c) configuration seuil $h_s/b=1$, (d) configuration seuil $h_s/b=1,5$	106
Figure IV-2. Cartographies des zones de transition entre la topologie de type 1 et la topologie de type 2 en fonction des seuils.....	107
Figure IV-3. Evolution du coefficient de débit pour les différentes hauteurs de seuils en fonction : (a) du débit, (b) de la pente et (c) de la largeur de bassin.....	109
Figure IV-4. Histogrammes du coefficient de débit en fonction de la topologie T1 ou T2 pour les différentes hauteurs de seuils.....	110
Figure IV-5. Visualisation de la topologie de l'écoulement en 2D à partir des composantes de vitesses U/V_d et V/V_d pour $B/b=6,67$. (a) Profils A, B, E et F configuration radier lisse ; (b) Profils A, B, E et F avec seuil $h_s/b=0,5$	111
Figure IV-6. Profils verticaux de vitesses moyennes en fonction de la hauteur des seuils. (a) Profil C ; (b) Profil D.....	111
Figure IV-7. Profils d'énergie cinétique turbulente le long du profil E.....	112
Figure IV-8. Visualisation de la topologie de l'écoulement en 2D pour la plus grande largeur de bassin ($B/b=9$), à partir des composantes de vitesses U/V_d et V/V_d des profils A, B, E et F. (a) Configuration $h_s/b=1$; (b) Configuration $h_s/b=1,5$	112
Figure IV-9. Courbes de vitesse moyenne et d'énergie cinétique turbulente le long du profil A en configuration $B/b=9$ pour les différentes hauteurs de seuils. a) U/V_d ; b) V/V_d , c) W/V_d , d) k_w/V_d^2	113
Figure IV-10. Courbes de vitesse moyenne et d'énergie cinétique turbulente le long du profil B en configuration $B/b=9$ pour les différentes hauteurs de seuils. a) U/V_d ; b) V/V_d , c) W/V_d , d) k_{3D}/V_d^2	114
Figure IV-11. Courbes de vitesse moyenne le long des profils C et D en configuration $B/b=9$ pour les différentes hauteurs de seuils. a) U/V_d profil C ; b) U/V_d profil D c) k_w/V_d^2 profil C, d) k_w/V_d^2 profil D.....	115

Figure IV-12. Courbes de vitesse moyenne et d'énergie cinétique turbulente le long du profil D' en configuration B/b=9 pour les différentes hauteurs de seuils. a) U/V_d ; b) k_w/V_d^2	115
Figure IV-13. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour B/b=9 avec $h_s/b=1$. (a), (c) et (e) : norme de la vitesse 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E ; (b), (d) et (f) : énergie cinétique 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E.	117
Figure IV-14. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour B/b=6,67 avec $h_s/b=1$. (a), (c) et (e) : norme de la vitesse 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E ; (b), (d) et (f) : énergie cinétique 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E.	119
Figure IV-15. Champs de vitesse moyens en configuration radier lisse pour B/b=9. À gauche : plans de coupe dans les fentes 2 et 3 ; à droite : plans de coupe horizontaux à Z/b=0,5 ; 2 et 4.	121
Figure IV-16. Champs de vitesse moyens en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour B/b=9. À gauche : plans de coupe dans les fentes 2 et 3 ; à droite : plans de coupe horizontaux à Z/b=0,5 ; 2 et 4.....	121
Figure IV-17. Trajectoire moyenne du jet traversant chacun des bassins dans la configuration $h_s/b=1$ pour B/b=9.	122
Figure IV-18. Champs de vitesse moyens et lignes de courant sur le plan orienté à 45° et passant par le milieu de la fente amont du bassin 3 en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour B/b=9.	122
Figure IV-19. Champs de vitesse moyens en configuration radier lisse pour B/b=6,67. À gauche : plans de coupe dans les fentes 2 et 3 ; à droite : plans de coupe horizontaux à Z/b=0,5 ; 2 et 4.	123
Figure IV-20. Champs de vitesse moyens en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour B/b=6,67. À gauche : plans de coupe dans les fentes 2 et 3 ; à droite : plans de coupe horizontaux à Z/b=0,5 ; 2 et 4.	124
Figure IV-21. Champs de vitesse moyens et lignes de courant sur le plan orienté à 45° et passant par le milieu de la fente amont du bassin 3 en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour B/b=6,67.	124
Figure IV-22. Régions où les critères de vorticité (en noir), d'énergie cinétique turbulente (en vert) et de vitesse (en bleu) sont supérieurs aux valeurs seuils dans la configuration radier lisse (à gauche) et en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour B/b=9. Les régions où les valeurs seuils ne sont pas atteintes sont délimitées en rouge et sont numérotées dans la configuration radier lisse.	126
Figure IV-23. Régions où les critères de vorticité (en noir), d'énergie cinétique turbulente (en vert) et de vitesse (en bleu) sont supérieurs aux valeurs seuils dans la configuration radier lisse (à gauche) et en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour B/b=6,67. Les régions où les valeurs seuils ne sont pas atteintes sont délimitées en rouge et sont numérotées dans la configuration radier lisse.	127
Figure IV-24. Zones de stabulation identifiées pour les truites dans le bassin de la passe à poissons (Cornu et al., 2012).	128
Figure IV-25. Evolution de l'efficacité totale en fonction du nombre de tests et de la configuration.	129
Figure IV-26. Efficacité totale en fonction des lots.	129
Figure IV-27. Efficacité totale en fonction de la configuration.	130
Figure IV-28. Franchissement total en fonction des lots.	130
Figure IV-29. Franchissement total en fonction de la configuration pour les lots 1A-1B-2A-2B.	131
Figure IV-30. Franchissement total en fonction de la configuration pour les lots 3 et 4.	131
Figure IV-31. Indice d'activité en fonction du lot.	132
Figure IV-32. Indice d'activité en fonction de la configuration pour les lots 1A-1B-2A-2B.	133
Figure IV-33. Indice d'activité en fonction de la configuration pour les lots 3-4.	133
Figure IV-34. Tentative échouée de montaison d'une truite de petite taille suite à un arrêt derrière le seuil. L'image représente la position de la truite à différents instants.	134
Figure IV-35. Indice de dévalaison en fonction des lots.	134
Figure IV-36. Indice de dévalaison en fonction de la configuration.	135
Figure IV-37. Temps de séjour dans le bassin 3 en fonction des lots.	136
Figure IV-38. Temps de séjour dans le bassin 3 en fonction de la configuration pour les lots 3 et 4.	136
Figure IV-39. Temps de séjour dans le bassin 3 en fonction de la configuration pour les lots 1A, 1B, 2A et 2B.	137
Figure IV-40. Répartition de l'utilisation de chacune des zones pour chaque configuration.	137
Figure IV-41. Destination après franchissement de la fente aval (entrée dans le bassin) -- montaison.	139
Figure IV-42. Destination après un passage en zone 1 -- montaison.	139
Figure IV-43. Destination après un passage en zone 2 -- montaison.	139
Figure IV-44. Destination après un passage en zone 3 -- montaison.	139
Figure IV-45. Dernière zone de passage avant le franchissement de la fente amont -- montaison.	140
Figure IV-46. Dernière zone de passage avant le franchissement de la fente aval -- montaison.	140
Figure IV-47. Dernière zone de passage avant la sortie du bassin -- montaison.	140
Figure V-1. Cartographies de la topologie de l'écoulement en fonction de la pente, de la largeur des bassins, du débit et de densité de macro-rugosités. (a) configuration radier lisse (Wang et al., 2010), (b) configuration macro-rugosités $d_r=10\%$, (c) configuration macro-rugosités $d_r=15\%$	144
Figure V-2. Cartographies des zones de transition entre la topologie de type 1 et la topologie de type 2 en fonction de la densité de macro-rugosités.	145

Figure V-3. Evolution du coefficient de débit pour la configuration radier lisse et les deux densités de macro-rugosités en fonction : (a) du débit, (b) de la pente et (c) de la largeur de bassin.....	146
Figure V-4. Evolution de l'écart relatif entre le C_d calculé pour une pente $s=5\%$ et celui calculé pour une pente $s=12,5\%$ en fonction de la largeur des bassins et de la configuration (radier lisse, $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$).	147
Figure V-5. Evolution de l'écart relatif entre le C_d calculé pour une largeur de bassin $B/b=5,67$ et celui calculé pour $B/b=9$ en fonction de la pente et de la configuration (radier lisse, $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$).	147
Figure V-6. Histogrammes du coefficient de débit en fonction de la topologie T1 ou T2 pour les différentes densités de macro-rugosités.	148
Figure V-7. Norme de la vitesse tridimensionnelle en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil B. Pour $B/b=6,67$ (a) et pour $B/b=9$ (b).	149
Figure V-8. Norme de la vitesse tridimensionnelle en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil E. Pour $B/b=6,67$ (a) et pour $B/b=9$ (b).....	149
Figure V-9. Energie cinétique turbulente en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil B et la largeur $B/b=6,67$	150
Figure V-10. Energie cinétique turbulente en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil E et la largeur $B/b=6,67$	151
Figure V-11. Energie cinétique turbulente en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil B et la largeur $B/b=9$	152
Figure V-12. Energie cinétique turbulente en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil E et la largeur $B/b=9$	153
Figure V-13. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=9$ avec $d_r=15\%$ pour les profils B, D et E. À gauche : norme de la vitesse 3D adimensionnée, à droite : énergie cinétique 3D adimensionnée.	154
Figure V-14. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=6,67$ avec $d_r=15\%$ pour les profils B, D et E. À gauche : norme de la vitesse 3D adimensionnée, à droite : énergie cinétique 3D adimensionnée.....	156
Figure V-15. Champs de vitesses moyens en configuration $d_r=15\%$ pour $B/b=9$. À gauche : plans de coupe au milieu des fentes 2 et 3 (à 45°) ; à droite : plans de coupe horizontaux à $Z/b=0,5$; $0,8$ et 3 équivalent respectivement à $Z/h_r=0,75$; $1,2$ et $4,5$	157
Figure V-16. Evolution de la position des cœurs tourbillonnaires (en rouge) des principales zones de recirculation dans la configuration radier lisse. Les lignes de courant issues du champ moyen de vitesse sont tracées en vert pour montrer l'évolution spatiale de la zone de recirculation supérieure, en rouge pour le jet, en bleu foncé pour la zone de recirculation inférieure et en bleu clair pour la petite zone de recirculation située derrière le déflecteur central.	158
Figure V-17. Evolution de la position des cœurs tourbillonnaires (en rouge) des principales zones de recirculation dans la configuration $d_r=15\%$. Les lignes de courant issues du champ moyen de vitesse sont tracées en vert pour montrer l'évolution spatiale de la zone de recirculation supérieure, en rouge pour le jet et en bleu pour la zone de recirculation inférieure.	159
Figure V-18. Champ de vitesses moyen adimensionné par la vitesse maximale dans le jet (V_{sm}) et position de la ligne centrale du jet et des profils de vitesses transversaux.	159
Figure V-19. Evolution de la largeur du jet et du profil de vitesse moyen en fonction de x_j dans les configurations radier lisse et $d_r=15\%$ pour $B/b=9$	160
Figure V-20. Evolution de la demi-largeur du jet en fonction de x_j dans les configurations radier lisse et $d_r=15\%$ et comparaison avec les régressions proposées par Liu et al. (2006) et Tarrade (2007). À gauche, demi-largeur b_j ; à droite demi-largeur $b_{j,r}$	160
Figure V-21. Evolution de la vitesse maximale U_{jmax} dans le jet en fonction de x_j dans les configurations radier lisse et $d_r=15\%$ pour $B/b=9$	161
Figure V-22. Positions des points utilisés pour réaliser la double moyenne dans la configuration $d_r=15\%$ et $B/b=9$. À gauche tous les plans horizontaux sont représentés, à droite quelques plans seulement.	162
Figure V-23. Production turbulente en fonction de la distance normale à la paroi dans la configuration $d_r=15\%$ et $B/b=9$ et hauteur de la sous-couche rugueuse (z_{RS}).	163
Figure V-24. Profils de vitesses dans la couche limite au-dessus des macro-rugosités.	164
Figure V-25. Champs de vitesses instantanées, issus de la simulation numérique dans la configuration radier lisse, caractérisant les différentes phases de l'écoulement (plan $Z/b=2$).	165
Figure V-26. Champs de vitesses instantanées, issus de la simulation numérique dans la configuration $d_r=15\%$, caractérisant les différentes phases de l'écoulement. À gauche sur le plan $Z/h_r=1,2$; à droite sur le plan $Z/h_r=3$. .	166
Figure V-27. Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente à l'intérieur et au-dessus des macro-rugosités.	167
Figure V-28. Champs de vitesse moyens en configuration $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$. À gauche : plans de coupe au milieu des fentes 2 et 3 (à 45°) ; à droite : plans de coupe horizontaux à $Z/b=0,5$; $0,8$ et 3 équivalent respectivement à $Z/h_r=0,75$; $1,2$ et $4,5$	168
Figure V-29. Lignes de courant issues du champ moyen de vitesse pour $B/b=6,67$. À gauche dans la configuration radier lisse, à droite $d_r=15\%$	168

Figure V-30. Evolution de la largeur du jet et du profil de vitesse moyen en fonction de x_j dans les configurations radier lisse et $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$.	169
Figure V-31. Evolution de la vitesse maximale U_{jmax} dans le jet en fonction de x_j dans les configurations radier lisse et $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$.	169
Figure V-32. Régions où les critères de vorticité (en noir), d'énergie cinétique turbulente (en vert) et de vitesse (en bleu) sont supérieurs aux valeurs seuils dans la configuration radier lisse (� gauche) et en configuration avec des macro-rugosités de densité $d_r=15\%$ pour $B/b=9$. Les régions où les valeurs seuils ne sont pas atteintes sont délimitées en rouge et sont numérotées dans la configuration radier lisse.	171
Figure V-33. Régions où les critères de vorticité (en noir), d'énergie cinétique turbulente (en vert) et de vitesse (en bleu) sont supérieurs aux valeurs seuils dans la configuration radier lisse (� gauche) et en configuration avec des macro-rugosités de densité $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$. Les régions où les valeurs seuils ne sont pas atteintes sont délimitées en rouge et sont numérotées dans la configuration radier lisse.	172
Figure V-34. Zones de stabulations verticales définies dans le bassin de mesure dans la configuration $B/b=6,67$.	174
Figure V-35. Franchissement total des truites arc-en-ciel en fonction des configurations. a) toutes les tailles, b) les lots de poissons de grande taille et c) les lots de poissons de petite taille. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons (Vaillé, 2016).	174
Figure V-36. Temps de séjours des truites fario en fonction des configurations. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons et les étoiles indiquent la significativité des tests statistiques (Michaud, 2015).	175
Figure V-37. Proportions de l'effectif de truites fario qui utilisent les zones de stabulation en fonction des configurations (Michaud, 2015).	175
Figure V-38. Temps de stabulation des truites arc-en-ciel en fonction des configurations. a) toutes les tailles, b) les lots de poissons de grande taille et c) les lots de poissons de petite taille. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons (Vaillé, 2016).	175
Figure VI-1. Evolution du coefficient de débit dans les configurations radier lisse et structures souples en fonction : (a) du débit, (b) de la pente et (c) de la largeur de bassin.	181
Figure VI-2. Profils de vitesses moyennes colorés en fonction de l'énergie cinétique turbulente pour $B/b=9$ en $Z/L_c=1$. a) configuration radier lisse ; b) configuration structures souples.	183
Figure VI-3. Profils de vitesses moyennes colorés en fonction de la vitesse verticale W/V_d pour $B/b=9$ en $Z/L_c=1$. a) configuration radier lisse ; b) configuration structures souples.	184
Figure VI-4. Evolution de la vitesse moyenne (a) et de l'énergie cinétique turbulente (b) pour le profil D dans la configuration structures souples et $B/b=9$.	185
Figure VI-5. Evolution de la vitesse moyenne (a) et de l'énergie cinétique turbulente (b) pour le profil D' dans la configuration structures souples et $B/b=9$.	185
Figure VI-6. Profils de vitesses moyennes colorés en fonction de l'énergie cinétique turbulente pour $B/b=6,67$ en $Z/L_c=1$. a) configuration radier lisse ; b) configuration structures souples.	186
Figure VI-7. Profils de vitesses moyennes colorés en fonction de la vitesse verticale W/V_d pour $B/b=6,67$ en $Z/L_c=1$. a) configuration radier lisse ; b) configuration structures souples.	187
Figure VI-8. Evolution de la vitesse moyenne (a) et de l'énergie cinétique turbulente (b) pour le profil D dans la configuration structures souples et $B/b=6,67$.	188
Figure VI-9. Evolution de la vitesse moyenne (a) et de l'énergie cinétique turbulente (b) pour le profil D' dans la configuration structures souples et $B/b=6,67$.	188
Figure VI-10. Comparaison des profils de vitesses (� gauche) et d'énergie cinétique turbulente (� droite) obtenus numériquement et expérimentalement. De haut en bas : profils B, D, D', E et F.	190
Figure VI-11. Champs de vitesse moyens en configuration structures souples pour $B/b=9$. Zoom sur l'écoulement qui traverse la canopée de cylindre à $Z/L_c=0,5$, avec le numéro de chaque cylindre.	191
Figure VI-12. Champs de vitesse moyens en configuration structures souples pour $B/b=9$. Plans de coupe horizontaux à $Z/h_r=1$; 2 et 3 équivalent respectivement à $Z/h_r=0,5$; 1 et 1,5.	192
Figure VI-13. En couleur : Isocontours de vitesse $ V _{3D}/V_d=0,7$ et taux de dissipation ; en niveau de gris : $ V _{3D}/V_d$ sur un plan transversal situé à une distance égale à 4 fois le diamètre d'un cylindre derrière les structures.	193
Figure VI-14. « Lignes de courant » en 3D du champ moyen et vitesse verticale dans la configuration structures souples et $B/b=9$.	193
Figure VI-15. Evolution de la valeur moyenne et de la fluctuation du déplacement au sommet du cylindre 3 et spectres associés en fonction des bassins : a) bassin 1 b) bassin 2 c) bassin 3 et d) bassin 4.	194
Figure VI-16. Installation expérimentale utilisée pour mesurer l'amplitude des déformations et la fréquence d'oscillation des cylindres souples. De gauche à droite : canal expérimental à surface libre (12 m de long avec une largeur et une hauteur de 1 m, débit max $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), caméra rapide LaVision et image instantanée d'un cylindre dans l'écoulement.	195

Figure VI-17. Déplacements moyens des cylindres du bassin 3. Les couleurs représentent chacune des quatre rangées de cylindres, la rangée 1 étant la rangée la plus en amont. Les points noirs sur la figure en haut à droite représentent les cylindres qui subissent le plus de déformation sur chacune des rangées.	196
Figure VI-18. Positions des zones de stabulations en présence de structures souples. À gauche dans le cas de la petite largeur de bassin ($B/b=6,67$), à droite pour la grande largeur ($B/b=9$).	197
Figure VI-19. Zones de stabulations verticales définies dans le bassin de mesure dans les configurations $B/b=6,67$ et 9.	197
Figure VI-20. Efficacité totale en fonction des configurations pour a) toutes les tailles, b) les lots d'individus de grande taille et c) les lots d'individus de petite taille. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons (Vaillé, 2016).	198
Figure VI-21. Temps de stabulation en fonction des configurations pour $B/b=6,67$ pour a) la zone haute et b) la zone basse. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons (Vaillé, 2016).	198
Figure VII-1. Exemple des cas retenus pour établir la loi de prédiction de la largeur limite en topologie de type 1 (entourés en vert) et de type 2 (entourés en rouge).	205
Figure VII-2. Largeurs de bassin prédites en fonction des largeurs mesurées pour la détection de la topologie de type 1 et de type 2.	206
Figure VII-3. Débit adimensionné Q^* prédit en fonction de Q^* mesuré. a) avec prise en compte de la topologie de l'écoulement ; b) sans prise en compte de la topologie de l'écoulement	208
Figure VII-4. Logigramme de la démarche de dimensionnement.	209
Figure VII-5. Comparaison entre les débits Q_{pred} en fonction des débits mesurés Q obtenus par les formules proposées dans cette thèse et ceux de la littérature. a) présente étude ; b) Rajaratnam et al. (1986) ; c) Kamula (2001) ; d) Tarrade (2007).	210

NOTATIONS

Systèmes de référence

$\mathcal{R}(O, X, Y, Z)$:	Système de coordonnées lié à la passe à poissons
$\mathcal{R}(O, X_f, Y_f, Z_f)$:	Système de coordonnées lié à la fente amont du bassin 3
X, Y, Z :	Coordonnées cartésiennes d'un point (m)

Nombres adimensionnels

F_r :	Nombre de Froude (-)
R_e :	Nombre de Reynolds (-)
R_τ :	Nombre de Reynolds de la turbulence (-)

Paramètres caractéristiques du fluide

g :	Accélération de la pesanteur ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
ν :	Viscosité cinématique ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
ρ :	Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Paramètres géométriques et hydrauliques de la passe à poissons

b :	Largeur de fente (m)
B :	Largeur d'un bassin (m)
C_d :	Coefficient de débit (-)
C_c :	Cylindre flexible utilisé dans le canal (-)
C_p :	Cylindre flexible utilisé dans la passe à poissons (-)
d_r :	Densité de macro-rugosités (%)
D :	Hauteur de la surface libre (m)
E :	Module d'Young (MPa)
H_{ht} :	Hauteur hors tout (m)

h_r :	Hauteur des macro-rugosités (m)
h_s :	Hauteur de seuil (m)
L :	Longueur d'un bassin (m)
l_{ht} :	Longueur hors tout (m)
L_{ht} :	Largeur hors tout (m)
L_c :	Hauteur d'un cylindre flexible (m)
Q :	Débit ($m^3.s^{-1}$)
Q^A :	Débit adimensionné proposé par Puertas et al. (2004) (-)
Q^* :	Débit adimensionnée proposé par Rajaratnam et al. (1992) (-)
Q^{**} :	Débit adimensionnée proposé par Kamula (2001) (-)
$Q^{*'}$:	Débit adimensionnée proposé par Tarrade (2007) (-)
Q_{pred} :	Débit prédit lors de la phase de dimensionnement ($m^3.s^{-1}$)
s :	Pente (%)
V_b :	Volume d'eau dans un bassin (m^3)
Z :	Hauteur d'eau au milieu d'un bassin (m)
Z_0 :	Hauteur d'eau au milieu du bassin amont (m)
α_c :	Nombre de confinement (-)
α_i :	Angle d'inclinaison de la passe à poissons ($^\circ$)
ΔB :	Ecart de largeur de bassin (m)
Δh :	Hauteur de chute entre les bassins (m)
\emptyset_r :	Diamètre des macro-rugosités (m)

Paramètres liés au calcul des incertitudes expérimentales

k :	Facteur d'élargissement (-)
n :	Nombre d'observations indépendantes
s_{exp} :	Ecart-type expérimental
$u(b)$:	Incertitude-type associée au mesurage de la largeur de fente b (m)
$u(s)$:	Incertitude-type associée au mesurage de la pente s du canal (%)
$u(h_s)$:	Incertitude-type associée au mesurage de la hauteur de seuil h_s (m)
$u(x_i)$:	Incertitude-type associée à la grandeur x_i

$u_c(y)$:	Incertitude-type composée associée à la grandeur calculée y
U_e :	Incertitude élargie
X :	Meilleure estimation du résultat de mesure
x_i :	Observations indépendantes
\bar{x} :	Moyenne arithmétique des n observations x_i

Paramètres liés au calcul des erreurs de discrétisations spatiales en simulation numérique

f_1, f_2, f_3 :	Solutions obtenues avec le nombre de mailles N_1, N_2, N_3
f_{ext} :	Solution extrapolée
GCI_{21} :	Erreur relative de discrétisation spatiale
N_1, N_2, N_3 :	Nombre de mailles des simulations
p :	Ordre apparent de convergence
r_{12}, r_{23} :	Rapports de raffinement (-)

Paramètres liés au filtrage des données

k_f :	Coefficient de filtrage des sondes acoustiques (-)
k_g :	Paramètre (seuil) du filtre d'accélération (-)
Z_{0mes} :	Hauteur d'eau au milieu du bassin amont avant correction (m)
Z_{mes} :	Hauteur d'eau au milieu du bassin aval avant correction (m)
λ :	Paramètre du filtre de phase spatiale (-)
σ :	Ecart-type calculé pour le filtre de phase spatiale ($m.s^{-1}$)

Grandeurs relatives à l'écoulement

b_- :	Demi-largeur du jet, partie gauche en regardant vers l'aval (m)
b_+ :	Demi-largeur du jet, partie droite en regardant vers l'aval (m)
d :	Hauteur de déplacement (m)
\hat{f} :	Fluctuation spatiale d'une grandeur f moyennée temporellement
$\langle F \rangle$:	Moyenne spatiale d'une grandeur f moyennée temporellement

k_u, k_v, k_w :	Composante de l'énergie cinétique turbulente ($m^2.s^{-2}$)
k_{2D}, k_{3D} :	Energie cinétique bidimensionnelle (composante k_u et k_v) et tridimensionnelle ($m^2.s^{-2}$)
RMS_u, RMS_v, RMS_w :	Ecart-types des composantes de la vitesse de l'écoulement ($m.s^{-1}$)
u_i, v_i, w_i :	Composantes instantanées de la vitesse de l'écoulement ($m.s^{-1}$)
$\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}$	Variances des composantes de la vitesse de l'écoulement ($m^2.s^{-2}$)
u^+ :	Vitesse de frottement adimensionnée (-)
u_τ :	Vitesse de frottement pariétal ($m.s^{-1}$)
U, V, W :	Composantes de la vitesse moyenne de l'écoulement ($m.s^{-1}$)
U_j :	Vitesse du jet dans les sections perpendiculaire au jet ($m.s^{-1}$)
U_{jmax} :	Vitesse maximale sur une section perpendiculaire au jet ($m.s^{-1}$)
U_s :	Vitesse de l'écoulement en similitude de Froude ($m.s^{-1}$)
U_∞ :	Vitesse dans la zone externe à la couche limite ($m.s^{-1}$)
V_d :	Vitesse débitante maximale théorique dans un bassin ($m.s^{-1}$)
V_{sm} :	Vitesse maximale atteinte dans le jet en simulation numérique ($m.s^{-1}$)
$\ V\ _{2D}, \ V\ _{3D}$:	Module bidimensionnel (composante U et V) et tridimensionnel de la vitesse moyenne de l'écoulement ($m.s^{-1}$)
x_j :	Distance le long du jet (m)
y^+ :	Distance adimensionnée à la paroi (-)
y_j :	Distance le long d'un axe perpendiculaire à la direction du jet (m)
z_0 :	Longueur de rugosités (m)
z_{RS} :	Hauteur de la sous-couche rugueuse (m)
δ :	Epaisseur conventionnelle de la couche limite (m)
δ_v :	Echelle de longueur en proche paroi (m)
ε :	Taux de dissipation ($m^2.s^{-3}$)
τ_w :	Contrainte de cisaillement (Pa)

Grandeurs relatives aux poissons

Eff_{tot} :	Efficacité totale en montaison (%)
FT :	Franchissement total (accès/individu)

ID :	Indice de dévalaison (%)
L_m :	Longueur moyenne des poissons d'un lot (mm)
$Mouv$:	Indice d'activité (mouvement/individu)
σ_m :	Ecart-type de longueur des poissons d'un lot (mm)

Grandeurs relatives à la modélisation numérique

f^* :	Grandeur instantanée (LES)
\tilde{f} :	Grandeur instantanée filtrée (LES)
f' :	Grandeur de sous maille (LES)
k :	Energie cinétique turbulente ($m^2.s^{-2}$)
k_m :	Energie cinétique turbulente modélisée ($m^2.s^{-2}$)
k_r :	Energie cinétique turbulente résolue ($m^2.s^{-2}$)
l_m :	Echelle de longueur caractéristique (m)
p :	Composante fluctuante de la pression (URANS) (Pa)
P :	Composante moyenne de la pression (URANS) (Pa)
P^* :	Composante instantanée de la pression (URANS) (Pa)
u :	Echelle de vitesse ($m.s^{-1}$)
u_i :	Composante fluctuante de la vitesse (URANS) ($m.s^{-1}$)
U_i :	Composante moyenne de la vitesse (URANS) ($m.s^{-1}$)
U_i^* :	Composante instantanée de la vitesse (URANS) ($m.s^{-1}$)
r^2 :	Coefficient de corrélation (-)
T^* :	Taille des mailles dans le corps du domaine de simulation (m)
δ_{ij} :	Tenseur identité (symbole de Kronecker)
Δ :	Taille caractéristique du filtre (LES) (m)
Δt :	Pas de discrétisation temporelle (s)
$\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$:	Pas de discrétisation spatial (LES) (m)
κ_c :	Nombre d'onde de coupure (m^{-1})
ν_t :	Viscosité turbulente ($m^2.s^{-1}$)
σ_m :	Ecart-type relatif entre les courbes des simulations et les courbes expérimentales (%)

INTRODUCTION

Le réseau hydrographique français compte un grand nombre de barrages et de seuils (près de 70 000), utilisés pour permettre l'irrigation, faciliter la navigation ou bien produire de l'énergie. Ces obstacles constituent des barrières physiques qui peuvent retarder la migration des poissons voire entraîner la suppression partielle ou totale de l'accès aux frayères pouvant conduire à la diminution et parfois à la disparition complète des espèces. La migration piscicole est caractérisée par le déplacement périodique d'une espèce de poisson au cours de son cycle biologique. La plupart des espèces de poissons, qu'elles soient marines ou de rivière, effectue des migrations plus ou moins longues, pour rejoindre des zones de reproduction adéquates, trouver des zones de croissance ou fuir de mauvaises conditions d'habitats. Les poissons peuvent également effectuer des mouvements périodiques journaliers entre les habitats de nutrition et de repos. L'étude des caractéristiques de ces déplacements permet de classer les espèces dans deux catégories : les espèces dites holobiotiques, qui effectuent l'ensemble de leur cycle de vie en eau douce et les espèces dites amphihalines qui effectuent leur croissance dans des milieux de salinités différentes. Parmi les espèces amphihalines, il existe les espèces thalassotoques dont la phase de croissance s'effectue en eau douce et la phase de reproduction en mer comme l'anguille et les espèces potamotoques, comme le saumon ou la truite de mer, qui à l'inverse grandissent en mer et se reproduisent en eau douce. Pour ces espèces, la restauration de la libre circulation sur l'ensemble du réseau hydrographique est donc un enjeu vital. Pour répondre à cette problématique, un cadre législatif a été élaboré, notamment avec la Directive Cadre Européenne (DCE) sur l'eau et les milieux aquatiques adoptée en octobre 2000 et transposée au droit français en décembre 2006 avec la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA). La DCE vise à donner une cohérence législative entre les pays d'Europe dans le domaine de l'eau. Celle-ci avait pour objectif la préservation et la restauration de l'état des eaux douces, côtières et souterraines ainsi que la restauration de la continuité écologique des cours d'eau.

Dans l'objectif de rétablir la continuité écologique et permettre aux espèces piscicoles de franchir les structures qui font obstacle à leur migration, des dispositifs de franchissement sont construits sur les cours d'eau. L'aménagement de ces dispositifs permet aux poissons migrateurs de passer un obstacle qui empêche leur libre circulation entre les biefs amont et aval d'un cours d'eau obstrué. Leur rôle est dans un premier temps d'attirer les poissons migrateurs en un point de la rivière situé à l'aval de l'obstacle puis de les inciter à passer en amont passivement par déversement (systèmes de transport et de capture, ascenseurs et écluses) ou activement par la nage, via un canal ou un chenal (passes naturelles, passes à bassins successifs...).

Lors de la conception d'une passe à poissons, il est primordial de prendre en compte la capacité de nage des espèces à faire franchir (espèces cibles). La capacité de nage est définie en termes de vitesse de nage et d'endurance, elle augmente en fonction de la longueur du poisson mais également de la température de l'eau. Ainsi, de nombreuses études expérimentales ont permis de mettre au point des formules empiriques et des abaques permettant de prédire les capacités de nage des poissons en fonction de leur taille et de la température de l'eau. Il est alors essentiel que la vitesse de l'écoulement, générée dans le dispositif de franchissement, soit adaptée à l'espèce cible dont la capacité de nage est la plus faible. Les différents programmes de protection et de restauration qui ont été conduits depuis une vingtaine d'années se sont focalisés sur les espèces considérées comme migratrices dans le Code de l'Environnement. Les dispositifs de franchissement construits dans le cadre de ces programmes étaient alors très sélectifs, dimensionnés pour un nombre restreint d'espèces cibles comme le saumon, la truite de mer ou l'aloise, espèces dotées d'une capacité de nage importante. Parmi ces dispositifs, la passe à poissons à bassins successifs est un type de passe très répandu en France qui est composé d'une

série de bassins permettant de diviser la hauteur de chute à franchir en plusieurs petites chutes, afin de relier la partie du cours d'eau en aval de l'obstacle à sa partie située en amont. Chaque bassin est délimité par une cloison munie d'une ouverture permettant de faire transiter le débit de la passe. Cette ouverture peut prendre différentes formes et différentes positions (échancrures, orifices, fentes) créant ainsi des conditions d'écoulement particulières (jets plongeant, jet de surface) (Larinier et al., 1998). Parmi les passes à bassins, la passe à poissons à fentes verticales est l'une des plus couramment utilisées. Conçue initialement pour les grands migrateurs, elle est toutefois l'une des moins sélectives et est particulièrement adaptée à l'ichtyofaune française. Elle est également peu sensible aux variations du niveau d'eau en amont et en aval de l'ouvrage, lui permettant ainsi d'être fonctionnelle pour une large gamme de débit. La restauration de la connectivité biologique doit donc passer, notamment, par l'adaptation de ce type de dispositif aux petites espèces dont les capacités de nage sont limitées. À cette fin, les nombreuses études qui ont été menées ces dernières années, ont permis de caractériser l'écoulement qui se développe dans les passes à poissons à fentes verticales en fonction des caractéristiques géométriques principales de ces dernières et de mieux comprendre l'effet des grandeurs moyennes et turbulentes de l'écoulement sur le comportement des poissons. Pour modifier les caractéristiques de l'écoulement et l'adapter au franchissement des petites espèces, des solutions ont été proposées et étudiées, notamment l'insertion de cylindres dans les bassins. Cependant, l'effet de certains éléments couramment introduits dans ces passes, comme les seuils et les macro-rugosités, n'a que très peu été étudié. Les seuils obstruent une partie des fentes entre les bassins et sont essentiellement utilisés pour limiter le débit qui transite dans le dispositif ou encore pour équilibrer les hauteurs d'eau dans les bassins. Les macro-rugosités sont la plupart du temps des blocs rocheux ou des plots cylindriques coulés dans le béton et disposés sur le radier. Elles sont utilisées pour créer des conditions d'écoulement plus favorables pour les espèces de fond (espèces benthiques) et leur constituer des abris hydrauliques. Actuellement la présence des seuils et des macro-rugosités n'est pas prise en compte lors du dimensionnement, ce qui entraîne parfois l'obligation d'effectuer des modifications coûteuses pour atteindre les conditions hydrauliques désirées qui conditionnent le fonctionnement biologique du dispositif.

L'Institut P' de l'Université de Poitiers possède depuis plusieurs années un modèle réduit de passe à poissons à fentes verticales, dont la géométrie et les conditions hydrauliques de fonctionnement sont modulables. Ce modèle permet d'effectuer des mesures hydrauliques et hydrodynamiques de l'écoulement mais également de réaliser des validations biologiques avec des poissons ce qui le rend particulièrement intéressant pour répondre à la problématique exposée.

Dans ce contexte, les quatre principaux objectifs de ce travail de recherche, financé par l'Organisme National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) et Voies Navigables de France (VNF), sont de :

- Comprendre et caractériser les conditions hydrauliques et hydrodynamiques (topologie, cinématique) de l'écoulement turbulent dans une passe à poissons à fentes verticales en présence de seuils dans les fentes et de macro-rugosités.
- Proposer une méthode empirique qui prend en compte les modifications induites par la présence des seuils et des macro-rugosités sur la relation hauteur/débit pour améliorer le dimensionnement des passes à poissons à fentes verticales.
- Proposer une solution technique qui permette, par l'insertion de structures flexibles, d'adapter les conditions d'écoulement dans les passes à poissons à fentes verticales au franchissement des petites espèces de poissons et caractériser cet écoulement.
- Caractériser l'influence des seuils, des macro-rugosités et des structures flexibles sur le comportement des poissons dans une passe à poissons à fentes verticales et sur l'efficacité du dispositif.

Le premier chapitre propose une étude bibliographique liée au travail qui a été mené. La première partie de ce chapitre dresse un état de l'art dans le domaine de la recherche sur les passes à poissons à fentes verticales. Dans un premier temps, les principaux travaux qui ont proposé une caractérisation du comportement hydraulique de ce type de passes sont exposés. Dans un second temps, les études expérimentales et numériques sur l'effet des caractéristiques géométriques et hydrauliques des passes à poissons à fentes verticales sur la turbulence à l'intérieur des bassins, la structure de l'écoulement et sur le comportement des poissons sont présentées. Enfin, les différentes solutions qui ont été étudiées ces dernières années pour adapter l'écoulement au franchissement des petites espèces sont détaillées. La seconde partie de ce chapitre est consacrée à la caractérisation fondamentale de l'écoulement généré par la présence d'obstacles en canal. En particulier, il est proposé une synthèse des travaux liés à l'analyse de l'écoulement autour des obstacles insérés dans la passe à poissons à fentes verticales au cours de cette thèse : les seuils, les macro-rugosités immergées et les structures souples. Les méthodes employées pour décrire certains de ces écoulements sont également exposées.

Le second chapitre présente les moyens expérimentaux ainsi que les outils d'analyse utilisés dans ce travail de recherche. Dans un premier temps, le dispositif expérimental et les configurations étudiées sont décrits. Une présentation des techniques de mesures (sondes acoustiques de mesure de niveau, Vélocimètre Acoustique à effet Doppler) utilisées pour déterminer les caractéristiques hydrauliques et hydrodynamiques de l'écoulement dans une passe à poissons à fentes verticales est ensuite proposée. Les méthodes développées pour traiter les données et pour évaluer les incertitudes de mesures sont également détaillées. Enfin, les modifications apportées au dispositif expérimental pour réaliser les tests biologiques sont décrites, ainsi que les conditions d'expérimentation, les configurations étudiées et le protocole d'exploitation des résultats.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des moyens numériques utilisés pour l'étude. Dans un premier temps, une description des différentes méthodes de modélisation (Reynolds-Average Navier-Stokes et Large-Eddy Simulation) de l'écoulement turbulent est proposée puis le principe de la modélisation de l'interaction fluide-structure est expliqué. Les différentes configurations géométriques de la passe à poissons au sein de laquelle l'écoulement tridimensionnel instationnaire à surface libre est étudié sont ensuite exposées. Enfin, les caractéristiques des simulations numériques (maillage, pas de temps...) sont détaillées et une validation par confrontation aux résultats expérimentaux est proposée.

Les quatrième, cinquième et sixième chapitres sont consacrés à l'étude de l'influence de l'ajout d'obstacles sur l'écoulement dans une passe à poissons à fentes verticales. Le quatrième chapitre présente l'étude de l'influence de l'insertion de seuils aux pieds des fentes des passes à poissons à fentes verticales et le cinquième l'étude des macro-rugosités. Le sixième chapitre est consacré à l'étude d'une solution pour favoriser le franchissement des petites espèces : l'ajout des structures flexibles dans l'écoulement. Chacun de ces trois chapitres propose une caractérisation hydraulique et hydrodynamique de l'écoulement ainsi qu'une analyse du comportement de plusieurs espèces de poissons. Les effets de la hauteur des seuils, de la densité de macro-rugosités et de la présence des structures souples sur la topologie de l'écoulement et sur un des principaux paramètres de dimensionnement des passes à poissons sont évalués pour différentes configurations géométriques de bassins et dans des conditions hydrauliques variables. Des mesures tridimensionnelles de vitesses ont été effectuées dans un des bassins du modèle réduit de la passe à poissons à fentes verticales du laboratoire. Elles permettent de souligner l'influence des caractéristiques géométriques de chacun des obstacles sur les grandeurs cinématiques moyennes et turbulentes de l'écoulement. Les résultats des simulations numériques (tridimensionnelles instationnaires à surface libre) de l'écoulement dans chacune des configurations apportent des informations supplémentaires sur le caractère instationnaire de l'écoulement. Les simulations de l'écoulement dans une passe à poissons munies de seuils ou de macro-rugosités permettent d'étudier finement la topologie de l'écoulement de manière volumique dans tous les bassins et d'étudier les grandeurs caractéristiques de la turbulence. Elles sont également utilisées pour définir les zones les plus favorables pour les poissons, sur la base

de critères considérés comme étant pénalisant pour leur progression dans les bassins. Les emplacements de ces zones sont comparés à ceux des zones de repos identifiées suite aux expérimentations avec les poissons. Ces comparaisons permettent une évaluation de la validité et de l'intérêt de ces critères. L'interaction entre l'écoulement instationnaire et tridimensionnel qui existe au sein de la passe à poissons à fentes verticales et des structures flexibles insérées dans les bassins est ensuite étudiée grâce à la modélisation numérique. Enfin, les tests biologiques réalisés avec différentes espèces de poissons donnent une évaluation de l'influence de la présence des seuils, des macro-rugosités et des structures souples sur le comportement des poissons et sur l'efficacité du dispositif de franchissement.

L'influence des seuils et des macro-rugosités sur les caractéristiques hydrauliques des passes à poissons à fentes verticales ayant été mise en évidence et quantifiée, le septième et dernier chapitre propose une méthode permettant de prendre en compte la présence de chacun de ces deux éléments mais également les caractéristiques géométriques du dispositif afin d'améliorer le dimensionnement de ce type de passe à poissons. Dans un premier temps, la démarche classique de dimensionnement est rappelée. La nouvelle méthode, développée à partir des données expérimentales collectées au cours de ce travail de thèse, est ensuite expliquée puis détaillée. Enfin, une évaluation de la précision des résultats obtenus est effectuée et l'intérêt de la démarche est justifié par une comparaison avec les résultats issus de la littérature.

Une synthèse de ce manuscrit de thèse est finalement présentée avant de conclure sur les perspectives que ce travail de recherche laisse envisager.

Chapitre 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Sommaire

I.	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
I.1	Les passes à poissons à fentes verticales.....	6
I.1.1	Comportement hydraulique.....	6
I.1.2	L'écoulement dans les passes à poissons à fentes verticales.....	12
I.1.2.a	<i>Etude de la topologie de l'écoulement.....</i>	<i>12</i>
I.1.2.b	<i>Etude des grandeurs cinématiques de l'écoulement et de leur influence sur les poissons.....</i>	<i>15</i>
I.1.2.c	<i>Insertion d'obstacles dans les passes à poissons à fentes verticales.....</i>	<i>26</i>
I.2	L'écoulement au-dessus d'obstacles en canal.....	33
I.2.1	Écoulement au-dessus d'un seuil rectangulaire.....	33
I.2.2	Écoulement de parois et de canopée.....	37
I.2.2.a	<i>Les écoulements sur parois lisses.....</i>	<i>37</i>
I.2.2.b	<i>Les écoulements sur canopée rigide.....</i>	<i>39</i>
I.2.2.c	<i>Les écoulements sur canopée flexible.....</i>	<i>42</i>
I.3	Conclusion.....	45

Les nombreux ouvrages hydrauliques qui jalonnent les cours d'eau en France, tels que les barrages hydroélectriques ou les seuils, constituent le plus souvent des barrières à la migration des poissons, en particulier pour les plus petites espèces. Les passes à poissons ont été développées pour permettre le franchissement de ces obstacles et faciliter la circulation des poissons dans les cours d'eau. Il existe plusieurs types de passes à poissons, notamment des passes à bassins successifs, des passes à ralentisseurs, des ascenseurs, ou encore des passes à enrochement. Ce chapitre bibliographique présente dans un premier temps les principaux travaux effectués durant ces trente dernières années et ayant permis de caractériser et de mieux comprendre l'écoulement existant dans le type de passe étudié au cours de cette thèse : les passes à bassins successifs à fentes verticales. L'objectif de cette thèse est d'étudier l'écoulement dans une passe à poissons à fentes verticales en présence d'obstacles. Ainsi, pour fournir les bases nécessaires à la compréhension et à l'explication des phénomènes observés, une revue des travaux majeurs qui ont été menés en canal sur des écoulements en présence d'obstacles (seuils, macro-rugosités et structures flexibles) est ensuite proposée.

I.1 Les passes à poissons à fentes verticales

I.1.1 Comportement hydraulique

De nombreuses études ont été réalisées depuis les années 1980 pour qualifier le fonctionnement hydraulique des passes à poissons à fentes verticales. Une rapide synthèse des principaux travaux effectués est présentée ici. Pour une revue bibliographique plus exhaustive, le lecteur est invité à consulter la thèse de [Tarrade \(2007\)](#).

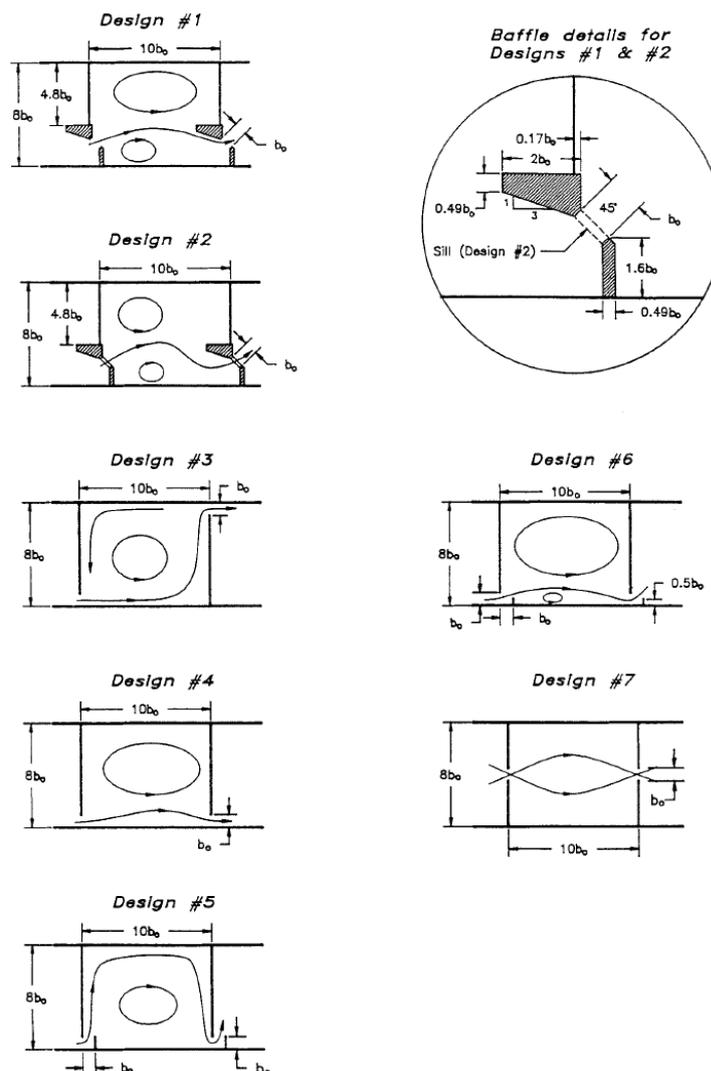


Figure I-1. Géométries des bassins étudiés (designs 1 à 7), avec b_0 la largeur de fente ([Rajaratnam et al., 1986](#)).

La première étude significative a été publiée par une équipe de l'Université d'Alberta au Canada (Rajaratnam *et al.*, 1986). Elle porte sur l'étude de sept géométries différentes de passes à fentes verticales réalisées sur des modèles dont l'échelle variait de 1/5,33 à 1/18 et le nombre de bassins de 4 à 18. Pour ces sept géométries, la largeur des fentes b à l'échelle 1 est de 0,305 m, la longueur L des bassins est de 3,05 m ($L/b=10$) et la largeur B est de 2,44 m ($B/b=8$). Les géométries (design) sont numérotées de 1 à 7 et diffèrent par la forme et la position de la fente et par la forme des déflecteurs (Figure I-1).

Le design 1 est composé de deux déflecteurs décalés dont les faces en regard délimitent la largeur de la fente et forment un angle de 45° par rapport au sens de l'écoulement. Le plus grand déflecteur a une forme rectangulaire et possède une face biseautée pour diriger l'écoulement vers la fente. Le design 2 est identique au design 1, à ceci près que des seuils rectangulaires sont disposés aux pieds des fentes. Les designs 3, 4, 5 et 6 correspondent à des géométries simplifiées de passe à poissons à fentes verticales et le design 7 possède des fentes au milieu des bassins.

Rajaratnam *et al.* (1986) ont fait varier la pente de 5% à 15%, les parois de leur modèle étant parfaitement verticales pour une pente de 10%. Des mesures de vitesses, avec un tube de Prandtl, leur ont permis de montrer que le niveau d'eau à l'aval de la passe a une influence significative sur les profils de vitesses dans les fentes et dans le jet. Des mesures de hauteurs d'eau ont également été effectuées à l'aide de réglets fixés sur les déflecteurs au niveau de l'axe central des bassins. Ces mesures ont été réalisées avec un écoulement uniforme pour lequel les hauteurs d'eau et les hauteurs de chutes sont égales dans chacun des bassins. Sous l'hypothèse de cette condition « idéale » d'écoulement Rajaratnam *et al.* (1986) ont défini un débit adimensionnel Q^* (eq.I-1). La particularité de Q^* réside dans le fait qu'il est proportionnel à la hauteur d'eau relative au milieu des bassins Z_0/b , avec Z_0 la hauteur d'eau à mi-bassin (m) et b la largeur de fente (m).

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot s \cdot b^5}} = c \cdot \frac{Z_0}{b} + d \quad (\text{eq.I-1})$$

avec Q le débit de la passe à poissons ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), g l'accélération de la pesanteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), s la pente de la passe à poissons (-), c et d les coefficients de la fonction linéaire (-).

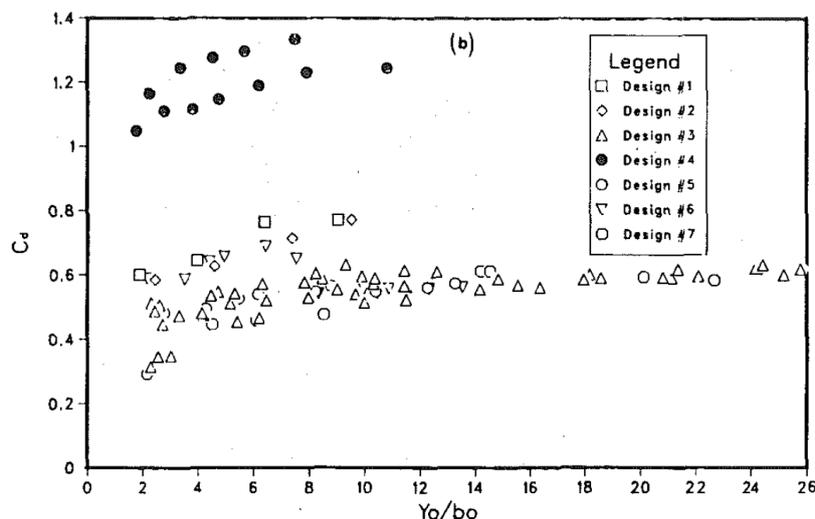


Figure I-2. Coefficients de débit (C_d) obtenus pour différents designs de bassin et différentes hauteurs d'eau relatives (y_0/b_0) avec b_0 la largeur de fente (Rajaratnam *et al.*, 1986).

Ils ont ensuite déterminé ces coefficients pour chaque design et ont notamment montré qu'ils étaient relativement proches entre les designs 1 ($c=3,77$; $d=-1,11$) et 2 ($c=3,75$; $d=-3,52$).

Rajaratnam *et al.* (1986) ont également calculé le coefficient de débit, initialement proposé par Clay, (1961) (eq.I-2) :

$$C_d = \frac{Q}{b \left(Z_0 + \frac{\Delta h}{2} - h_s \right) \sqrt{2g\Delta h}} \quad (\text{eq.I-2})$$

avec Q le débit de la passe à poissons ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), b la largeur de fente (m), Z_0 la hauteur d'eau à mi-bassin (m), Δh la hauteur de chute entre les bassins (m), h_s la hauteur du seuil (obstacle positionné aux pieds des fentes) (m), g l'accélération de la pesanteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Le coefficient de débit C_d est tracé en fonction de la hauteur d'eau à mi-bassin (défini par Y_0/b_0 par Rajaratnam *et al.* (1986)) sur la figure I-2. Le C_d varie de 0,3 à 0,8 pour tous les designs sauf le 4 pour lequel le jet passe directement d'une fente à l'autre (court-circuit) et dont les valeurs sont supérieures à 1. Pour les designs 1, 2 et 6, le C_d varie de 0,6 à 0,8.

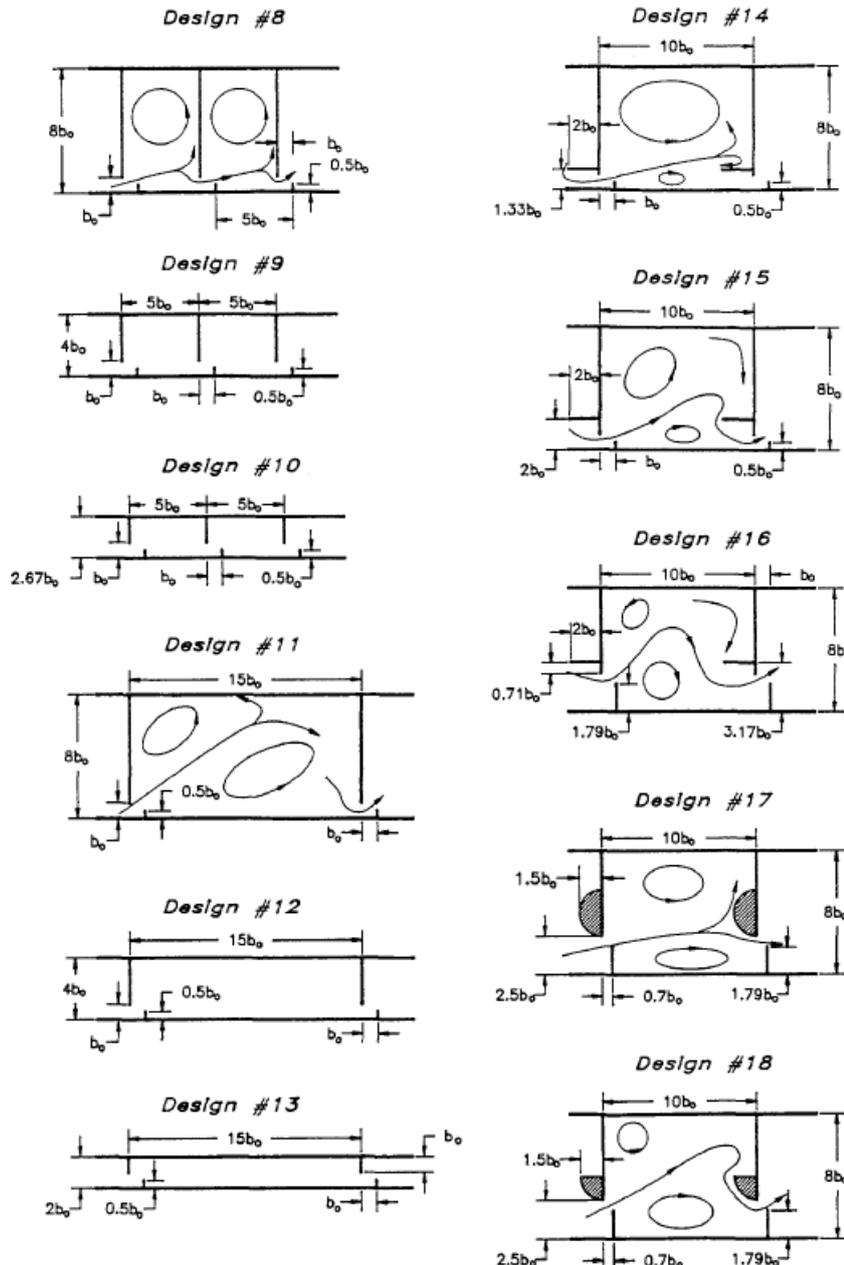


Figure I-3. Géométries des bassins étudiées (designs 8 à 18), avec b_0 la largeur de fente (Rajaratnam *et al.*, 1992).

Rajaratnam *et al.* (1992) ont poursuivi leurs investigations sur les performances hydrauliques des passes à fentes verticales, notamment en étudiant l'influence de la largeur et de la longueur des bassins sur les hauteurs d'eau (Z_0/b), les débits adimensionnés Q^* et les coefficients de débit C_d (Rajaratnam *et al.*, 1992). Ils ont défini 11 nouveaux designs (Figure I-3). Les designs 8 à 13 ont des parois décalées et présentent des dimensions de bassins dont la largeur (B) a varié de $B=2b$ à $B=8b$ pour deux longueurs de bassin $L=5b$ et $L=15b$. Les designs 14 à 16 se différencient par la

position du déflecteur (de forme simple) sur la plus grande paroi. Les deux derniers designs (17 et 18) ont des déflecteurs de formes plus complexes.

Une équipe Finlandaise a également travaillé sur plusieurs types de passes à poissons et s'est appuyée sur les travaux de Rajaratnam *et al.* (1992) pour proposer une nouvelle manière d'adimensionner le débit qui prend en compte la longueur L des bassins. La nouvelle formulation de ce débit adimensionné leur a permis d'obtenir une régression en puissance en fonction de Z_0/L qui est commune à tous les modèles de passes à poissons (Kamula, 2001) (eq.I-3).

$$Q^{**} = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot s \cdot b^2 \cdot L^3}} = 0,84 \cdot \left(\frac{Z_0}{L}\right)^{0,89} \quad (\text{eq.I-3})$$

Un débit adimensionné Q^A , proposé par une équipe espagnole (Puertas *et al.*, 2004) de l'Université de la Corogne, permet d'évaluer les performances des passes à fentes verticales quelle que soit la pente (eq.I-4).

$$Q^A = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot b^5}} \quad (\text{eq.I-4})$$

Puertas *et al.* (2004) se sont focalisés sur les designs 6 et 16 de Rajaratnam *et al.* (1992) et ont confirmé la relation linéaire entre Q^* et Z_0/b .

À partir de cet état de l'art sur l'étude des relations existantes entre le débit et la hauteur d'eau à mi-bassin, Tarrade (2007) a proposé un nouvel adimensionnement ($Q^{*'}$) faisant intervenir le coefficient de débit. Pour cela, il s'est basé sur les mesures de hauteur d'eau qu'il a effectuées avec des réglés positionnés sur l'axe central des bassins du modèle de passe à poissons à fentes verticales (échelle 1/4) de l'Institut P' (Université de Poitiers – CNRS). Il a ainsi calculé les coefficients de débit pour différentes configurations, en faisant varier la pente ($s=5, 10$ et 15%), la largeur des bassins ($B/b=5,67 ; 6,67 ; 7,67$ et 9) et le débit ($Q^A=3,8 ; 4,8$ et $5,6$).

Pour obtenir $Q^{*'}$, il a divisé le débit Q par la vitesse maximale théorique définie par $V_d = \sqrt{2gLs}$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et par le carré de la largeur de fente b^2 (m^2) (eq.I-5). En remarquant que le coefficient de débit augmentait quand la largeur des bassins diminuait, il a établi une relation non linéaire entre $Q^{*'}$ et Z_0/b en faisant intervenir B/b :

$$Q^{*' } = \frac{Q}{V_d \cdot b^2} = 1,245 \cdot \left(\frac{B}{b}\right)^{-0,178} \cdot \frac{Z_0}{b} \quad (\text{eq.I-5})$$

Bermúdez *et al.* (2010) se sont intéressés aux coefficients de débit dans des bassins de longueurs et largeurs différentes d'une passe à poissons à fentes verticales sans déflecteur central (Figure I-4). Les auteurs ont effectué des mesures dans un canal expérimental en acier inoxydable de 7 m de long, 0,3 m de large et 0,35 m de haut et incliné avec une pente $s=5\%$. Des parois amovibles leur ont permis de faire varier la largeur de la fente ainsi que la longueur des bassins, leur permettant de créer ainsi 16 géométries différentes (Figure I-5).

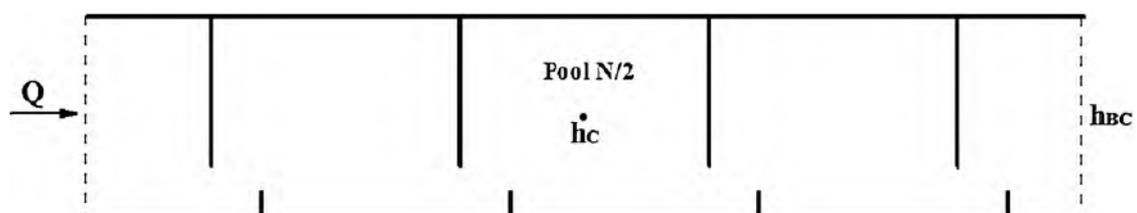


Figure I-4. Vue globale de la géométrie des bassins (Bermúdez *et al.*, 2010).

Bermúdez *et al.* (2010) ont mesuré les hauteurs au milieu de chaque bassin avec des sondes de hauteur DHI 202 et la topologie de l'écoulement à partir de l'observation de traceurs via une acquisition vidéo.

Width B	Length L			
	$2.5b$	$5b$	$10b$	$15b$
$2b$	D2.2.5 $b=0.150$ $N=10$	D2.5 $b=0.150$ $N=9$	D2.10 $b=0.150$ $N=4$	D2.15 $b=0.150$ $N=3$
$2.67b$	D2.67.2.5 $b=0.113$ $N=10$	D2.67.5 $b=0.113$ $N=10$	D2.67.10 $b=0.113$ $N=6$	D2.67.15 $b=0.113$ $N=4$
$4b$	D4.2.5 $b=0.075$ $N=10$	D4.5 $b=0.075$ $N=10$	D4.10 $b=0.075$ $N=9$	D4.15 $b=0.075$ $N=6$
$8b$	D8.2.5 $b=0.038$ $N=10$	D8.5 $b=0.038$ $N=10$	D8.10 $b=0.038$ $N=10$	D8.15 $b=0.038$ $N=10$

Figure I-5. Dimensions géométriques des bassins testés, avec b la largeur de la fente, B et L respectivement la largeur et la longueur d'un bassin et N le nombre de bassins (Bermúdez *et al.*, 2010).

À partir des mesures de hauteurs d'eau expérimentales et numériques, les auteurs ont montré que la longueur des bassins était le facteur qui influençait le plus le coefficient de débit, par rapport à la largeur de la fente et la largeur des bassins (Figure I-6). Une comparaison des résultats numériques et expérimentaux leur a également permis de conclure que la simulation 2D « depth average » avec un modèle de turbulence k- ϵ était adaptée à la modélisation de l'écoulement dans ce type de passe à poissons.

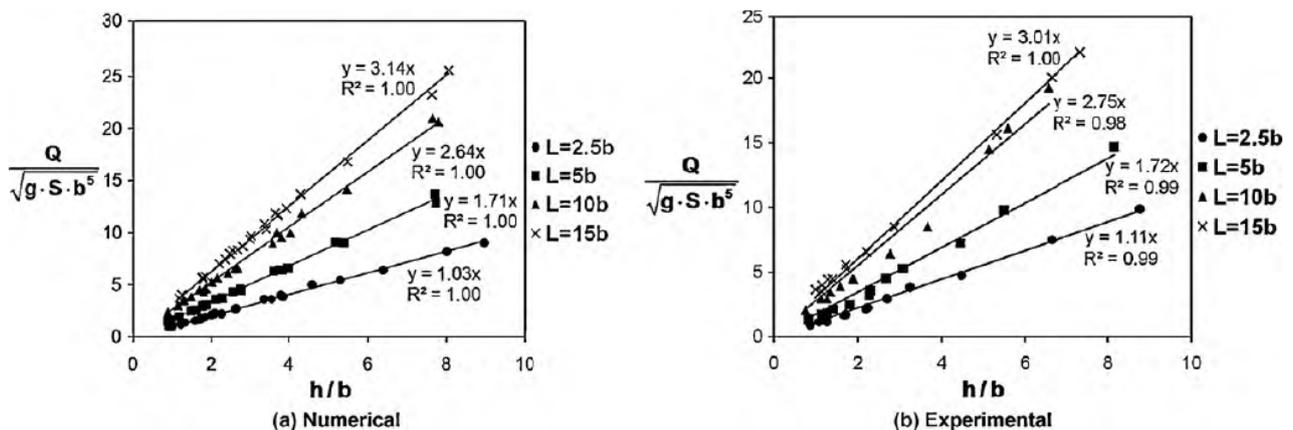


Figure I-6. Courbes de débit adimensionné en fonction des 16 géométries de bassins. Les résultats numériques incluent les pentes $s=5\%$ et 10% (Bermúdez *et al.*, 2010).

Plus récemment, une équipe espagnole de l'université de Valladolid a modélisé les performances des passes à poissons à fentes verticales sous des conditions d'écoulement uniforme et non-uniforme. Fuentes-Pérez *et al.* (2014) ont effectué des mesures de hauteurs d'eau dans les bassins de deux passes à poissons à fentes verticales (à l'échelle réelle) sujettes à des conditions hydrauliques différentes dans le but de valider leur modélisation. Ces passes sont situées en Espagne sur la Duero River. Ils ont étudié une succession de 27 fentes sur la première (VSF-1) et 12 sur la deuxième (VSF-2). La largeur de fente pour les deux passes est de $b=0,2$ m, la longueur moyenne des bassins est de $L=2,1$ m ($L/b \approx 10$) et la largeur $B=1,6$ m ($B/b=8$). La pente de VSF-1 est de $s=6,2\%$ et celle de VSF-2 de $8,2\%$. La mesure du débit a été effectuée par une technique de jaugeage par dilution de Rhodamine et celle des hauteurs d'eau à l'aide de jauges graduées, positionnées sur l'axe central des bassins. Les entrées de ces passes étant équipées de batardeaux (nécessaires pour leur maintenance), Fuentes-Pérez *et al.* (2014) les ont utilisés pour faire varier le débit et simuler différentes conditions hydrauliques.

Aucune des formules habituellement utilisées pour déterminer le débit transitant dans les passes à poissons ne prend en compte les variations du niveau de l'eau à l'aval de l'ouvrage. D'autre

part, certaines d'entre elles utilisent des coefficients dont la valeur dépend implicitement de la position relative des niveaux d'eau (amont et aval).

Fuentes-Pérez et al. (2014) ont proposé une méthode pour évaluer les coefficients des deux relations suivantes, souvent utilisées pour prédire le débit transitant dans les passes à poissons :

- la relation donnant le débit à travers un déversoir dénoyé (eq.I-6) :

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \xi \cdot b \cdot h_1^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad (\text{eq.I-6})$$

avec Q le débit ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), b la largeur de l'échancrure ou de la fente (m), h_1 le niveau d'eau amont (m), g l'accélération de la pesanteur et ξ un coefficient de débit.

- la relation donnant le débit à travers une fente verticale (eq.I-2) (*Clay, 1961; Larinier et al., 1998; Wang et al., 2010*) dans laquelle le coefficient de débit C_d dépend de la forme des déflecteurs et de la configuration de la passe à poissons.

Fuentes-Pérez et al. (2014) ont déterminé la valeur des coefficients ξ , C_d à partir de l'équation proposée par *Villemonte (1947)* donnant le coefficient de débit d'un déversoir en régime noyé par l'aval (eq.I-7) :

$$C = \alpha_0 \left[1 - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1,5} \right]^{\alpha_1} \quad (\text{eq.I-7})$$

avec Z_0 et Z respectivement les hauteurs d'eau amont et aval (m), α_0 et α_1 (-) les coefficients dépendant de la géométrie des bassins.

À partir des mesures de débits et de hauteurs issues de leur propres mesures et de celles issues de la littérature, ils ont pu déduire les coefficients ξ et C_d . Ils ont ensuite utilisé ces données pour déterminer les coefficients α_0 et α_1 de l'équation (eq.I-7) par la méthode des moindres carrés (Figure I-7).

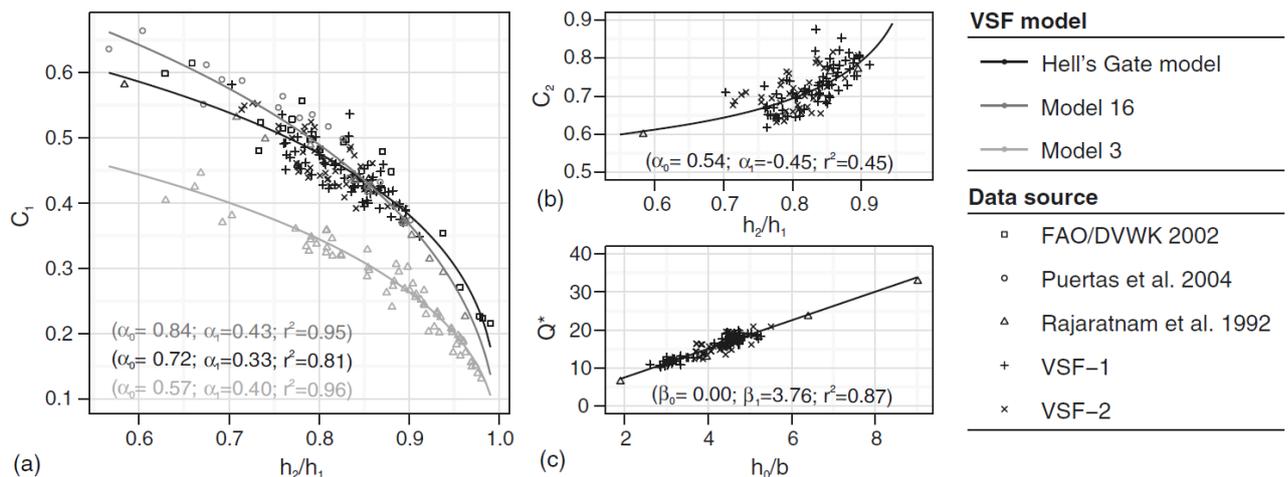


Figure I-7. Régressions de l'équation (eq.I-7) sur les coefficients des équations (eq.I-6) et (eq.I-2) et régression linéaire sur Q^* à partir de la Hell's Gate avec $h_1 = Z_0$, $h_2 = Z$, $C_1 = \xi$, $C_2 = C_d$ et $\beta_1 = c$: (a) régression sur ξ ; (b) régression sur C_d ; (c) régression sur Q^* (*Fuentes-Pérez et al., 2014*).

Ils ont développé un algorithme itératif qui leur a permis de simuler les lignes d'eau en prenant en compte les caractéristiques de chaque fente. *Fuentes-Pérez et al. (2014)* ont comparé les hauteurs dans chacun des bassins ainsi que les hauteurs de chute obtenues par les équations (eq.I-6) et (eq.I-2) ajustées avec le coefficient de débit C (eq.I-7), avec leurs mesures expérimentales (Figure I-8).

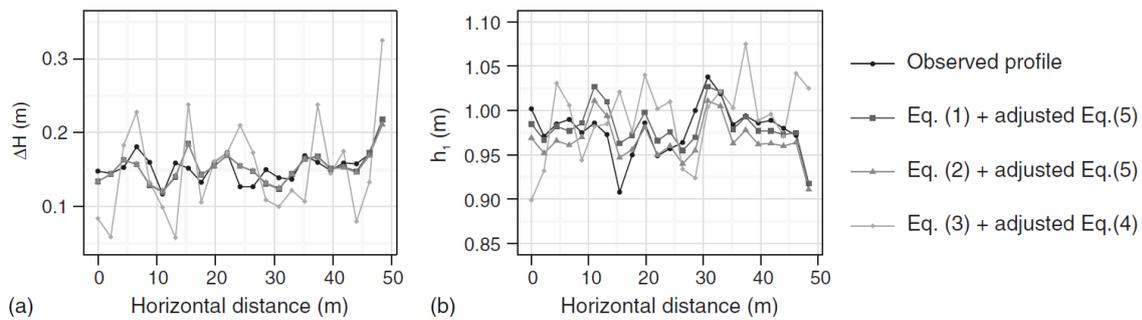


Figure I-8. Hauteurs de chute (a) et hauteurs d'eau à mi-bassin (b) observées expérimentalement et prédites par l'algorithme sur la passe VSF-1 (Fuentes-Pérez *et al.*, 2014).

I.1.2 L'écoulement dans les passes à poissons à fentes verticales

L'écoulement dans les passes à poissons à fentes verticales a été largement étudié expérimentalement au cours de ces dernières années (notamment Wu *et al.*, 1999 ; Puertas *et al.*, 2004 ; Liu *et al.*, 2006) et a fait l'objet de deux thèses soutenues au sein de l'Institut P' de l'université de Poitiers (Tarrade, 2007; Bourtal, 2012).

I.1.2.a Etude de la topologie de l'écoulement

Au cours de sa thèse, Tarrade (2007) a étudié l'écoulement instationnaire dans la passe à poissons à fentes verticales du laboratoire P'. Cette passe à poissons, utilisée également au cours de cette thèse, est un modèle réalisé à une échelle réduite respectant la similitude de Froude (échelle 1/4 par rapport aux dimensions moyennes des passes à fentes verticales présentes en France). Cette passe a été conçue de manière à permettre une certaine modularité : la largeur des bassins ainsi que la pente et le débit sont modifiables. Ainsi, l'auteur a réalisé une étude paramétrique au cours de laquelle il a caractérisé l'écoulement. Pour cela, il a effectué des mesures bidimensionnelles et tridimensionnelles de vitesses grâce respectivement à la Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) et à la Vélocimétrie Acoustique par effet Doppler (ADV).

Pour une pente et un débit fixés ($s=10\%$ et $Q=736 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ à l'échelle 1:1), Tarrade (2007) et Tarrade *et al.* (2008) mettent en évidence que la diminution de la largeur des bassins modifie la topologie de l'écoulement.

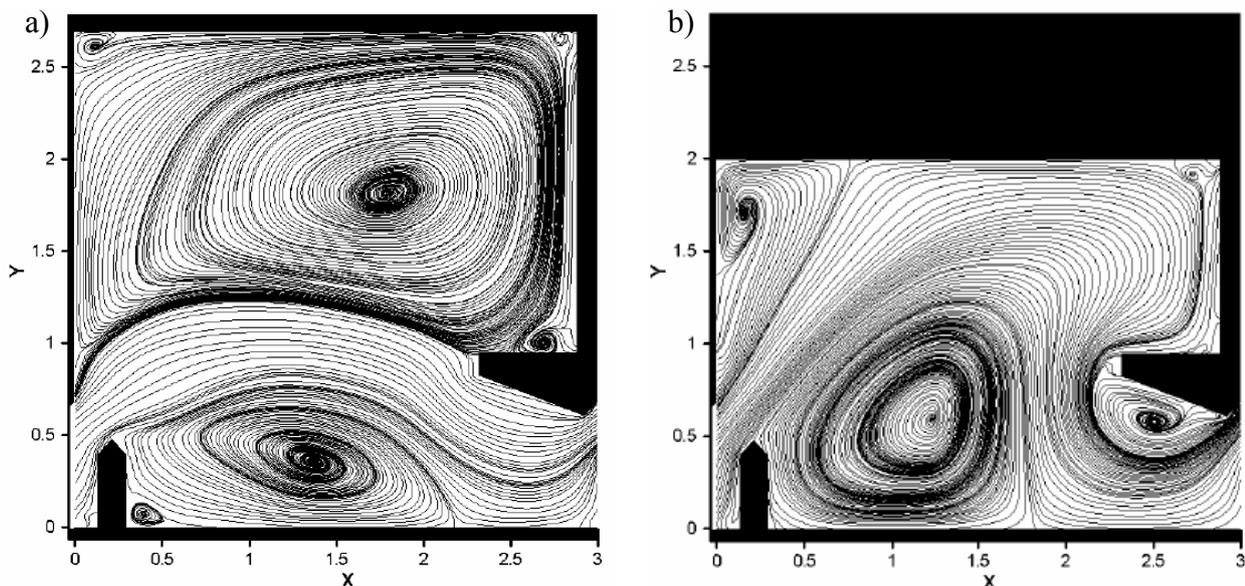


Figure I-9. Topologie d'écoulement en fonction de la largeur des bassins. (a) en grande largeur ($B/b=9$), topologie de type 1 ; (b) en petite largeur ($B/b=6,67$), topologie de type 2 (Tarrade, 2007).

Les lignes de courants issues du champ moyen de vitesse (PIV), leur ont permis de caractériser précisément ces modifications en donnant les positions des centres tourbillonnaires des zones de recirculations. Ainsi, ils montrent qu'en grande largeur ($B/b=9$) (Figure I-9 a), le jet traverse le bassin directement de la fente amont vers la fente aval, avec une trajectoire légèrement incurvée (appelée topologie de type 1 par [Wu et al. \(1999\)](#)). Cela crée deux zones de recirculation, une sur la gauche du jet (en regardant vers l'aval) appelée tourbillon supérieur, et une sur la droite, plus petite, appelée tourbillon inférieur. Le centre du tourbillon supérieur est situé en $X=1,8$ m et $Y=1,81$ m et celui du tourbillon inférieur en $X=1,37$ m et $Y=0,36$ m.

En diminuant la largeur des bassins à $B/b=6,67$ (Figure I-9 b), la trajectoire du jet change significativement. En sortant de la fente amont, le jet est dirigé vers la paroi latérale opposée qu'il va impacter. Il contourne ensuite le déflecteur central avec une trajectoire très incurvée et ressort du bassin par la fente aval. La taille du tourbillon supérieur est ainsi réduite et son centre se déplace en $X=0,15$ m et $Y=1,71$ m. En revanche le tourbillon inférieur occupe une place plus importante et son centre se déplace en $X=1,22$ m et $Y=0,59$ m. Les auteurs montrent qu'une réduction plus importante de la largeur des bassins ($B/b=5,67$) ne modifie pas significativement les caractéristiques topologiques de l'écoulement.

[Tarrade \(2007\)](#) s'est ensuite intéressé à l'influence de la pente sur la topologie de l'écoulement. Il a mis en évidence que pour les trois largeurs de bassins $B/b=5,67$; $6,67$ et 9 et pour un débit de $736 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, l'augmentation de la pente ne modifiait pas la structure globale de l'écoulement mais entraînait un élargissement du jet. Cependant, pour la largeur de bassin $B/b=7,67$ (Figure I-10), la topologie de l'écoulement change significativement entre $s=5\%$ et $s=15\%$. Elle passe d'un type 1 à un type 2, ce qui confirme les résultats de [Wu et al. \(1999\)](#).

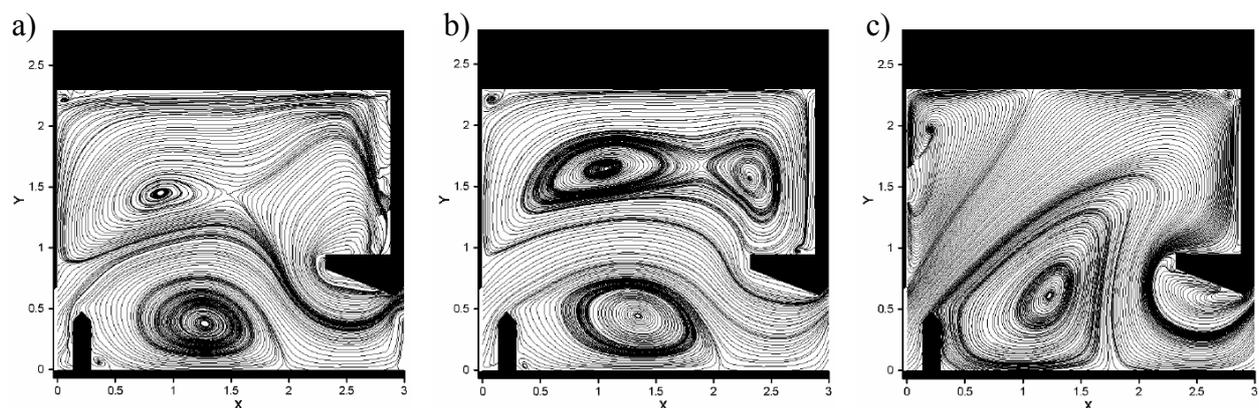


Figure I-10. Topologie d'écoulement en fonction de la pente pour $B/b=7,67$. (a) $s=5\%$; (b) $s=10\%$; (c) $s=15\%$ ([Tarrade, 2007](#)).

L'augmentation du débit n'influence pas de manière significative la topologie globale de l'écoulement, mais peut cependant entraîner des variations sur la forme et la position des zones de recirculations (ce qui confirme les observations de [Puertas et al. \(2004\)](#)). Enfin [Tarrade \(2007\)](#) a confirmé que l'écoulement dans une passe à poissons à fentes verticales était quasi-bidimensionnel en étudiant les caractéristiques topologiques sur des plans plus ou moins éloignés du radier.

[Wang et al. \(2010\)](#), également de l'Université de Poitiers, ont poursuivi l'étude de la topologie de l'écoulement à partir de mesures PIV et ADV, dans le même modèle de passe à poissons à fentes verticales que [Tarrade \(2007\)](#). Ils ont ainsi établi une cartographie de la topologie de l'écoulement en fonction de la largeur des bassins (B/b), de la pente (s) et du débit (Q) (Figure I-11).

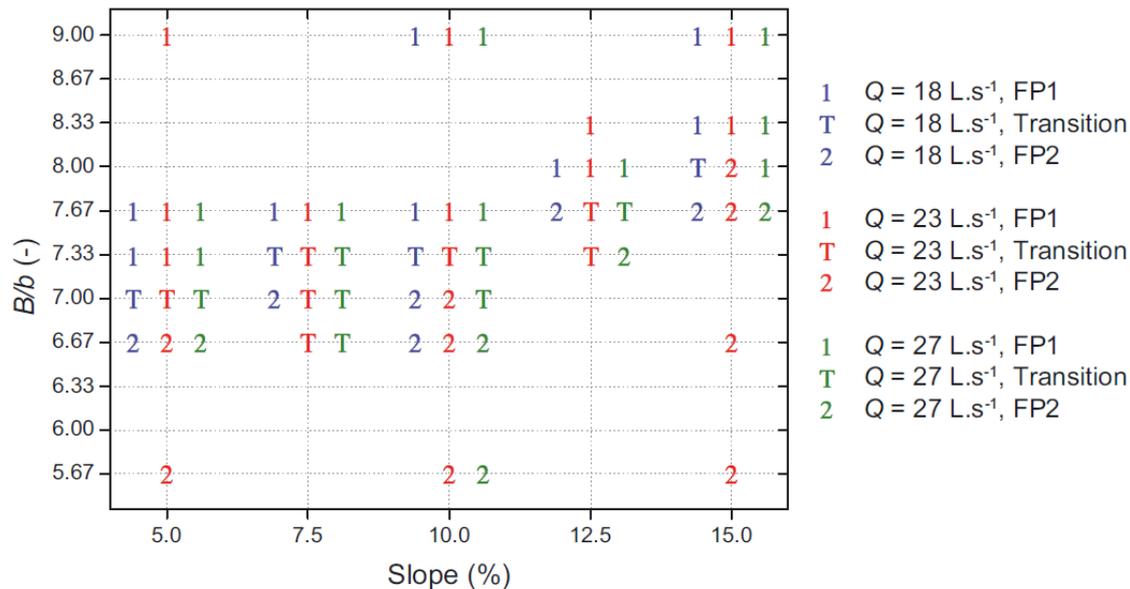


Figure I-11. Topologie d'écoulement pour différentes pentes (s), débits (Q) et largeurs (B/b) (Wang *et al.*, 2010).

Les auteurs définissent ainsi les largeurs de bassins pour lesquelles l'écoulement est de type 1, 2 ou transitoire (transition entre type 1 et type 2) en fonction de la pente et du débit, et montrent que l'augmentation de la pente décale l'apparition de la topologie de type 2 vers les plus grands B/b . Il est montré que le débit n'a pas une influence significative sur le changement de topologie.

Une étude paramétrique de la topologie de l'écoulement a également été réalisée à partir de simulations numériques 3D par Musall *et al.* (2014). Ils ont modélisé l'écoulement pour deux géométries de passes à poissons à fentes verticales : une identique à celle utilisée par Wang *et al.* (2010) et une identique à celle construite sur la Moselle à Coblenche en Allemagne en 2011. Ils ont fait varier la pente et la largeur des bassins, ont noté les topologies obtenues et les ont

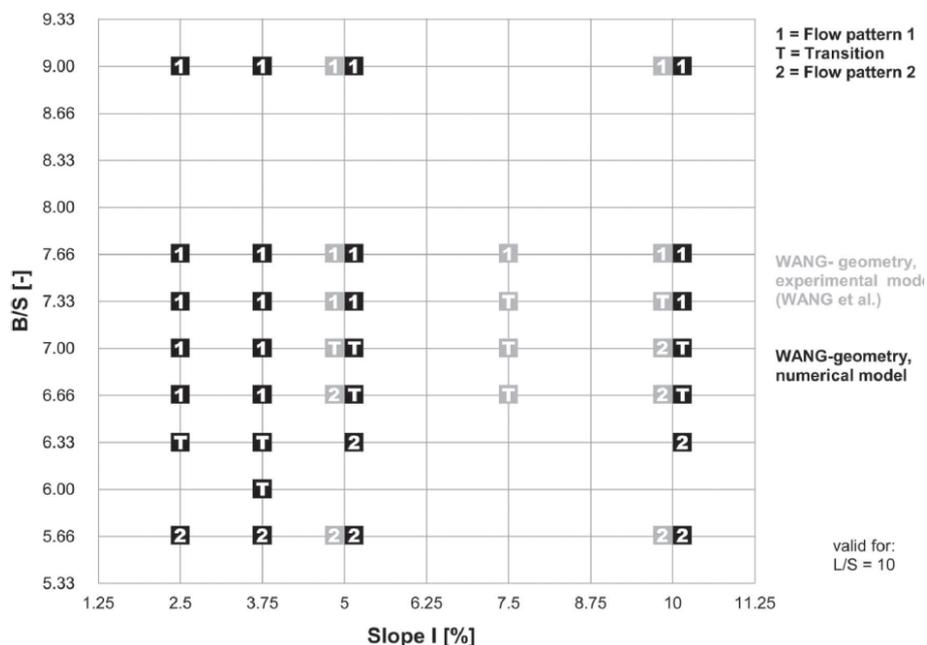


Figure I-12. Topologie d'écoulement pour différentes pentes (I), et largeurs (B/S) avec S la largeur de la fente (Musall *et al.*, 2014).

comparées à celles de Wang *et al.* (2010). Ils ont ainsi démontré que le modèle RANS utilisé dans leurs simulations permettait de prédire correctement la topologie. Ils se sont ensuite servis de la simulation numérique pour définir la topologie de l'écoulement pour des pentes plus faibles que celles étudiées par Wang *et al.* (2010) (Figure I-12). Les auteurs ont montré que la diminution de la pente repousse l'apparition de la topologie de type 2 vers des largeurs de bassins plus faibles, confirmant la tendance mise en avant par Wang *et al.* (2010).

Les auteurs ont également simulé différentes conditions de fonctionnement hydraulique en faisant varier le niveau d'eau aval de l'ouvrage modélisé. Ils n'ont constaté aucun changement significatif de la topologie de l'écoulement.

Bermúdez *et al.* (2010) se sont intéressés à la topologie de l'écoulement générée dans des bassins de longueur et largeur différentes d'une passe à poissons à fentes verticales sans déflecteur central (Figure I-4). À partir de mesures expérimentales et numériques, ils ont établi que la transition entre la topologie de type 1 et la topologie de type 2 avait lieu pour des ratios L/B compris entre 1,25 et 1,88 pour les deux pentes $s=5\%$ et 10% . La topologie de type 1 étant toujours observée pour $L/B < 1,25$ et celle de type 2 pour des valeurs supérieures à 1,88.

I.1.2.b Etude des grandeurs cinématiques de l'écoulement et de leur influence sur les poissons

Tarrade (2007) s'est intéressé aux grandeurs cinématiques de l'écoulement dans les passes à poissons à fentes verticales. L'auteur a effectué des mesures de champs de vitesses et d'énergie cinétique turbulente par PIV pour plusieurs configurations géométriques de passes à poissons. Il a montré que la largeur des bassins, ainsi que le débit, n'avaient pas d'influence sur les valeurs de la vitesse et de l'énergie cinétique turbulente mais que leur répartition dans les bassins pouvait différer de par les changements de topologie. En revanche, l'augmentation de la pente entraîne des vitesses et des fluctuations plus importantes, quelle que soit la largeur de bassin et surtout à proximité de la fente (Figures I-13 et I-14).

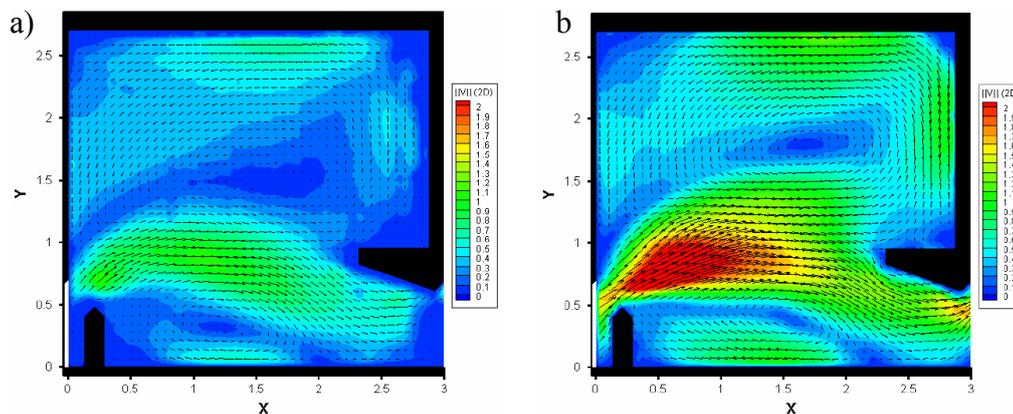


Figure I-13. Vitesse moyenne (m/s) à l'échelle 1:1, $B/b=9$, $Q^4=4,8$, $Z/b=2$: a) pente $s=5\%$; b) pente $s=15\%$ (Tarrade, 2007).

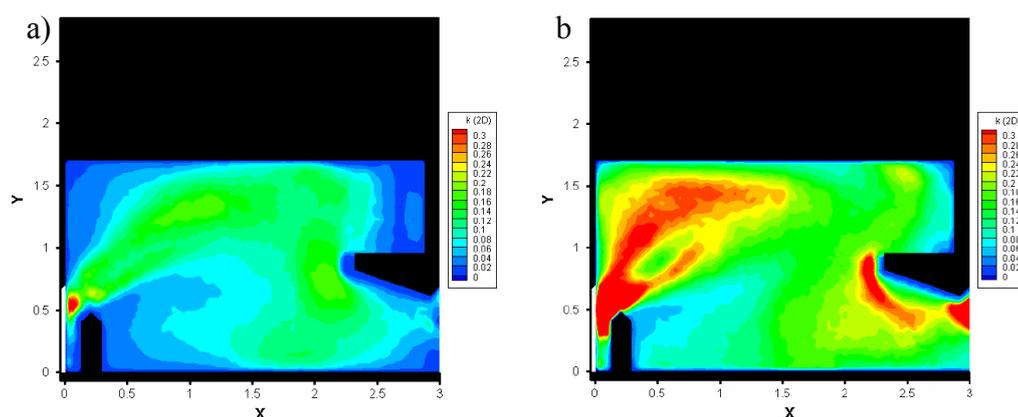


Figure I-14. Energie cinétique turbulente (m^2/s^2) à l'échelle 1:1, $B/b=5,67$, $Q^4=4,8$, $Z/b=2$: a) pente $s=5\%$; b) pente $s=15\%$ (Tarrade, 2007).

L'auteur a également montré que les vitesses mesurées sur des plans parallèles au radier à différentes altitudes étaient sensiblement équivalentes, confirmant l'aspect quasi-bidimensionnel de l'écoulement.

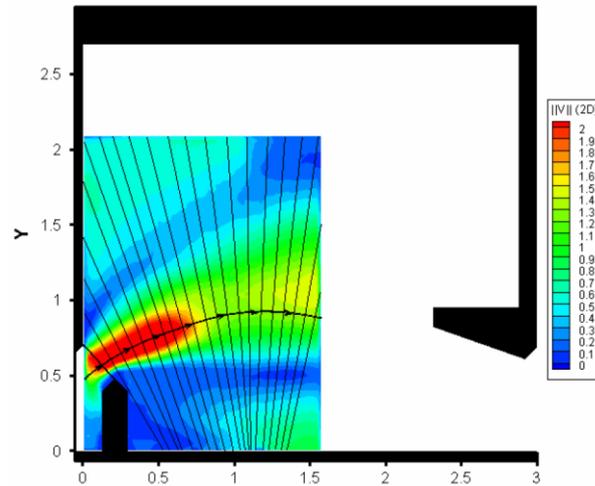


Figure I-15. Profils de vitesse moyenne en X_j (Tarrade, 2007).

Les caractéristiques du jet ont été étudiées par Liu *et al.* (2006) à l'aide d'une sonde ADV (pour des pentes $s=5,06\%$ et $10,52\%$) puis par Tarrade (2007) en PIV ($s=10\%$). Liu *et al.* (2006) ont effectué leur caractérisation sur une géométrie de bassin correspondant au design 18 de Rajaratnam *et al.* (1992), tandis que celle de Tarrade (2007) correspondait au design 1. Pour caractériser le jet, les auteurs ont tracé une ligne d'écoulement principal correspondant à la ligne centrale et directrice du jet. Ils ont ensuite défini un repère lié à cette ligne, dont l'origine se situe au milieu de la fente. L'abscisse X_j définit la distance le long de la ligne centrale du jet, tandis que Y_j correspond à la distance dans la direction transversale orthogonale à X_j (Figure I-15). Y_j est égal à 0 sur la ligne centrale.

Liu *et al.* (2006) et Tarrade (2007) ont remarqué des différences significatives entre le jet généré dans une passe à poissons à fentes verticales et un jet plan turbulent d'un écoulement développé décrit dans les travaux de Rajaratnam *et al.* (1976). Une des principales différences est que le jet qui sort de la fente subit une décroissance plus rapide (à partir de $X_j/b=0,875$ d'après Liu *et al.* (2006) et $X_j/b=1,25$ d'après Tarrade (2007)) que dans le cas d'un jet plan turbulent où la vitesse est constante et égale à la vitesse maximale dans le jet (V_{sm}) jusqu'à $X_j/b=6$ (longueur du cœur potentiel). La décroissance de la vitesse (U_{jmax}) le long de la ligne centrale du jet est estimée par Liu *et al.* (2006) par une régression linéaire (eq.I-8) :

$$\frac{U_{jmax}}{V_{sm}} = 1 - 0,035 \cdot \frac{X_j}{0,5 \cdot b} \quad (\text{eq.I-8})$$

Contrairement à Liu *et al.* (2006), les mesures de Tarrade (2007) montrent que la vitesse longitudinale $\frac{U_{jmax}}{V_{sm}}$ croît jusqu'à $X_j/b=1,25$ puis diminue avec une pente plus forte que celle de

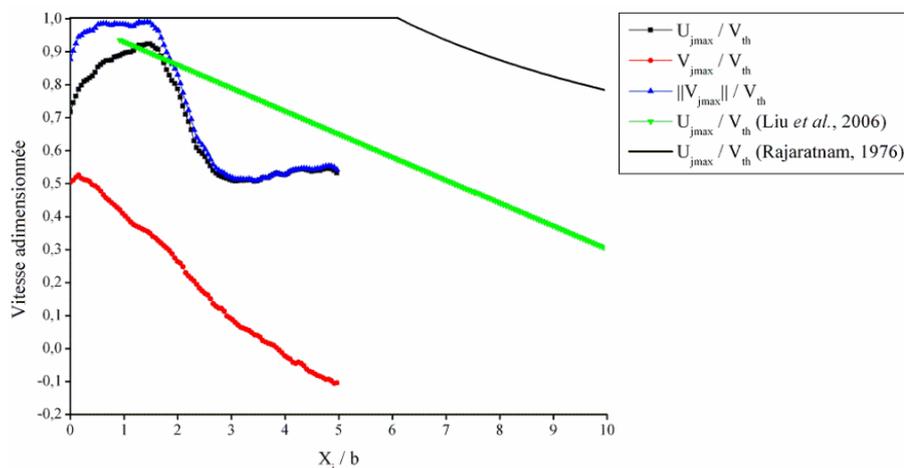


Figure I-16. Vitesse moyenne adimensionnée en $Y_j=0$, $B/b=9$, $Q^4=4,8$ et $Z/b=2$ (Tarrade, 2007).

Liu *et al.* (2006) pour atteindre environ $0,5 \cdot V_{th}$ en $X_j/b=5$ (Figure I-16).

Les auteurs se sont ensuite intéressés aux profils de vitesse longitudinale sur les différentes sections orthogonales le long de la ligne centrale du jet. Ils ont remarqué que le jet n'était pas symétrique de part et d'autre de la ligne centrale à cause de la présence des zones de recirculation. Pour le montrer, Liu *et al.* (2006) ont défini les demi-largeurs du jet b_- et b_+ , qui correspondent aux valeurs de Y_j pour lesquelles U_j atteint la moitié de la vitesse maximale U_{jmax} dans chaque section, respectivement à gauche et à droite du jet en regardant vers l'aval du bassin. Dans le cas d'un écoulement de type 1, Liu *et al.* (2006) ont considéré que le jet était symétrique et ont proposé deux équations linéaires permettant de décrire l'évolution de ces demi-largeurs le long de la ligne centrale, une dans un cas proche du radier (eq.I-9) et une dans un cas éloigné (eq.I-10).

$$\frac{b_{\pm}}{b} = 0,271 \cdot \frac{X_j}{b} + 0,16 \quad (\text{eq.I-9})$$

$$\frac{b_{\pm}}{b} = 0,188 \cdot \frac{X_j}{b} + 0,16 \quad (\text{eq.I-10})$$

Tarrade (2007) a proposé deux relations linéaires ((eq.I-11) et (eq.I-12)) pour décrire l'évolution de chacune des demi-largeurs, remarquant que l'expansion du jet n'était pas symétrique.

$$\frac{b_-}{b} = 0,24 \cdot \frac{X_j}{b} + 0,41 \quad (\text{eq.I-11})$$

$$\frac{b_+}{b} = 0,26 \cdot \frac{X_j}{b} + 0,095 \quad (\text{eq.I-12})$$

Enfin, dans le cas d'un écoulement de type 2, Liu *et al.* (2006) ont proposé une équation (eq.I-13) permettant de prédire b_- dont l'évolution diffère de b_+ en raison de l'absence de zones de recirculation.

$$\frac{b_-}{b} = 0,268 \frac{X_j}{b} + 0,4 \quad (\text{eq.I-13})$$

Liu *et al.* (2006) précisent que ces équations sont valables pour $\frac{X_j}{b} < 5$.

De nombreuses études se sont intéressées à l'écoulement dans les passes à poissons à l'aide de l'outil numérique. Tarrade (2007) a utilisé un modèle 2D RANS dans un bassin de passe à poissons à l'aide du logiciel Star-CD. Pour cela, il a défini des conditions aux limites de type « périodique » entre la fente amont (entrée du bassin) et la fente aval (sortie du bassin). Le débit massique transitant dans le bassin a été fixé de manière à retrouver l'écoulement généré pour une pente de 10%. L'auteur a utilisé le modèle de turbulence k-ε haut Reynolds qui, d'après Bourtal (2012) (Figure I-17), s'est avéré être moins performant que le modèle k-ε bas Reynolds en raison de l'utilisation des lois de parois.

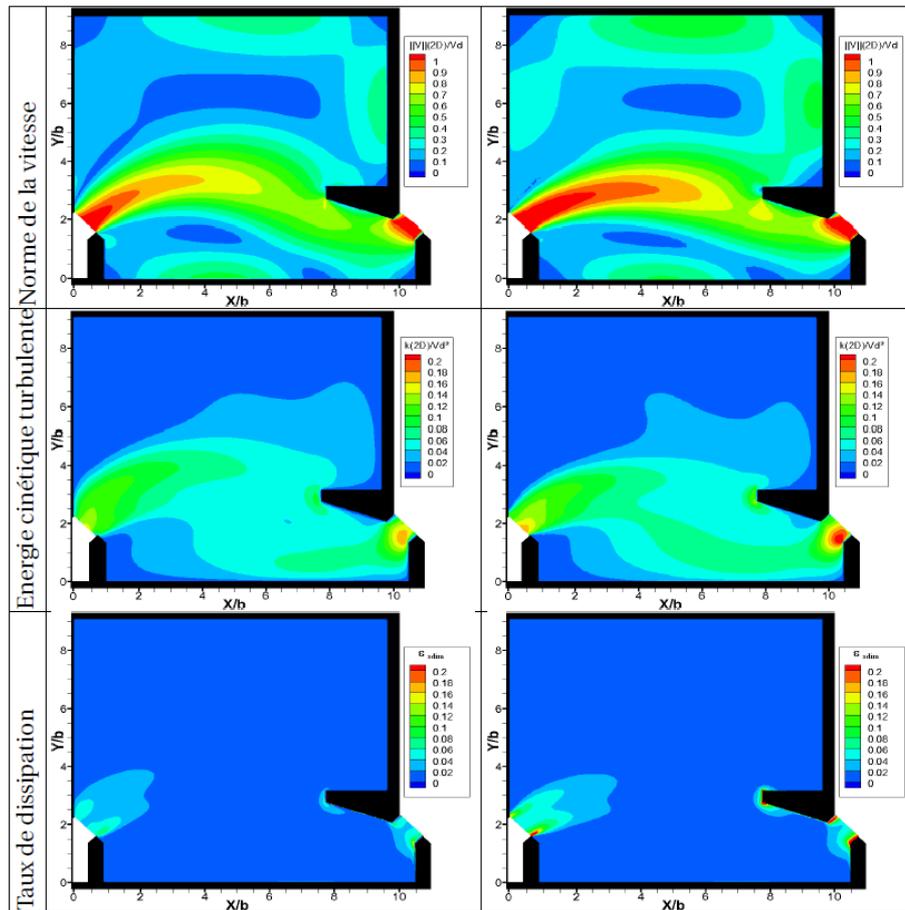


Figure I-17. Résultats du modèle k - ϵ haut Reynolds (à gauche) et bas Reynolds (à droite), $B/b=9$ (Bourtal, 2012).

Khan *et al.* (2006) ont effectué des simulations numériques 3D d'une passe à poissons à fentes verticales avec Star-Cd. La surface libre est modélisée par la méthode VOF (volume of fluid), basée sur une fonction qui permet de définir la fraction de volume d'un des fluides présent dans un volume de contrôle. Le modèle de turbulence k - ϵ haut Reynolds a été choisi par les auteurs. Le domaine simulé est composé de 7 bassins correspondant au modèle physique décrit par Wu *et al.* (1999), avec $L/b=10$, $B/b=6$ et $b=0,3$ m (exemple de la géométrie d'un bassin Figure I-18).

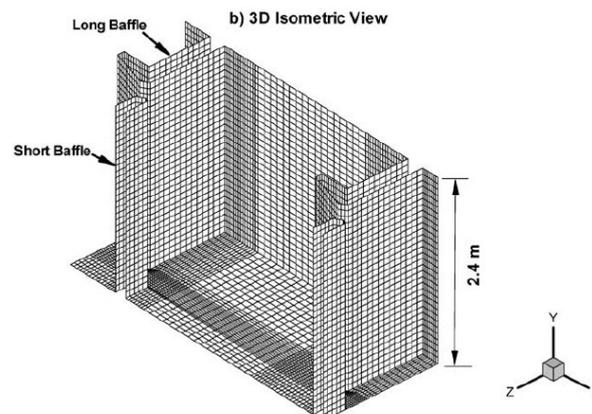


Figure I-18. Vue isométrique du maillage d'un des bassins (Khan *et al.*, 2006).

Kahn *et al.* (2006) ont appliqué une condition de vitesse (*inflow velocity*) sur la partie basse de la face d'entrée du domaine (où l'eau est présente). Cette vitesse est calculée à partir d'un débit constant de $1,53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Sur la partie supérieure de cette face (présence uniquement de l'air) mais également sur toute la face supérieure du domaine, une condition de symétrie est appliquée (gradient nul de vitesses, pression etc...). En sortie, une condition de pression hydrostatique est fixée, et des conditions de non glissement sont imposées aux parois. Les auteurs ont ainsi examiné l'écoulement sous différents plans, ils ont notamment mis en évidence l'évolution des caractéristiques spatiales du jet à différentes hauteurs d'eau (Figure I-19).

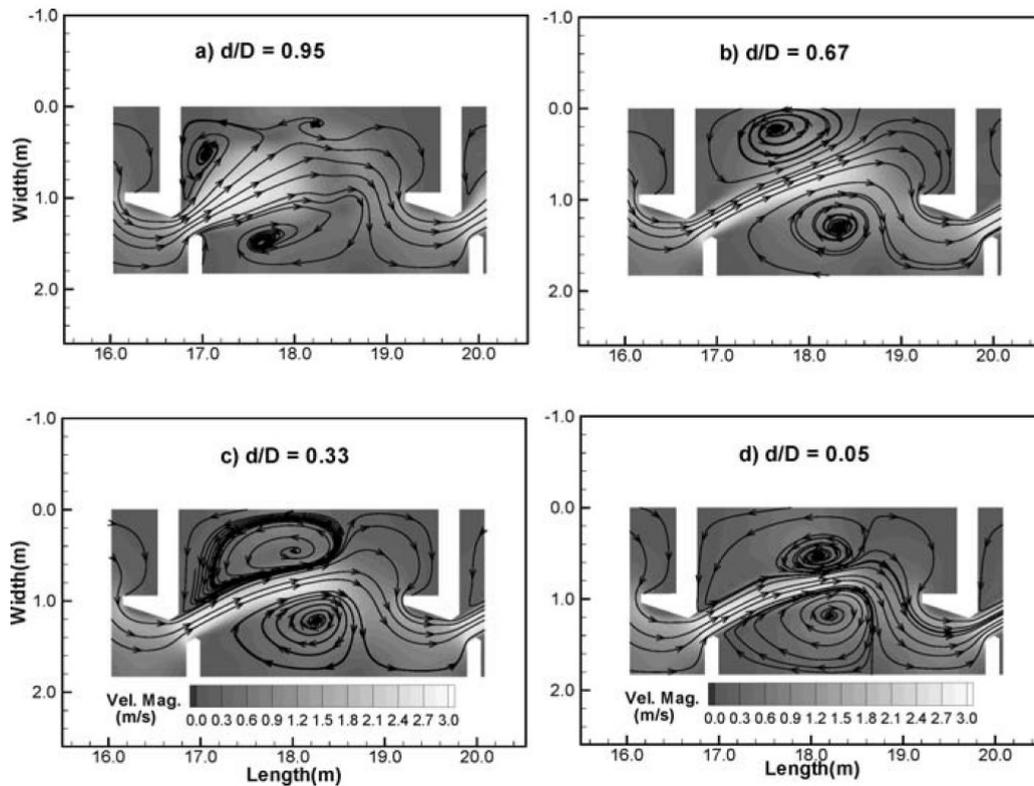


Figure I-19. Variations spatiales de la norme de la vitesse (en niveau de gris) et lignes de courant pour quatre plans parallèles au radier : a) $d/D=0,95$; b) $d/D=0,67$; c) $d/D=0,33$ et d) $d/D=0,05$ avec d la position verticale du plan et D la position de la surface libre (Khan *et al.*, 2006).

À l'approche de la surface libre, le jet devient plus large et pénètre moins loin dans le bassin. De même, les structures tourbillonnaires se décalent vers l'amont et sont plus petites. Khan *et al.* (2006) ont utilisé les résultats de leur simulation pour déterminer les vitesses dans les bassins et évaluer les forces de traînées exercées sur les poissons le long de trois trajectoires prédéfinies par les auteurs (Figure I-20). Ces trois trajectoires (A, B et C) correspondent à des conditions d'écoulement différentes. Le long de la trajectoire A, le poisson rencontre les vitesses les plus importantes, tandis que la trajectoire B est située sur la frontière du jet. En ce qui concerne la trajectoire C, elle s'écarte significativement du jet et traverse une des zones de recirculation. La force de traînée moyenne et l'énergie dépensée sont issues de moyennes spatiales le long de ces trajectoires. La force hydrodynamique agissant sur le corps d'un saumon a été calculée par les auteurs par l'équation (eq.I-14) :

$$F = 0,5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_s \cdot (U_w - U_f)^2 \quad (\text{eq.I-14})$$

avec C_d le coefficient de traînée du poisson, ρ la masse volumique de l'eau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), A_s la surface mouillée du poisson (m^2), U_w la vitesse du fluide et U_f la vitesse du poisson ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Khan *et al.* (2006) ont défini la longueur moyenne L des saumons étudiés par Standen *et al.* (2002) et la vitesse moyenne de pointe $|U_f|$ de quatre espèces de saumon issue des travaux de Powers *et al.* (1985). Ils ont considéré que $|U_f|$ était constante, ce qui implique que la vitesse de nage du poisson est identique quelle que soit la vitesse de l'écoulement. Des lois empiriques de (Webb, 1971 ; Haefner & Bowen, 2002) ont ensuite été utilisées pour calculer la surface mouillée moyenne d'un saumon. En ce qui concerne la valeur du coefficient de traînée, il a été estimé égal à celui utilisé par Pettersson et Bronmark (1999) ($C_d=1,2 \cdot C_f$ avec C_f le coefficient de frottement) dans leur étude concernant la dépense énergétique d'un carassin. Pour déterminer le coefficient de frottement, ils se sont basés sur les travaux de Liggett (1994) et Vogel (1994) qui estiment $C_f=0,074 \cdot \text{Re}^{-0,2}$. La dépense énergétique est ensuite évaluée par Khan *et al.* (2006) en faisant l'intégrale de la force de traînée suivant la trajectoire du poisson (Figure I-20).

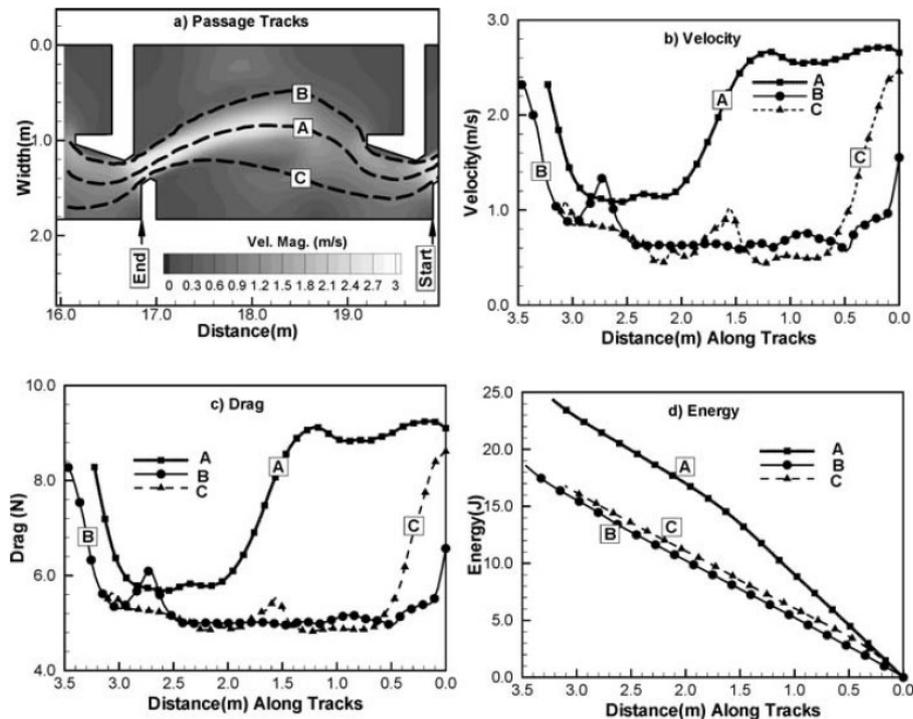


Figure I-20. a) trajectoires étudiées (A, B et C) ; b), c) et d) respectivement les variations spatiales de la vitesse, de la force de trainée et de la dépense d'énergie le long des trajectoires A B et C (Khan *et al.*, 2006).

D'autres auteurs ont utilisé les simulations numériques 3D pour décrire l'écoulement au sein des passes à poissons à fentes verticales. Heimerl *et al.* (2008) ont par exemple étudié l'influence de la position et de la taille du déflecteur central sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement, Chang *et al.* (2009) ont étudié l'écoulement dans les passes à échancrures latérales et Xu (2009) l'influence du ratio longueur sur largeur de bassin (L/B) sur la structure de l'écoulement.

Barton *et al.* (2009) ont effectué des simulations numériques 3D RANS avec la méthode VOF et le modèle de turbulence $k-\epsilon$ RNG sur les designs étudiés par White (2003) et Wu *et al.* (1999) pour des pentes respectivement de $s=5,5\%$ et 5% . Les auteurs ont montré que ce type de simulations numériques permet de prédire correctement les vitesses minimales et maximales au niveau de la fente, les tailles et les caractéristiques des zones de recirculation ainsi que les hauteurs d'eau dans les différents bassins.

Cea *et al.* (2007) ont réalisé des simulations 2D RANS « depth average » de l'écoulement dans les passes à poissons à fentes verticales avec différents modèles de turbulence. D'après les auteurs, le modèle le plus performant est le modèle ASM (algebraic stress model) qui donne une prédiction sur l'énergie cinétique turbulente légèrement plus proche de celle mesurée expérimentalement que le modèle $k-\epsilon$. Chorda *et al.* (2010) ont également montré que le modèle de turbulence $k-\epsilon$ permettait d'obtenir des champs de vitesses moyennes proches de ceux mesurés expérimentalement, mais que ce modèle avait tendance à surestimer l'intensité turbulente notamment au niveau du jet où les gradients de vitesses sont importants. Dans une étude menée par Shamloo et Aknooni (2012), plusieurs modèles de turbulence ont été testés ($k-\epsilon$ standard, realizable et RNG, LES et Reynolds Stress model). Dans cette étude comparative, il n'est pas précisé si le modèle $k-\epsilon$ standard est un haut ou bas Reynolds, ni le modèle de sous-mailles appliqué à la LES, ni le type de modèle RSM utilisé. La conclusion de cette étude est que le modèle $k-\epsilon$ standard donne des résultats plus proches des résultats expérimentaux que les autres modèles testés.

Wang *et al.* (2010) ont effectué des mesures en PIV et à l'aide d'une sonde ADV dans le modèle de passe à poissons de l'Institut P' de l'Université de Poitiers. Ils ont analysé les grandeurs cinématiques de l'écoulement en fonction du débit, de la pente et de la largeur des bassins. Les auteurs ont tracé les courbes de distribution de fréquences relatives cumulées de la vitesse

adimensionnée mesurée sur un plan parallèle au radier. En prenant un critère basé sur la vitesse maximale dans un bassin (V_{max}), ils ont calculé le pourcentage de volume où la vitesse mesurée était inférieure à $0,3.V_{max}$, pouvant être considérée par le poisson comme étant une zone de repos. Les auteurs ont ainsi remarqué que le pourcentage moyen de volume associé aux zones de repos était plus faible pour la topologie de type 2 (entre 50 et 55% pour $s=10\%$ et entre 60 et 65% pour $s=5\%$) que pour la topologie de type 1 (entre 70 et 75% pour $s=10\%$ et 80% pour $s=5\%$). Ils montrent ainsi que la puissance volumique dissipée P_v (un des principaux critères de dimensionnement des passes à fentes verticales), n'est pas suffisante à elle seule pour qualifier la convenance de l'écoulement pour les plus petites espèces pour qui la présence des zones de repos est importante. L'équation (eq.I-15) donne l'expression de cette puissance volumique dissipée, image de l'agitation et de la turbulence dans chacun des bassins :

$$P_v = \frac{\rho g Q \Delta h}{BLZ} \quad (\text{eq.I-15})$$

avec ρ la masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}), g l'accélération de la pesanteur (m.s^{-2}), Q le débit ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), Δh la hauteur de chute entre les bassins (m), B et L respectivement la largeur et la longueur d'un bassin (m) et Z la hauteur d'eau moyenne (m).

Wang *et al.* (2010) se sont ensuite intéressés aux grandeurs turbulentes et plus particulièrement à l'énergie cinétique turbulente (TKE). Ils ont remarqué que le pourcentage de volume de bassin où la TKE était faible variait significativement en fonction de la pente (s) mais également en fonction de la largeur des bassins (B). En revanche, les valeurs maximales atteintes sont dépendantes de s mais pas de B . Les auteurs ont proposé des relations non linéaires pour expliquer la variation de \sqrt{TKE} en fonction de la puissance volumique dissipée dans les bassins (P_v). Le premier et le troisième quartile \sqrt{TKE}_{25} et \sqrt{TKE}_{75} , qui représentent respectivement les zones les plus calmes et les plus agitées dans les bassins, ont ainsi été estimés à partir des équations (eq.I-16) et (eq.I-17) :

$$\sqrt{TKE}_{25} = 3,13.P_v^{0,28} \quad (R^2=79,5\%) \quad (\text{eq.I-16})$$

$$\sqrt{TKE}_{75} = 8,05.P_v^{0,18} \quad (R^2=65\%) \quad (\text{eq.I-17})$$

Les auteurs précisent cependant que ces deux régressions ne peuvent pas être utilisées pour les passes à poissons de dimensions différentes, en raison de la non homogénéité des dimensions des deux termes de chacune des équations. Wang *et al.* (2010) ont par ailleurs montré qu'environ 80% de la variance de \sqrt{TKE}_{25} et \sqrt{TKE}_{75} pouvait être expliquée à partir de la vitesse débitante (V_{deb}) et de la vitesse maximale (V_{max}) ((eq.I-18) et (eq.I-19)) :

$$\sqrt{TKE}_{25} = 19,25.V_{deb}^{0,28}.V_{max}^{0,72} \quad (R^2=80\%) \quad (\text{eq.I-18})$$

$$\sqrt{TKE}_{75} = 21,8.V_{max}^{0,69} \quad (R^2=78\%) \quad (\text{eq.I-19})$$

Wang *et al.* (2010) ont également mené des expérimentations avec des truites *fario* de pisciculture (longueur comprise entre 80 et 120 mm), dans le même modèle de passe pour une pente $s=10\%$, un débit $Q^A=4,8$ et une largeur de bassins $B/b=9$. Des groupes de 20 à 30 individus ont été introduits dans le dernier bassin de la passe à poissons pendant 90 min. Le passage de ces derniers dans le troisième bassin a été filmé par l'intermédiaire d'une caméra vidéo. L'analyse de ces vidéos a ensuite permis aux auteurs de définir des trajectoires-types ainsi que les zones de

repos les plus utilisées (Zone 1 et 2, et dans une moindre mesure la Zone 3) par les poissons (Figure I-21).

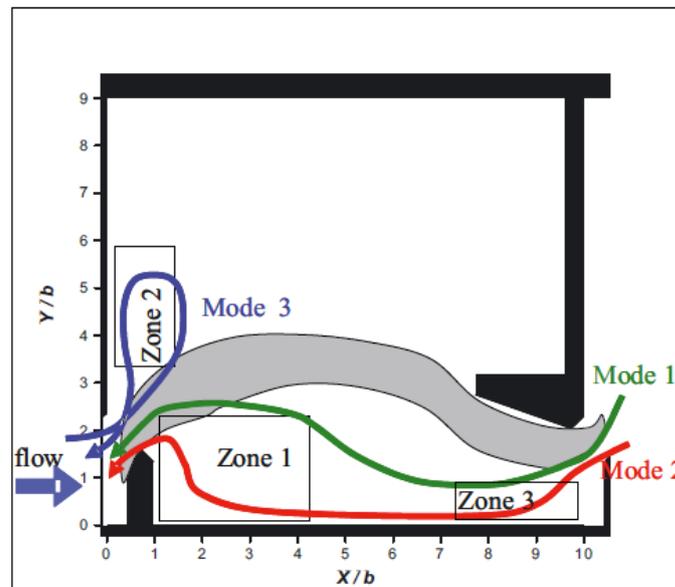


Figure I-21. Localisation des zones de stabulation les plus fréquemment utilisées, Zone 1 et Zone 2, et trajectoires-typiques des truites lors des expérimentations (Wang *et al.*, 2010).

Tarrade *et al.* (2011) ont utilisé le même dispositif expérimental que Wang *et al.* (2010) pour caractériser l'écoulement dans les bassins en termes de vitesse, d'énergie cinétique turbulente et de vorticité, grâce à des mesures PIV. La vorticité est un paramètre important à prendre en compte, car elle peut constituer une barrière à la migration des poissons, comme cela a été montré avec une espèce de barbeaux (*Luciobarbus bocagei*) par Silva *et al.* (2011). Les auteurs ont donc tracé les champs de vorticité pour les deux largeurs de passe à poissons ($B/b=6,67$ et 9). Ils ont montré que la vorticité était maximale aux frontières du jet. Les auteurs ont défini deux zones, de part et d'autre du jet, à partir desquelles ils ont étudié la densité de probabilité de la vorticité de l'écoulement moyen et de l'écoulement instantané (Figure I-22).

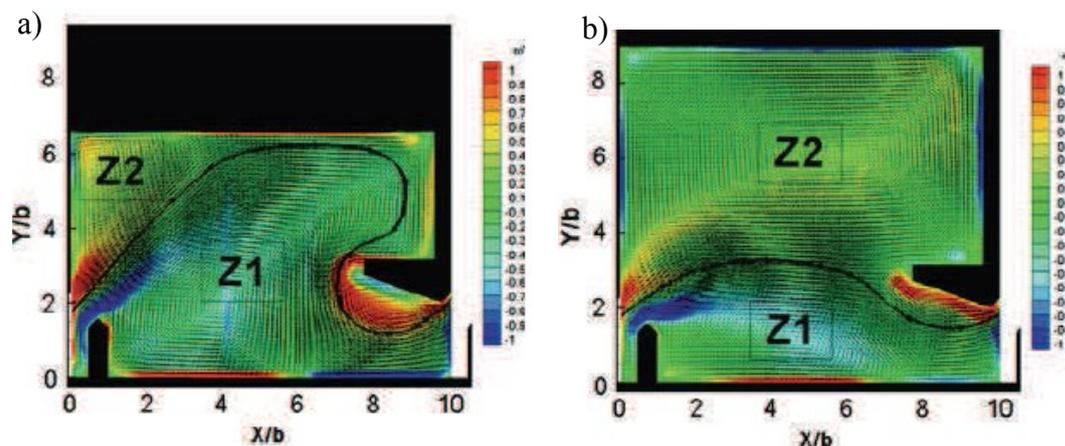


Figure I-22. Champs de vorticité de l'écoulement moyen, $s=10\%$ et $Q^1=4,8$. a) $B/b=6,67$, b) $B/b=9$ (Tarrade *et al.*, 2011).

Tarrade *et al.* (2011) ont remarqué qu'il pouvait exister une différence significative entre ces deux distributions de vorticité, avec notamment des valeurs maximales beaucoup plus importantes dans le cas de la densité de vorticité calculée sur le champ moyen, quelle que soit la zone étudiée. Ils ont ensuite proposé une étude instationnaire en analysant dans un premier temps des champs de vitesses instantanées, puis en réalisant une décomposition orthogonale aux valeurs propres (POD). Tarrade *et al.* (2011) ont mis en évidence les principales phases de l'écoulement en grande largeur de bassin ($B/b=9$) et en petite largeur ($B/b=6,67$). En grande largeur, le jet bat alternativement de haut en bas en raison des « bouffées de vitesses » provenant de la fente amont et des échanges avec le tourbillon supérieur (Figure I-23).

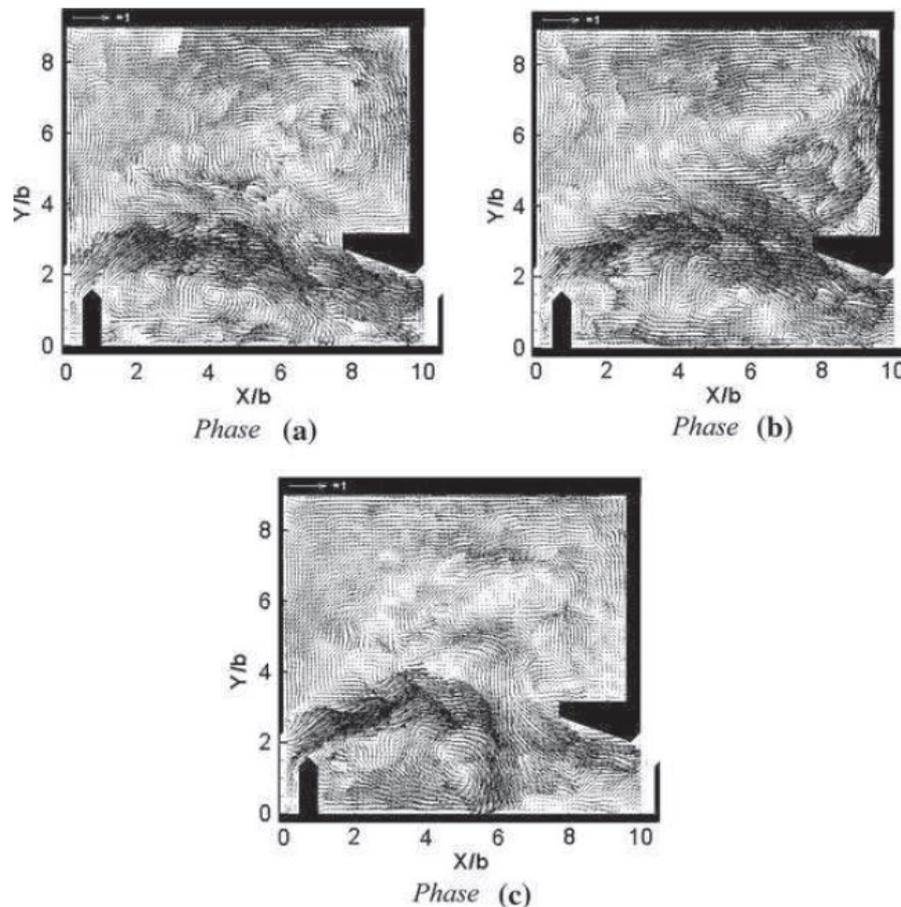


Figure I-23. Champs de vitesses instantanées obtenus par PIV, caractérisant les phases de l'écoulement. $B/b=9$, $s=10\%$ et $Q^A=4,8$ (Tarrade *et al.*, 2011).

Pour cette taille de bassin, les auteurs ont décomposé l'écoulement en trois phases. Dans une première phase, le jet décrit une trajectoire courbe orientée directement vers la fente aval (Figure I-23 phase a). Il tend ensuite à se déplacer vers la paroi latérale ($Y/b=9$) et se divise alors en deux

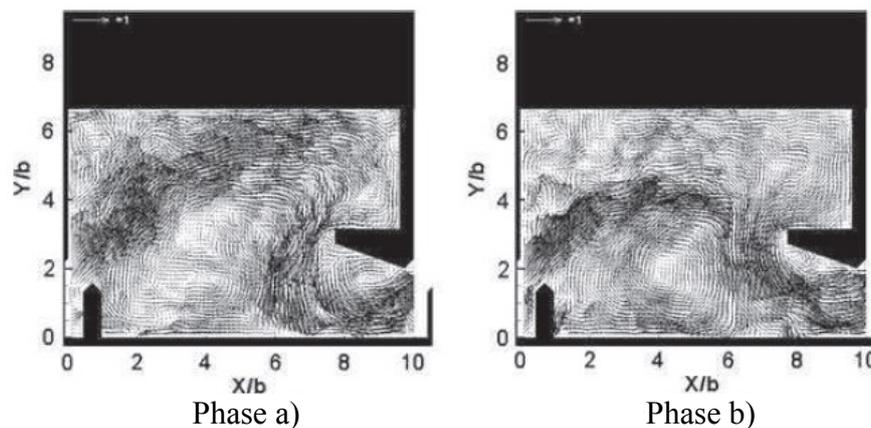


Figure I-24. Champs de vitesses instantanées obtenus par PIV, caractérisant les phases de l'écoulement. $B/b=6,67$, $s=10\%$ et $Q^A=4,8$ (Tarrade *et al.*, 2011).

parties (Figure I-23 phase b). La première longe la paroi du déflecteur central puis la paroi latérale, alimentant ainsi la zone de recirculation supérieure. La seconde partie du jet suit la partie biseautée du déflecteur central puis ressort par la fente aval. Enfin, dans une dernière phase, le jet adopte une courbure très importante et alimente la zone de recirculation inférieure (derrière le déflecteur latéral amont) dont la forme évolue rapidement avec le temps (Figure I-23 phase c).

Pour la petite largeur ($B/b=6,67$), le battement du jet est moins important. Tarrade *et al.* (2011) ont déterminé deux phases principales d'écoulement dans cette configuration. Dans la première,

le jet vient impacter la paroi opposée à la fente, puis contourne le déflecteur central en créant une large zone de décollement avant de sortir par la fente aval (Figure I-24 a). Une petite zone de recirculation se crée alors dans la partie amont du bassin, à gauche du jet. Dans la deuxième phase (Figure I-24 b), le jet est moins fort et converge plus directement vers la fente aval. Le décollement au niveau du déflecteur central est alors moins important.

Grâce à la POD, les auteurs ont ensuite expliqué que l'écoulement était gouverné, d'un point de vue énergétique, par le battement du jet. Ils en ont notamment déduit la fréquence de battement du jet (0,12 Hz et 0,08 Hz) pour les deux largeurs de bassins étudiées ($B/b=6,67$ et $B/b=9$).

Une autre étude, expérimentale et numérique, a été présentée par Bousmar *et al.* (2014) sur le réaménagement d'une passe à poissons sur la rivière Meuse en Belgique. L'entrée de la passe à poissons existante manquait de visibilité avec un débit d'attrait trop faible et les dimensions de ses bassins étaient trop petites pour les migrateurs de grandes tailles. De plus, l'implantation d'une nouvelle usine hydroélectrique nécessite de modifier l'entrée de la passe à poissons. Les contraintes d'espace imposent la réutilisation du canal de l'ancienne passe pour la construction de la nouvelle (Figure I-25).

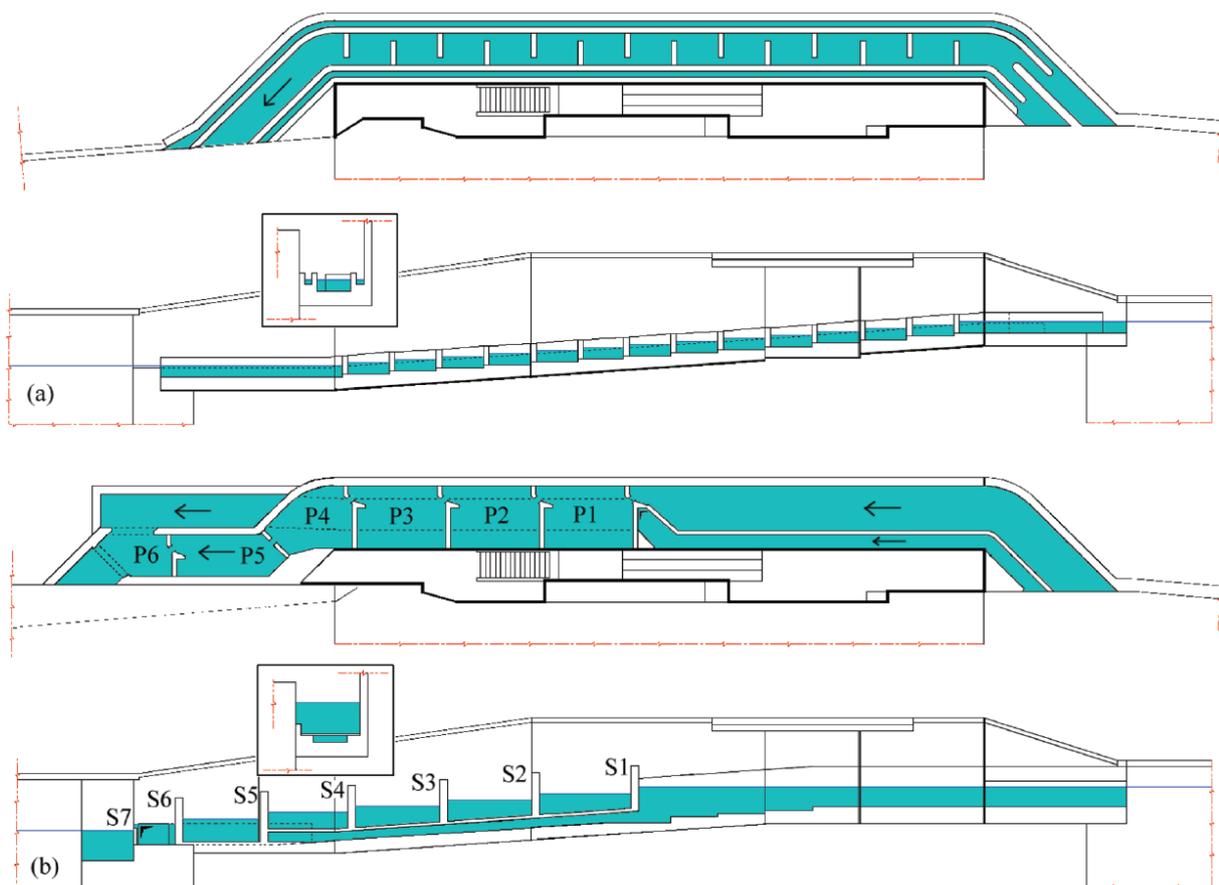


Figure I-25. Passe à poissons de Rivière, vue de dessus et vue de côté ; a) passe à poissons existante b) future passe à poissons, géométrie initiale (Bousmar *et al.*, 2014).

La complexité du projet a mené les auteurs à réaliser une étude expérimentale et numérique de l'écoulement dans la passe à poissons en vue d'optimiser son fonctionnement. En premier lieu, les auteurs ont défini les espèces cibles, c'est-à-dire les espèces susceptibles d'avoir besoin de franchir l'ouvrage. Au niveau de leur ouvrage, ces espèces sont principalement les grands migrateurs (saumon, truite de mer...) mais également les espèces locales dont les capacités de nage sont moindres (gardons, anguilles...). Les auteurs ont fait le choix de la construction d'une passe à poissons à fentes verticales pour équiper le seuil de Rivière en Belgique. Ce type de passe est reconnu comme étant adapté pour un large éventail d'espèces de poissons aux capacités de nages variées. Ils ont ensuite dimensionné cette passe à poissons en respectant les critères fournis dans la littérature (puissance volumique dissipée, hauteur de chute, largeur de fente...).

La nouvelle passe à poissons est composée de 6 bassins plus larges que ceux de la précédente passe. La hauteur de chute entre chacun des bassins a été fixée à 0,3 m. En outre, le débit additionnel (débit d'attrait) est dans un premier temps acheminé via un canal (à surface libre) parallèle à celui d'alimentation des bassins de la passe à poissons. Ce débit transite ensuite sous les bassins via un conduit puis s'écoule jusqu'à l'entrée de la passe par l'intermédiaire d'un tunnel à surface libre. Un modèle à l'échelle 1:5 a été réalisé en PVC et en PMMA transparent pour étudier l'écoulement. Les auteurs ont notamment modifié la géométrie initiale du bassin 4 pour lui donner une forme en « S » afin d'optimiser la topologie d'écoulement et ainsi créer des zones de recirculation mieux définies. Ils ont notamment redéfini la hauteur des seuils insérés dans les fentes 5, 6 et 7 pour équilibrer toutes les hauteurs de chute. Le design du dernier bassin (bassin 6) dans lequel le débit d'attrait et le débit de la passe sont mélangés, a aussi été remanié (Figure I-26). Pour assurer une dissipation correcte dans le bassin 6, les auteurs ont choisi de séparer l'écoulement du débit additionnel et l'écoulement issu des bassins jusqu'à l'entrée de la passe. Ainsi, le bassin 6 se retrouve équipé d'une fente aval verticale classique et le canal du débit d'attrait se termine par un déversoir à crête mince.

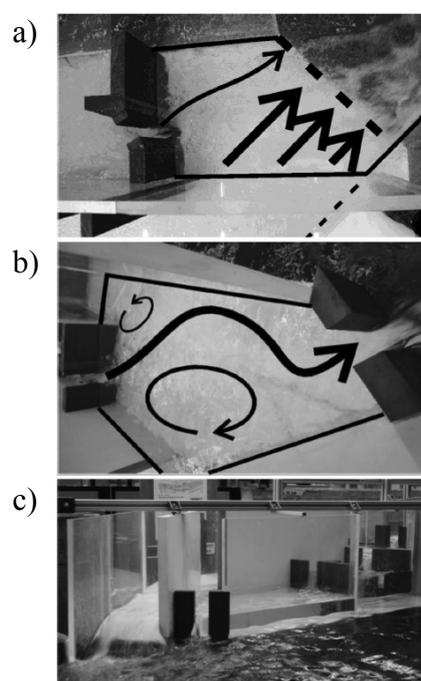


Figure I-26. Images de l'écoulement dans le bassin 6 ; a) géométrie initiale ; b) et c) géométrie finale (Bousmar *et al.*, 2014).

Bousmar *et al.* (2014) ont également étudié l'écoulement grâce au logiciel TELEMAC-2D qui résout les équations de Saint Venant sous les hypothèses d'un écoulement à faible hauteur d'eau (intégration verticales des équations de Navier-Stokes). Chorda *et al.* (2010) ont montré que ce logiciel permettait de reproduire de manière correcte l'écoulement dans une passe à poissons à fentes verticales, même si l'énergie cinétique turbulente modélisée était surestimée. Bousmar *et al.* (2014) ont estimé que les formes des jets et des zones de recirculation étaient qualitativement bien reproduites avec cette méthode (Figure I-27) permettant ainsi d'étudier les topologies d'écoulement en fonction de la géométrie des bassins.

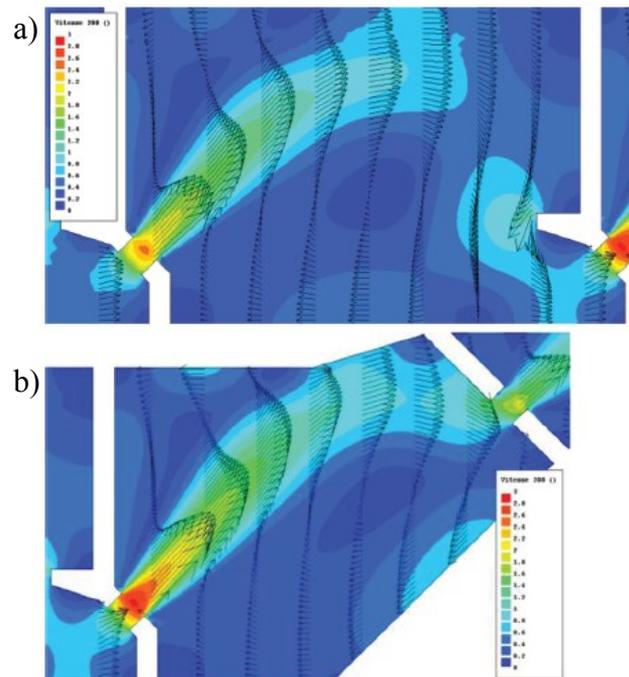


Figure I-27. Simulation numérique de l'écoulement avec Telemac 2D, géométrie initiale ; a) bassin 2 ; b) bassin 4 (Bousmar *et al.*, 2014).

Au Canada, Marriner *et al.* (2014) ont effectué des simulations numériques 3D VOF avec le logiciel ANSYS© pour analyser l'écoulement dans les virages des passes à poissons à fentes verticales. Ces auteurs ont étudié plusieurs designs de bassins tournants (de formes circulaires, carrés...) et ils ont notamment montré que l'ajout de déflecteurs permettait de réduire la taille des grandes structures tourbillonnaires en procurant des zones de repos pour les poissons.

Plus récemment, An *et al.* (2016) ont modélisé l'écoulement dans trois designs de passes à poissons en 3D avec la méthode VOF et le modèle de turbulence k- ϵ . Cet article comporte notamment l'étude d'un nouveau design de bassin avec un déflecteur en forme de « L », pour des pentes de 4,2% et 2,6%. Les dimensions de leurs bassins correspondent à celles communément utilisées sur la rivière Dadu en Chine, avec une largeur de fente de 0,3 m, une longueur $L/b=8$ et une largeur $B/b=6,67$. Les auteurs ont validé leurs résultats numériques par des mesures effectuées sur une passe à poissons à la même échelle (échelle 1 :1) avec un ADV. Ils ont déduit de leurs résultats numériques que l'utilisation d'un déflecteur en forme de « L » permettait pour une même pente de diminuer la hauteur de chute et la vitesse dans le jet à $0,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ contre $1,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sans déflecteur. Les auteurs expliquent que l'obstruction créée par le déflecteur entraîne une topologie d'écoulement en forme de « Ω », permettant de dissiper davantage l'énergie du jet. Cette géométrie permet également de diminuer le pourcentage de surface occupée par les zones de recirculation de 30,16% à 21,73% et l'énergie cinétique turbulente de $0,07 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ à $0,03 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

1.1.2.c Insertion d'obstacles dans les passes à poissons à fentes verticales

L'intensité turbulente, l'énergie cinétique turbulente, la vorticité, les contraintes de Reynolds et la taille des structures turbulentes sont les caractéristiques d'un écoulement turbulent auxquelles les poissons sont les plus sensibles (Pavlov *et al.*, 2000 ; Hotchkiss, 2002 ; Odeh *et al.*, 2003 ; Silva *et al.*, 2011, 2012). Ces dernières années, quelques travaux ont été consacrés à l'amélioration de l'écoulement dans les bassins des passes à poissons à fentes verticales par l'introduction d'obstacles. Dans le principe, il s'agit de diminuer ces grandeurs caractéristiques de l'écoulement turbulent en favorisant la dissipation d'énergie par l'insertion d'un ou plusieurs obstacles. Le but étant d'adapter les ouvrages existants aux petites espèces de poissons, sans modifier la géométrie des bassins.

Tarrade (2007) a étudié l'influence de l'ajout d'un obstacle sur l'écoulement et sur le comportement des poissons par des tests biologiques. Il a notamment testé plusieurs formes d'obstacles (cylindres pleins, demi-cylindres) positionnés dans le jet, où le flux principal atteint ses valeurs maximales. L'obstacle a été positionné à une distance au moins égale à la largeur de l'échancrure et son diamètre correspond à la largeur de la fente. L'auteur a également étudié l'ajout d'un second cylindre pour briser l'écoulement issu du contournement du premier cylindre. Des visualisations par tomographie laser lui ont permis d'analyser l'impact sur la topologie de l'écoulement des différentes configurations de cylindres testées (Figure I-28).

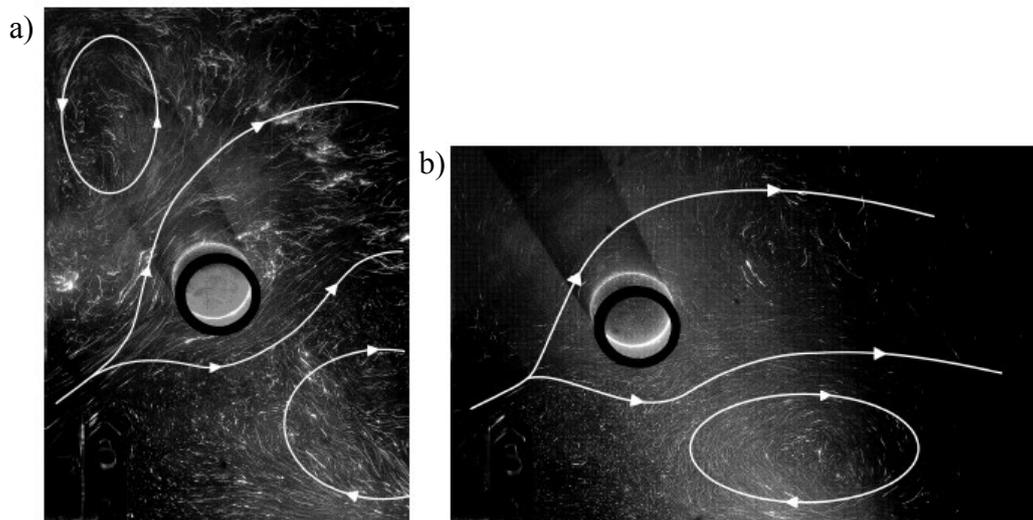


Figure I-28. Visualisations de l'écoulement, $s=10\%$, $Q^A=4,8$. a) $B/b=9$; b) $B/b=6,67$ (Tarrade, 2007).

L'insertion d'un seul cylindre plein a été retenue par l'auteur comme étant la solution la plus intéressante en termes d'efficacité et de mise en œuvre. Le cylindre unique a tendance à élargir le jet et à générer un sillage derrière l'obstacle pouvant servir de zone de repos pour le poisson. Il réduit également de manière significative les valeurs de la vitesse moyenne et de l'énergie cinétique turbulente dans la majorité du volume du bassin. L'autre avantage de cette configuration réside dans la génération des tourbillons dans le sillage du cylindre, caractérisé par l'apparition de structures contrarotatives alternées que les poissons peuvent utiliser pour franchir les bassins, leur permettant ainsi de réduire leur dépense énergétique. Tarrade (2007) a ensuite réalisé des tests biologiques avec différentes espèces de cyprinidés, ainsi qu'avec des truites, et sur toutes les configurations avec et sans cylindre. Il a constaté que l'insertion d'un cylindre plein en sortie de fente semblait être la meilleure configuration, car elle générerait une amélioration notable de l'efficacité locale de franchissement et une réduction du temps de séjour dans les bassins.

Les travaux de Mallen-Cooper *et al.* (2008) ont également porté sur l'adaptation de l'écoulement au sein des passes à poissons à fentes verticales par l'insertion d'obstacles. Ces auteurs ont étudié l'influence de l'adjonction d'une paroi rugueuse dans les bassins pour améliorer la dissipation de l'énergie ainsi que l'installation de seuils, placés au milieu des fentes, pour diminuer le débit transitant dans la passe et augmenter le niveau d'eau dans les bassins (Figure I-29). Il ressort de cette étude, menée dans une passe à l'échelle 1:1 (pente 5,5%) sur le fleuve Murray en Australie, que ces deux systèmes permettent d'augmenter le passage des poissons de petites tailles (<60 mm). De ces deux solutions, l'insertion de seuils au milieu des fentes s'avère être légèrement plus efficace mais réduit l'attrait de la passe à poissons.

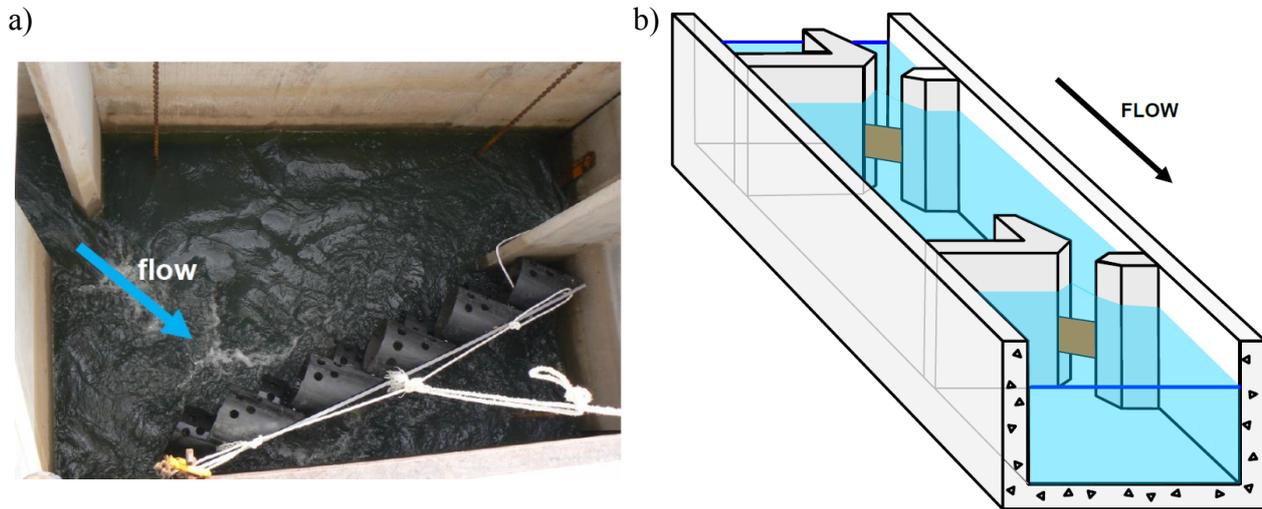


Figure I-29. Adjonction d'une paroi rugueuse (a) et d'un seuil (b) (Mallen-Cooper *et al.*, 2008).

La paroi rugueuse engendre une zone où la turbulence et la dissipation d'énergie est importante réduisant ainsi l'intensité de la turbulence dans le reste du bassin. La diminution de la vitesse et de l'énergie cinétique turbulente permet de créer un chemin continu entre les bassins, exploitable par les espèces dont la capacité de nage est limitée. Les auteurs ont montré que cette solution était efficace, mais que sa mise en œuvre pouvait présenter quelques difficultés, notamment à cause de la complexité de sa géométrie. La réduction du volume du bassin peut également diminuer de manière significative l'espace disponible pour les plus grandes espèces de poissons. La mise en place des seuils au milieu des fentes est une solution simple et efficace mais réduit l'attractivité de la passe à poissons.

Depuis quelques années, des obstacles sous la forme de blocs uniformément répartis sur le radier sont insérés dans les passes à poissons à fentes verticales. Ce type de rugosité est directement inspiré des passes à poissons dites « naturelles » qui relient les biefs amonts et avals par un chenal, et dont la rugosité du fond ou des successions de singularités permettent de dissiper l'énergie et réduire les vitesses de l'écoulement. Il existe une double classification de ces ouvrages (Larinier *et al.*, 2006). La première regroupe les passes en fonction de la manière dont est dissipée l'énergie de l'écoulement, la seconde en fonction de l'implantation du dispositif sur l'ouvrage. Dans la première catégorie, dont les critères de classification semblent être plus adaptés au point de vue de la mécanique des fluides, trois types de passes à poissons sont distingués :

- Les passes à enrochements régulièrement répartis, dans lesquelles des blocs sont disposés sur un fond dont la rugosité est variable.
- Les passes à enrochements à rangées périodiques, formant des pseudos bassins ou une série de seuils.
- Les passes à enrochements jointifs, dans lesquelles les blocs sont placés les uns à côté des autres, de manière compacte.

Plusieurs études visant à caractériser l'écoulement turbulent dans une passe à enrochements régulièrement répartis ont été menées ces dernières années. Baki *et al.* (2014, 2015) ont caractérisé expérimentalement l'écoulement moyen et la turbulence qui se développe dans ce type de passe. L'écoulement dans une passe à poissons à rugosités émergentes a été étudié par Cassan *et al.* (2014). Les auteurs ont mené leur étude dans deux canaux à surface libre. Dans le premier, d'une longueur de 10 m et d'une largeur de 0,25 m, ils ont mesuré les variations de hauteurs d'eau générée par la présence de plots cylindriques (de 35 mm de diamètre et de 70 mm de haut) pour une pente variant de 1% à 8%. Dans le second canal, d'un mètre de large, de 7 m de long et inclinable de 1% à 9%, ils ont fait varier les conditions d'écoulement pour différentes densités (13% et 16%) de plots cylindriques en bois dont le diamètre et la hauteur valaient respectivement 115 mm et 150 mm. Dans cette configuration, des rugosités de fond ont été

ajoutées (cailloux). La hauteur d'eau dans le canal a été mesurée par ombroscopie (Figure I-30) et les vitesses à l'aide d'un courantomètre.

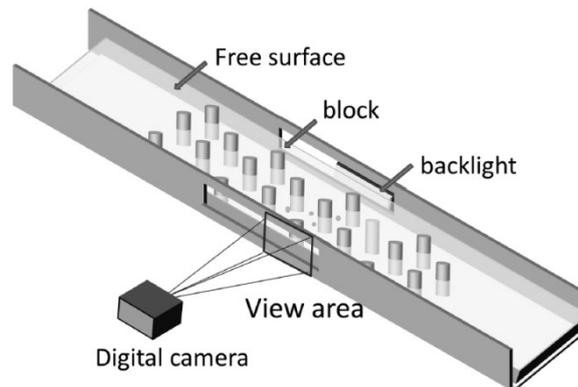


Figure I-30. Schéma de l'installation expérimentale pour l'étude des macro-rugosités. (Cassan *et al.*, 2014).

Les auteurs ont développé un modèle analytique, basé sur un bilan de quantité de mouvement, permettant de connaître l'effet de chaque paramètre sur la résistance hydraulique. Ils ont montré que la rugosité de fond avait une faible influence sur cette dernière, contrairement à la forme des macro-rugosités (blocks) et au nombre de Froude de l'écoulement. Cassan *et al.* (2014) ont également analysé les variations de coefficient de trainée et proposé une corrélation entre la hauteur d'eau et le diamètre des blocs pour améliorer la prédiction de la hauteur d'eau en fonction du débit (relation hauteur/débit). Cassan *et al.* (2016) ont ensuite modifié et simplifié leur modèle pour l'adapter à un plus large éventail de configurations géométriques, en prenant également en compte la submersion des macro-rugosités.

Bourtal (2012) a étudié l'influence de l'insertion de macro-rugosités sur l'écoulement dans la passe à poissons de l'Institut P' de l'Université de Poitiers (échelle 1/4). L'objectif de ce dispositif est de réduire les quantités cinématiques au fond des bassins, permettant ainsi d'adapter l'écoulement existant dans une passe à poissons à fentes verticales classique aux espèces de fond (espèces benthiques) et aux espèces dont la capacité de nage est la moins importante.

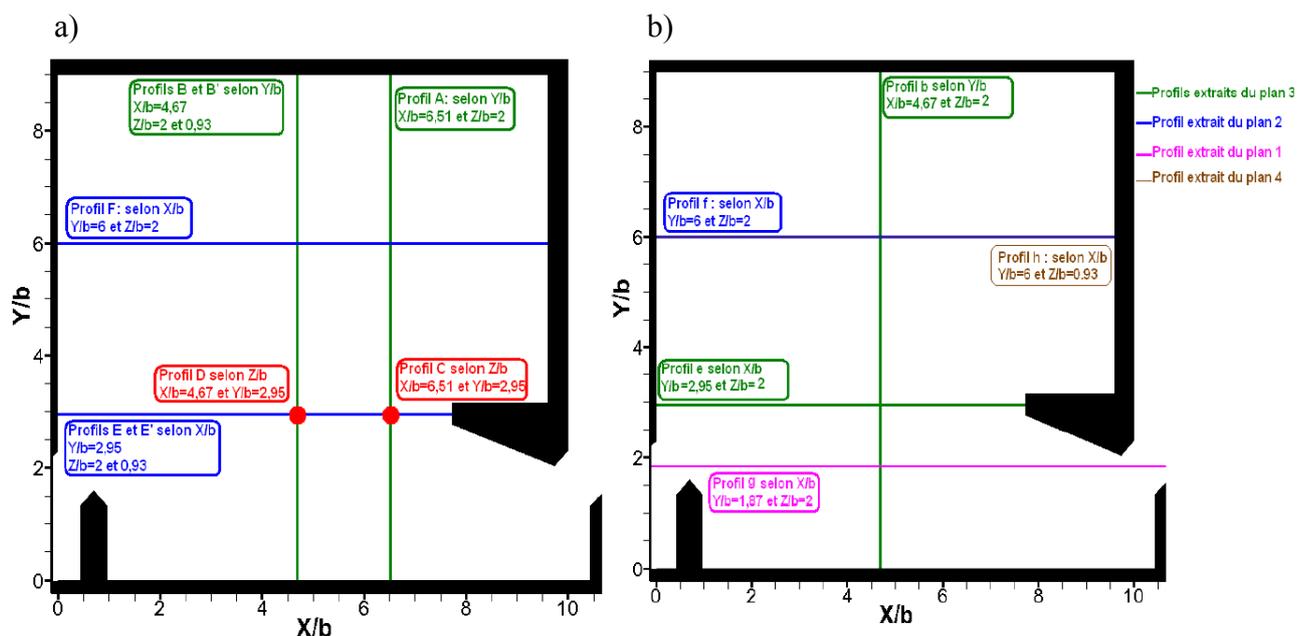


Figure I-31. Position des profils de vitesses. (a) technique ADV (b) technique PIV (Bourtal, 2012).

Bourtal (2012) a équipé les quatre bassins de la passe à poissons de plaques sur lesquelles étaient disposés des plots cylindriques constituant les macro-rugosités. Ces plots sont identiques à ceux utilisés au cours de cette thèse, avec un diamètre de 35 mm et une hauteur de 50 mm. La répartition des plots dans chacun des bassins était uniforme et la densité de macro-rugosités

(surface couverte par les plots par rapport à la surface d'un bassin) était de 13,46%. Cette densité correspond à la densité $d_r=15\%$ étudiée au cours de cette thèse. Bourtal (2012) a caractérisé l'écoulement à partir de mesures ADV à partir desquelles il a tracé des profils de vitesses longitudinaux, transversaux et verticaux. Des champs de vitesses moyennes et d'énergie cinétique turbulente ont été obtenus par PIV sur différents plans, desquels ont également été extraits des profils de vitesses (Figure I-31). Une analyse de ces résultats et une comparaison avec ceux obtenus dans le cas d'une configuration de passe à poissons sans macro-rugosités a été proposée par l'auteur. Toutes les mesures ont été effectuées pour une pente de 10% et $B/b=9$.

Les positions des plans de mesures en PIV réalisées par Bourtal (2012) sont :

Plan 1 : plan vertical fente à fente en $Y/b=1,87$.

Plan 2 : plan vertical à $Y/b=6$.

Plan 3 : plan horizontal (parallèle au radier) en $Z/b=2$.

Plan 4 : plan horizontal en $Z/b=0,93$.

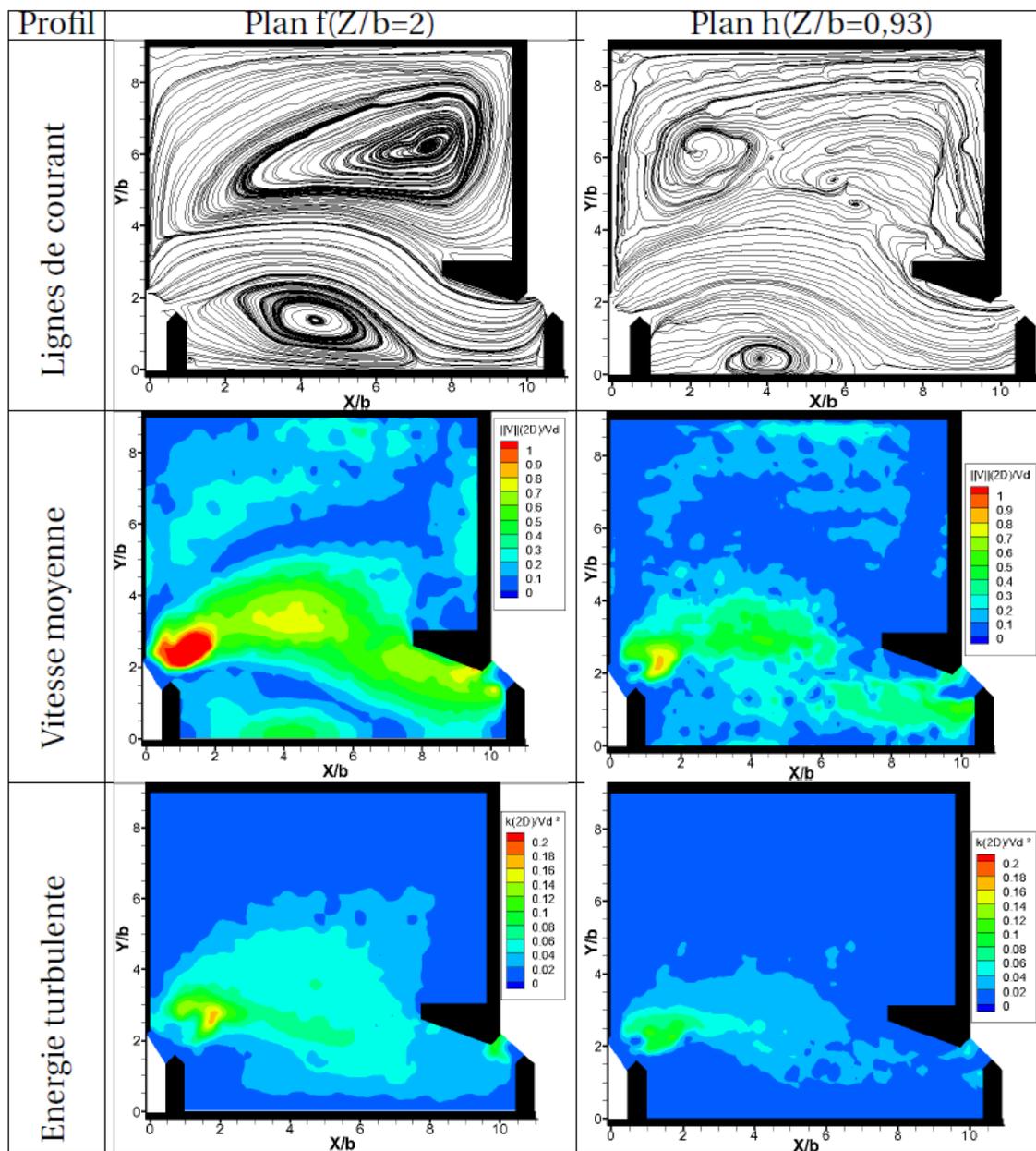


Figure I-32. Lignes de courant et champs de vitesses moyennes et d'énergie cinétique turbulente en présence de macro-rugosités pour $Z/b=2$ et $Z/b=0,93$ (Bourtal, 2012).

L'auteur propose une analyse de l'impact des macro-rugosités sur les lignes de courant de l'écoulement, les vitesses moyennes et l'énergie cinétique turbulente en fonction de la hauteur du plan de mesure en PIV ($Z/b=0,93$ et $Z/b=2$) (Figure I-32). Il remarque que les deux zones de recirculation de part et d'autre du jet n'évoluent pas sensiblement en taille mais que la position des cœurs tourbillonnaires est modifiée significativement entre $Z/b=0,93$ et 2. D'autre part, dans la zone proche des macro-rugosités ($Z/b=0,93$), les grandeurs cinématiques sont réduites par rapport à celle mesurées en $Z/b=2$. À partir des profils verticaux de vitesses moyennes et d'énergie cinétique turbulente, l'auteur montre également que l'insertion de macro-rugosités engendre une augmentation des quantités cinématiques moyennes le long de la colonne d'eau. Il explique que l'écoulement « récupère » ainsi son intensité après avoir été ralenti par les macro-rugosités. Bourtal (2012) analyse ensuite les champs de vitesses instationnaires de l'écoulement en présence de macro-rugosités à partir desquels il retrouve les trois phases caractéristiques de l'écoulement sans macro-rugosité (Tarrade *et al.*, 2011). L'activité tourbillonnaire s'avère être moins intense et l'alimentation de la zone tourbillonnaire supérieure est sujette à des vitesses moins importante.

Bourtal (2012) a étudié l'écoulement généré dans une passe à poissons, dans laquelle un seul cylindre (configuration de Tarrade (2007)), puis trois cylindres, sont placés dans le jet. Il a défini les positions optimales de ces cylindres en utilisant la méthode du gradient conjugué sur des fonctions objectifs définies pour 4 grandeurs physiques caractérisant l'écoulement : la norme de la vitesse ($\|V\|_{2D}$), l'énergie cinétique turbulente 2D (k_{2D}), la dissipation (ε) et la vorticité sur Z (ω_z). La méthode du gradient conjugué détermine la direction de recherche du minimum en se basant sur le gradient de la fonction objectif. L'auteur a effectué des simulations numériques 2D dans lesquelles il a placé le cylindre à différentes positions dans le bassin. Il a ensuite appliqué l'algorithme, ce qui lui a permis de déterminer la position optimale du cylindre qui minimise chacune des grandeurs physiques étudiées (le signe de la dissipation a été inversé pour s'adapter à l'algorithme de minimisation). L'auteur en déduit que la position optimale de l'obstacle se situe en $X/b=1,53$ et $Y/b=3,18$ pour $B/b=9$ et en $X/b=1,46$ et $Y/b=3,17$ pour $B/b=6,67$. Ce traitement a été effectué également pour optimiser les positions de trois cylindres dans le bassin.

Bourtal (2012) a ensuite procédé à des mesures par PIV dans le but de vérifier et valider les positions optimales des cylindres dans le bassin. L'étude de l'instationnarité de l'écoulement a également été menée par l'auteur puis de manière plus poussée par Calluaud *et al.* (2014), également en PIV. Les cylindres modifient la distribution spatiale des quantités turbulentes et permettent de réduire l'intensité de la vitesse moyenne et de la turbulence dans les bassins de la passe à poissons. La présence d'un cylindre permet également de stabiliser la dynamique instationnaire de l'écoulement. Pour deux largeurs de bassins ($B/b=9$ et $B/b=6,67$), les auteurs ont calculé les moyennes spatiales 2D (  partir des champs PIV dans un bassin) de la vitesse $\langle \bar{U} \rangle$, de l'énergie cinétique turbulente dans le plan $\langle k_{uv} \rangle$ et de la vorticité (hors plan) $\langle |\bar{\omega}| \rangle$ dans les configurations avec et sans cylindre. Ils ont montré que la moyenne spatiale de la vitesse dans un bassin $\langle \bar{U} \rangle$ était réduite de 31,9% en grande largeur ($B/b=9$) et de 22,8% en petite largeur ($B/b=6,67$) avec l'ajout d'un cylindre. Pour la plus grande largeur de bassin, la présence d'un cylindre permet de diminuer l'énergie cinétique turbulente $\langle k_{uv} \rangle$ et la vorticité $\langle |\bar{\omega}| \rangle$ respectivement de 10% et 26%. Cette diminution est légèrement moins importante pour $B/b=6,67$ mais reste cependant du même ordre de grandeur qu'avec la plus grande largeur de bassin. Pour quantifier l'effet d'un cylindre sur les paramètres hydrodynamiques locaux, Calluaud *et al.* (2014) ont défini 4 zones dans chacune des configurations en grande largeur (Figure I-33) et petite largeur (Figure I-34).

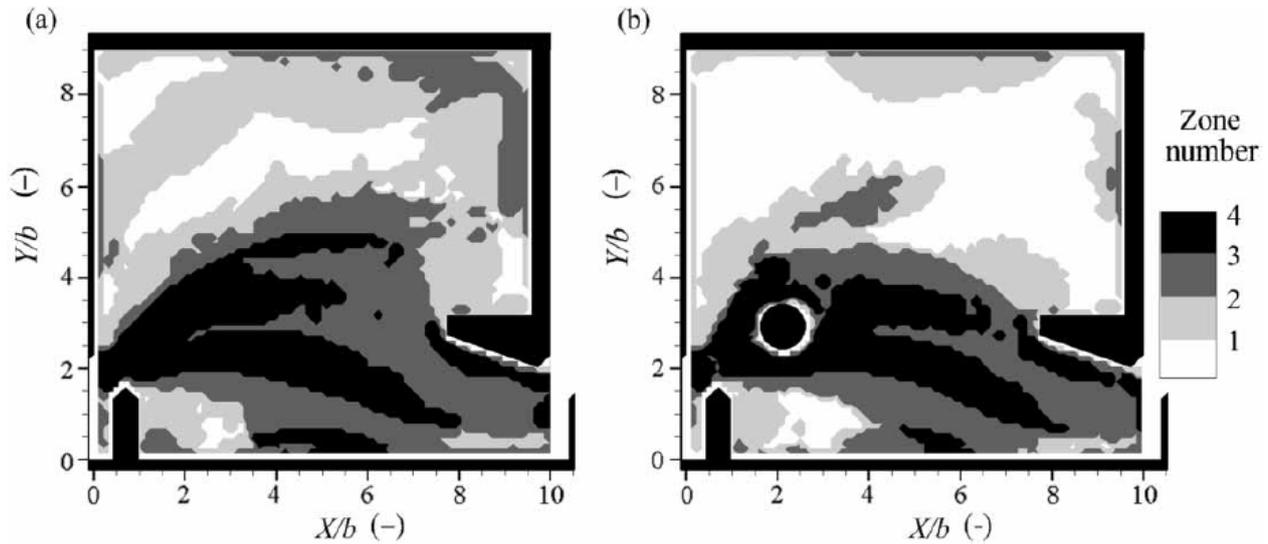


Figure I-33. Représentation des 4 zones d'écoulement définies par Calluaud *et al.* (2014) dans la configuration sans cylindre (a) et avec cylindre (b) pour $B/b=9$.

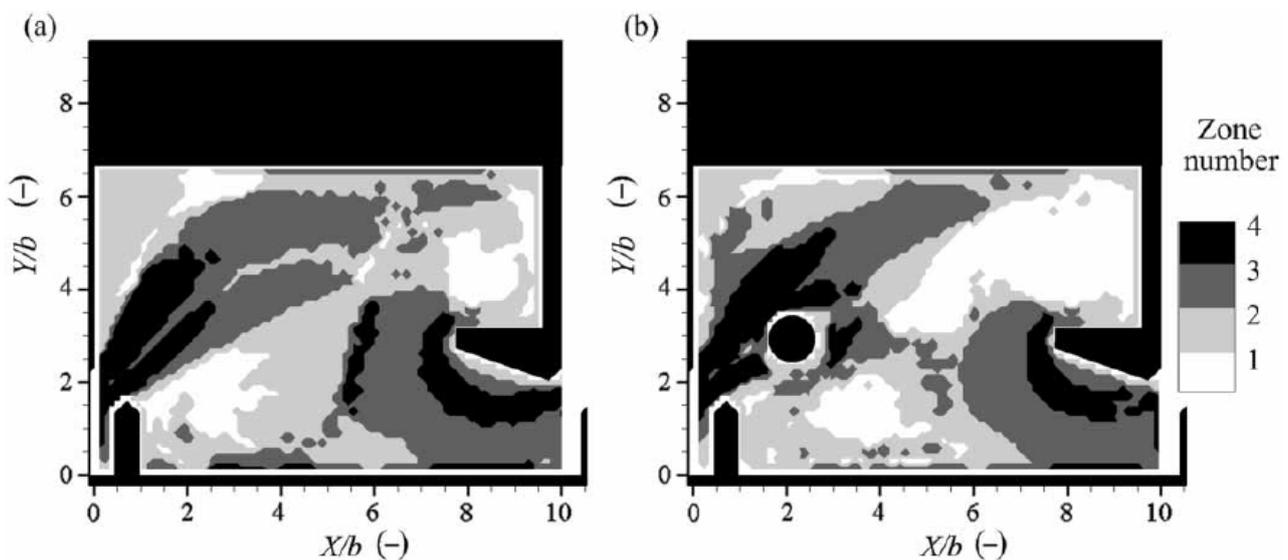


Figure I-34. Représentation des 4 zones d'écoulement définies par Calluaud *et al.* (2014) dans la configuration sans cylindre (a) et avec cylindre (b) pour $B/b=6,67$.

Chaque zone est définie à partir de la comparaison de \bar{U} , $\sqrt{k_{uv}}$ et $|\bar{\omega}|$ avec leurs valeurs moyennes spatiales $\langle \bar{U} \rangle$, $\langle k_{uv} \rangle$ et $\langle |\bar{\omega}| \rangle$ calculées dans la configuration sans cylindre. La zone 1 caractérise la région du bassin pour laquelle la vitesse de l'écoulement \bar{U} , l'énergie cinétique turbulente $\sqrt{k_{uv}}$ et la vorticité $|\bar{\omega}|$ sont toutes en dessous de leurs valeurs moyennes spatiales (valeurs seuils en configuration sans cylindre). Cette zone peut être considérée comme étant la plus favorable pour le passage des poissons. Dans les zones 2 et 3, respectivement une seule et deux de ces trois quantités dépassent leurs valeurs seuils, ce qui peut entraîner une fatigue ou une désorientation du poisson. Enfin dans la zone 4, toutes les quantités \bar{U} , $\sqrt{k_{uv}}$ et $|\bar{\omega}|$ sont supérieures aux valeurs seuils. Dans cette zone, l'écoulement peut être imprévisible pour le poisson. L'ajout d'un cylindre dans l'écoulement permet d'augmenter la surface occupée par la zone 1 en réduisant celle des zones 2, 3 et 4 dans lesquelles l'écoulement est plus intense.

Des tests biologiques avec des poissons (truites et chevesnes) ont également été menés par Calluaud *et al.* (2014) et une concordance a été remarquée entre les zones de repos utilisées par les poissons et les zones où les grandeurs cinématiques étaient réduites. La diminution de ces grandeurs cinématiques a favorisé la stabulation des poissons dans les zones de repos et a permis d'augmenter l'efficacité locale de la passe à poissons.

I.2 L'écoulement au-dessus d'obstacles en canal

I.2.1 Ecoulement au-dessus d'un seuil rectangulaire

L'écoulement au-dessus d'un seuil disposé dans la fente d'une passe à poissons a été très peu étudié. *Clay (1961)* et *Rajaratnam et al. (1986)* ont remarqué que la présence d'un seuil pouvait modifier la structure de l'écoulement. *Clay (1961)* a observé que le seuil permettait d'orienter le jet vers la paroi opposée à la fente, évitant ainsi le phénomène de court-circuit pouvant exister lorsque les parois des bassins ne sont pas munies de déflecteurs. *Rajaratnam et al. (1986)* ont fait des mesures de topologie dans une passe à poissons munie de seuils (hauteur de seuil h_s par rapport à la largeur de la fente b : $h_s/b=0,5$) et ont observé une courbure plus prononcée du jet sortant de la fente amont (design 2 de la figure I-1).

L'écoulement en déversoir est un des écoulements dont les caractéristiques sont proches de l'écoulement au-dessus des seuils insérés dans les fentes d'une passe à poissons. Il existe une littérature très fournie sur l'étude de l'écoulement en déversoir dont l'une des premières études publiées remonte à la fin du XIXe siècle (*Bazin, 1898*). D'autres études ont suivi au cours de la première moitié du XXe siècle, visant essentiellement à définir les coefficients de débit associés à ce type d'écoulement (*Villemonte, 1947* ; *Skogerboe et al., 1967*).

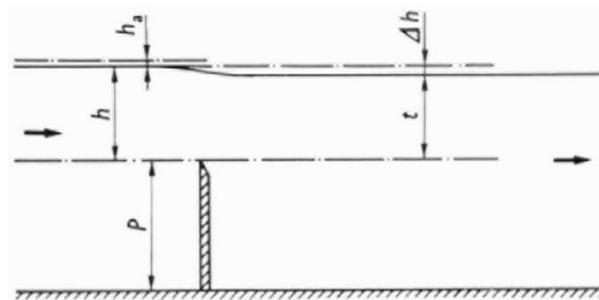


Figure I-35. Ecoulement par-dessus un déversoir rectangulaire à crête mince noyé sous une grande hauteur d'eau (*Rajaratnam & Muralidhar, 1969*).

Une étude de *Rajaratnam et Muralidhar (1969)* s'intéresse à la mécanique des écoulements générés en aval des déversoirs à crêtes minces noyés sous une grande hauteur d'eau. Ces auteurs ont réalisé des mesures de hauteurs d'eau grâce à une pointe de mesure et des mesures de vitesses avec un micro-moulinet. Les essais ont été réalisés dans un canal plan rectangulaire en plexiglas d'une largeur de 45 cm, d'une hauteur de 90 cm et d'une longueur de 4,9 m. Les expériences ont été menées sur deux déversoirs de hauteur $P=10$ cm et 30 cm.

La figure I-35 représente les caractéristiques de l'écoulement. Les auteurs ont défini la submersion relative comme étant le rapport t/h . Ils ont remarqué qu'au moment où le jet franchissait le seuil qui constitue le déversoir, il se créait un mouvement ascendant des lignes de courant basses suivi par une baisse du niveau de la surface de l'eau.

Ils ont ensuite étudié les vitesses de l'écoulement et caractérisé la valeur de la vitesse maximale à partir de l'équation de Bernoulli ainsi que la distance à laquelle elle était atteinte après le déversoir ($x/t=1$).

Ces auteurs se sont aussi intéressés à la longueur de la zone de recirculation située en aval du déversoir.

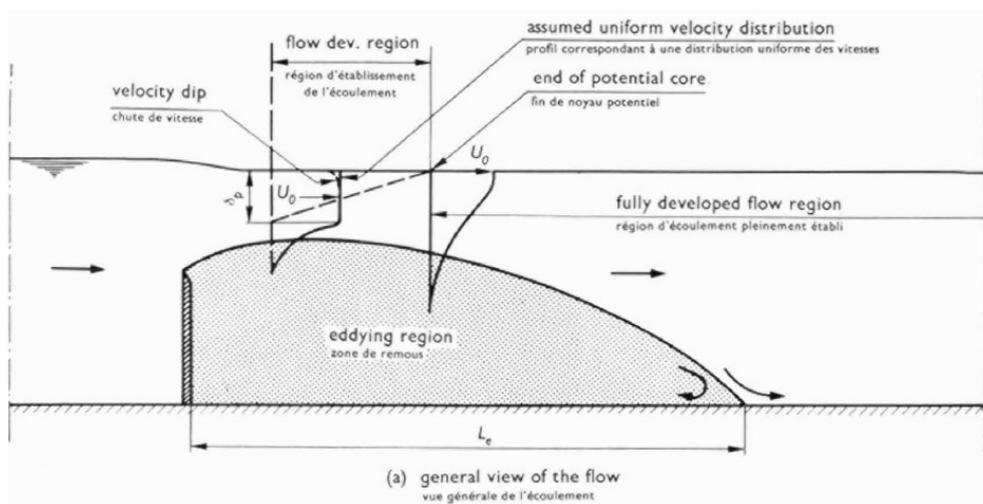


Figure I-36. Vue générale de l'écoulement (Rajaratnam & Muralidhar, 1969).

Ils ont montré que pour une hauteur d'eau moyenne relative $(h+t)/(2.P)$, la longueur relative L_e/P de cette zone de recirculation était à peu près constante et voisine de 8,5 (Figure I-36). Les profils de vitesses ont également été étudiés au-dessus de zone. L'épaisseur de frottement (δ_3) et l'épaisseur caractéristique (δ_1) ont été introduites pour décrire les profils de vitesses (Figure I-37).

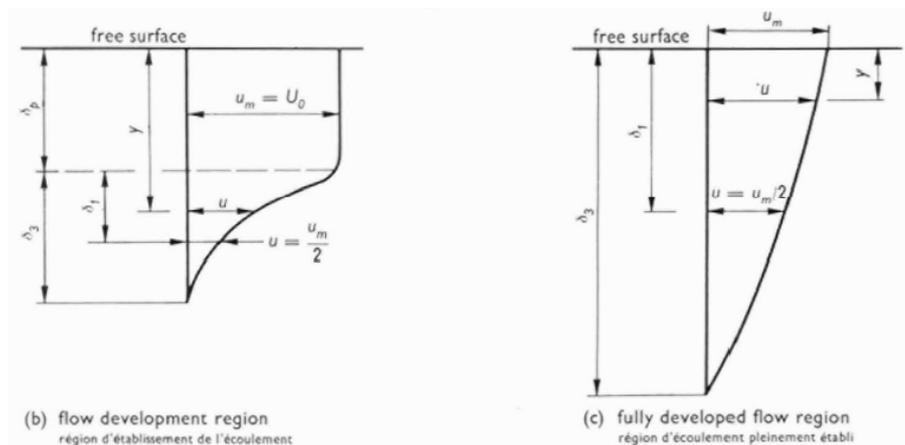


Figure I-37. Profils de vitesses (Rajaratnam & Muralidhar, 1969).

En 1996, la même équipe (Wu *et al.*, 1996) s'est intéressée aux différents régimes d'écoulement qui se produisent au niveau des déversoirs submergés à crêtes minces. Ils ont divisé les écoulements générés en deux catégories : les jets de surface et les jets plongeants (Figure I-38).

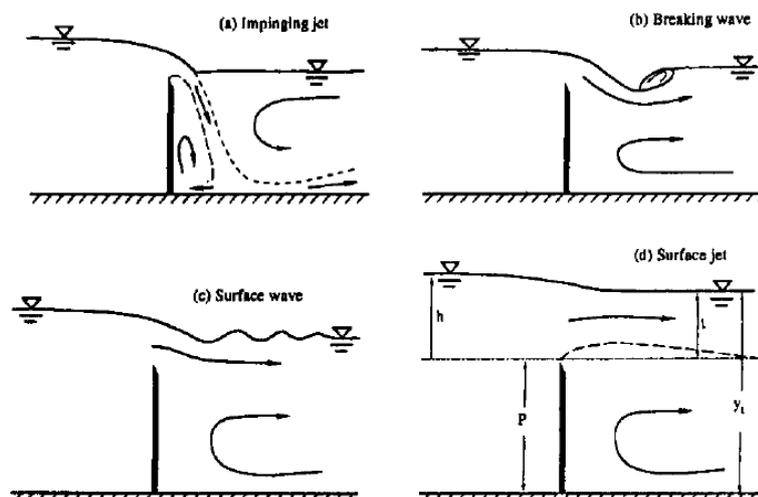


Figure I-38. Régimes pour des déversoirs rectangulaires à crêtes minces : a) jet incident ; b) vague déferlante ; c) vague ondulante ; d) jet de surface (Wu *et al.*, 1996).

Ils ont défini le paramètre $\lambda = \sqrt{g(h-t)}/(q/y_t)$ avec g l'accélération de la pesanteur, h la hauteur d'eau en amont et au-dessus du seuil, q le débit unitaire, t la hauteur d'eau au-dessus du seuil à l'aval, et y_t le niveau d'eau à l'aval.

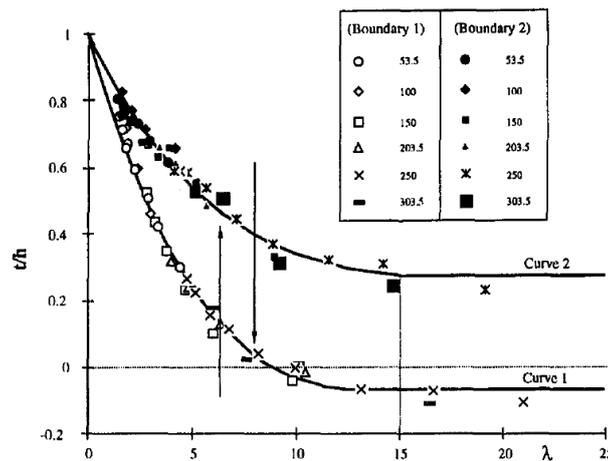


Figure I-39. Frontières entre les régimes d'écoulement. Au-dessus de la courbe 2 : jet de surface ; en dessous de la courbe 1 : jet plongeant ; entre les deux ; zone de transition (Wu *et al.*, 1996).

À partir de mesures de hauteurs d'eau réalisées grâce à des capteurs piézométriques et de visualisations des circulations par injection de colorant, ils ont développé un abaque permettant de prédire l'apparition de ces régimes en fonction de λ et t/h la submersion relative (Figure I-39).

D'autres auteurs (Agelinchaab *et al.*, 2008) se sont intéressés à la caractérisation des grandeurs moyennes et turbulentes de l'écoulement, dans un canal ouvert, derrière un bloc de forme rectangulaire, carrée ou semi-circulaire (Figure I-40).

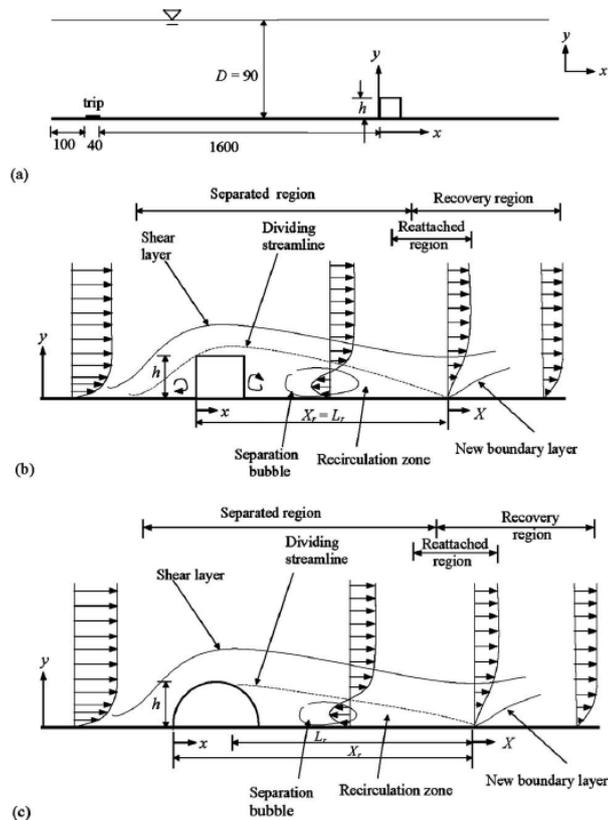
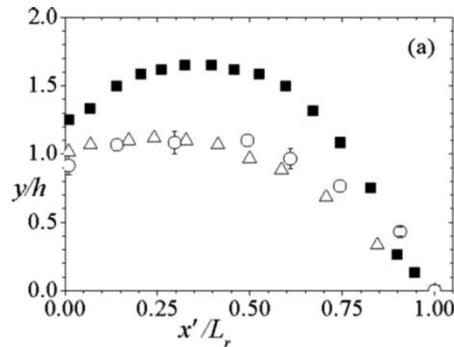


Figure I-40. Schéma de l'installation expérimentale et des systèmes de coordonnées associées. a) vue de côté de la zone d'essais ; b) et c) esquisses montrant les différentes régions de l'écoulement derrière respectivement le bloc carré et le bloc semi-circulaire. X_r est la longueur de rattachement et L_r la longueur de la bulle de séparation (Agelinchaab *et al.*, 2008).

Ils ont utilisé pour cela la technique de vélocimétrie par image de particules (PIV). Le canal en Plexiglas dans lequel les mesures ont été effectuées avait une longueur de 2,5 m, une largeur et une hauteur de 0,2 m. Les blocs testés ont une hauteur de 6 mm. La vitesse de l'écoulement en amont est de $0,315 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et le nombre de Reynolds est de 1800.

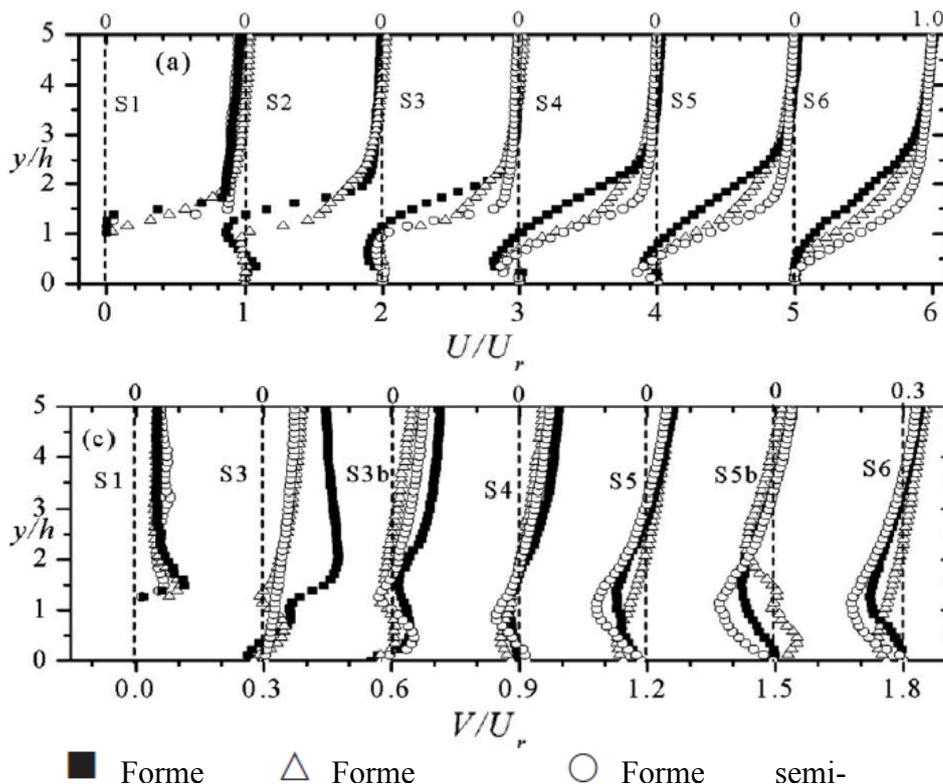
Ils ont obtenu les positions sur y de la ligne de courant séparatrice dans la région de recirculation en fonction de x pour les différentes formes de blocs (Figure I-41).



Symbols: square block, ■; semicircular block, ○; rectangular block, △.

Figure I-41. Evolution de la position de la ligne de courant séparatrice dans la région de recirculation en fonction de la forme des blocs. x' est dans la direction de l'écoulement et à son origine au point de décollement. h est la hauteur du bloc (Agelinchaab *et al.*, 2008).

Ils ont étudié l'évolution des profils de vitesses dans la zone de recirculation, mais également les grandeurs caractéristiques telles que l'intensité turbulente ou encore les contraintes de Reynolds. Les positions SA, SB, SC, SD, SE et SF correspondent respectivement à $X/h=2, 4, 6, 10, 20$ et 30 (Figure I-42).



■ Forme △ Forme ○ Forme semi-

Figure I-42. Profils de vitesses moyenne U (a) et V (b) à différentes positions dans la région de recirculation et pour les trois formes de bloc (Agelinchaab *et al.*, 2008).

Il ressort notamment de cette étude que la courbure de la ligne de courant séparatrice est plus importante pour la forme carrée plutôt que rectangulaire ou semi-cylindrique. Il en résulte une interaction plus intense entre les couches de cisaillement derrière le bloc de forme carrée. Les

contraintes de Reynolds augmentent rapidement le long de la ligne séparatrice et décroît également rapidement à l'approche du point de rattachement.

I.2.2 Ecoulement de parois et de canopée

La canopée est habituellement définie comme étant la partie supérieure des forêts en contact avec l'atmosphère. L'écoulement qui existe à l'intérieur et au-dessus d'une canopée végétale ou urbaine (formée par les buildings) est étudié depuis de nombreuses années, notamment pour comprendre et prédire la dispersion de polluants. Ce type d'écoulement est également étudié d'un point de vue hydraulique dans les rivières dans le but de prévenir l'affouillement des lits. De nombreuses études ont été réalisées pour caractériser l'écoulement au niveau de la couche limite turbulente atmosphérique (McDonald, 1998 ; Jimenez, 2004 ; Cheng *et al.*, 2002b ; Castro, 2007) et en rivière (Flack *et al.*, 2005 ; Manes *et al.*, 2007 ; Pokrajac *et al.*, 2007). Contrairement à un écoulement de type atmosphérique, la présence de la surface libre dans le cas d'un écoulement de type rivière génère un gradient de pression non nul limitant l'extension de la couche limite. Les lois de similarités (loi logarithmique et loi déficitaire de vitesse) sont cependant vérifiées dans les deux cas, ce qui les rend comparables.

I.2.2.a Les écoulements sur parois lisses

Dans un écoulement turbulent, la turbulence est générée par la condition de non glissement existant à la paroi ($U=0$), créant une zone de cisaillement qui induit de la vorticité dans l'écoulement. Il se développe alors un écoulement de couche limite, caractérisé par la présence de trois zones où le cisaillement et le profil de vitesse U sont très différents : la sous-couche visqueuse, la sous-couche inertielle et la couche externe. Très près de la paroi, les fluctuations de la vitesse normale (w') sont bloquées et les transferts de quantité de mouvement dus à la turbulence deviennent négligeables. Ainsi dans cette première zone appelée sous-couche visqueuse, la contribution de la viscosité moléculaire représentée par le tenseur des contraintes visqueuses $\mu \frac{dU}{dz}$, prédomine sur les contraintes turbulentes $-\rho \overline{u'w'}$ dans la tension totale de cisaillement τ_t défini par :

$$\tau_t = -\rho \overline{u'w'} + \mu \frac{dU}{dz} \quad (\text{eq.I-20})$$

Deux échelles de longueurs sont habituellement définies pour étudier les phénomènes dans la couche limite. La première, δ_v , doit rendre compte des effets visqueux qui sont prépondérants en proche paroi. Elle est donc définie telle que $\frac{u_\tau \delta_v}{\nu} = 1$ soit $\delta_v = \frac{\nu}{u_\tau}$ avec u_τ la vitesse de frottement pariétale et ν la viscosité cinématique du fluide. L'adimensionnement de la distance à la paroi y par cette échelle de longueur fait apparaître un nombre qui s'apparente à un nombre de Reynolds local : $y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu}$. La seconde échelle de longueur, δ , correspond à l'épaisseur de la couche limite et permet d'étudier les phénomènes loin de la paroi. La distance adimensionnée normale à la paroi utilisée à cette échelle est $\eta = \frac{y}{\delta}$. La valeur du nombre de Reynolds de la turbulence R_τ basée sur la vitesse de frottement permet de définir le domaine d'application de chacune de ces échelles. L'échelle δ_v s'applique à la région dite « interne » ($\eta \leq 0,01$ pour $R_\tau = 10^4$) tandis que l'échelle δ s'applique à la région dite externe ($y^+ \geq 100$ pour $R_\tau = 10^4$) (Figure I-43).

Dans la sous-couche visqueuse ($y^+ \leq 7$), la vitesse adimensionnée $u^+ = \frac{U}{u_\tau}$ varie linéairement en fonction de la distance à la paroi y^+ .

Lorsque $y^+ > 30$, c'est la sous-couche inertielle. La viscosité n'affecte plus de manière significative l'écoulement et le profil de vitesse devient logarithmique et peut être exprimé en variable interne par :

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(y^+) + C \quad (\text{eq.I-21})$$

avec $\kappa = 0,41$ la constante de Von Karman et C un coefficient de l'ordre de 5 (Chassaing, 2000).

En variable externe, le profil logarithmique (appelé loi de vitesse déficitaire) s'exprime sous la forme :

$$\frac{U - U_E}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(\eta) + B \quad (\text{eq.I-22})$$

avec U_E la vitesse de raccordement à la solution externe et B un coefficient de l'ordre de -2,5.

Dans cette sous-couche inertielle, les effets visqueux sont négligeables et seules les tensions de Reynolds participent au cisaillement. D'autre part, la diffusion d'énergie cinétique turbulente est très faible devant la production et la dissipation. Elle est également appelée zone de recouvrement en raison du raccordement des lois logarithmiques des échelles internes et externes. La transition entre la sous-couche visqueuse et la zone logarithmique ($7 \leq y^+ \leq 30$) est appelée zone tampon. C'est au sein de cette zone que la production d'énergie cinétique turbulente atteint son maximum, pour approximativement $y^+ \cong 12$, distance à laquelle les contraintes visqueuses et turbulentes sont égales.

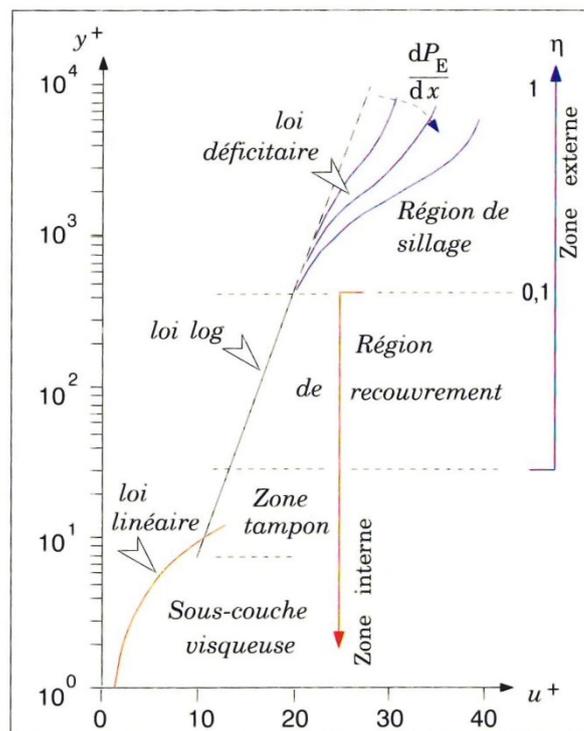


Figure I-43. Différentes régions d'une couche limite turbulente (Chassaing, 2000).

Suffisamment loin de la paroi ($\eta \cong 0,01$ pour $R_\tau = 10^4$), le profil de vitesse longitudinal dévie de la loi de vitesse logarithmique. Une correction est alors appliquée, appelée loi de sillage, définie par :

$$\frac{U - U_E}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(\eta) + \frac{\Pi}{\kappa} \cdot W(\eta) + 2 \cdot \frac{\Pi}{\kappa} \quad (\text{eq.I-23})$$

avec $W(\eta) = 2 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \eta\right)$ le terme de sillage et Π le paramètre de sillage également appelé paramètre de Coles.

1.2.2.b Les écoulements sur canopée rigide

Pour décrire les écoulements sur parois rugueuses, les paramètres de parois telles que la longueur de déplacement d et la longueur de rugosité z_0 sont introduits. L'objectif de l'utilisation de ces paramètres est de retrouver les lois de similarité qui caractérisent habituellement l'écoulement de couche limite sur fond lisse. L'étude de l'influence des fonds rugueux sur les profils de vitesses verticaux est souvent menée en définissant un repère lié à la hauteur de déplacement d induite par la rugosité elle-même (Raupach *et al.*, 1991). Les lois logarithmiques et déficitaires étant décalées de d vers la surface libre, ce changement de repère permet de conserver la similarité des profils moyens et turbulents loin de la paroi (Schlichting & Gersten, 2000). Ce déplacement d peut être considéré comme étant une sorte de fond virtuel pour les grandes structures turbulentes (Nikora *et al.*, 2002). La définition de cette hauteur de déplacement n'est pas universelle. La méthode la plus employée pour estimer la valeur de d et la longueur de rugosité z_0 consiste à ajuster la loi logarithmique au profil de vitesse moyenne (Cheng & Castro, 2002b ; Moulin *et al.*, 2008).

La couche limite qui se développe au-dessus d'une canopée peut-être divisée en deux sous-couches : la sous-couche rugueuse (z_{RS}), à proximité des rugosités et la couche externe (Figure I-44).

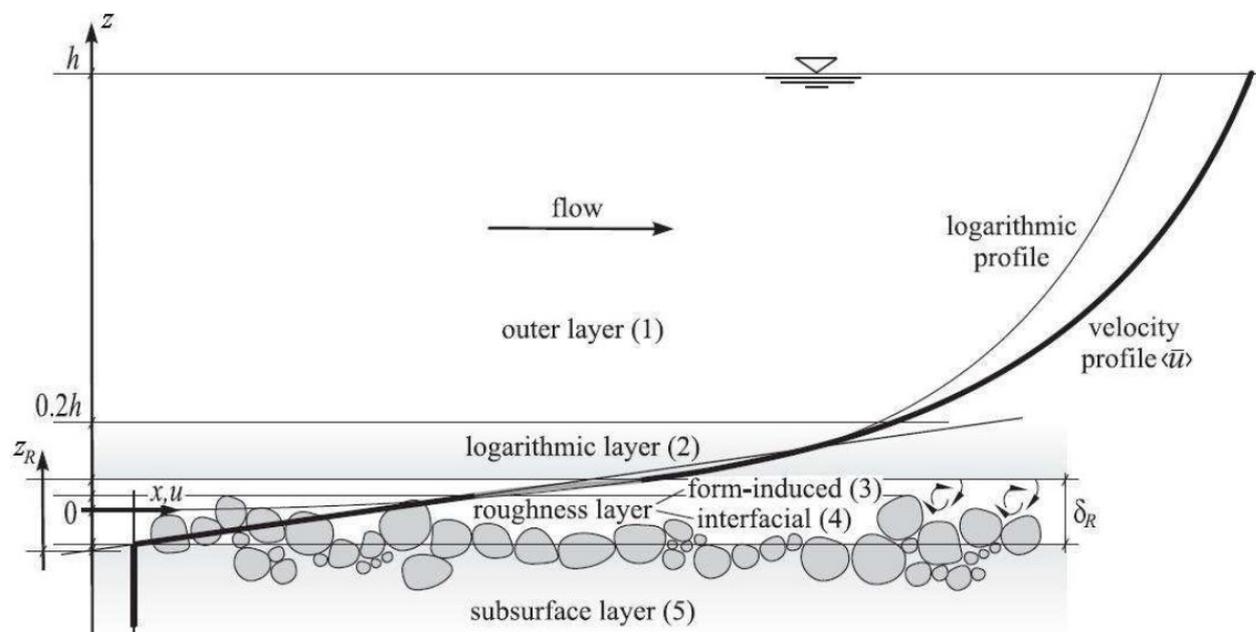


Figure I-44. Couche limite turbulente rugueuse dans le cas d'une rivière (Detert, 2008).

L'écoulement dans la sous-couche rugueuse subit de fortes inhomogénéités dues à la présence des macro-rugosités. C'est donc souvent à partir de l'étude de la dispersion spatiale des grandeurs cinématiques de l'écoulement qu'est définie la frontière supérieure de cette sous-couche. À l'heure actuelle, il n'existe pas de critères universels permettant de la délimiter précisément. Dans la littérature des couches limites atmosphérique et de rivière, la sous-couche rugueuse est habituellement définie entre $2h_r$ et $5h_r$, h_r étant la hauteur de rugosité.

Pour étudier l'écoulement à l'intérieur et au-dessus d'une canopée, la plupart des auteurs (Cheng & Castro, 2002b ; McDonald, 2000 ; Florens, 2010 ; Rouzes, 2015) utilisent le concept de double moyenne définie par Raupach *et al.* (1991). Ainsi, la dispersion spatiale des grandeurs turbulentes moyennées temporellement peut être éliminée.

La double moyenne consiste à effectuer une moyenne spatiale sur les grandeurs déjà moyennées temporellement. C'est une moyenne dite intrinsèque, s'opérant sur de fines couches de fluide (V_f), parallèles au fond, dans des plans (X, Y). Les grandeurs turbulentes de l'écoulement peuvent ainsi être décomposées suivant une décomposition de Reynolds modifiée :

$$f^*(\vec{X}, t) = F(\vec{X}, t) + f(\vec{X}, t) = \langle F \rangle(z) + \hat{F}(\vec{X}) + f(\vec{X}, t) \quad (\text{eq.I-24})$$

f^* désigne une grandeur instantanée, F une grandeur moyennée temporellement et f une fluctuation temporelle. Les crochets « $\langle \rangle$ » représentent la moyenne spatiale (effectuée sur X et Y) et l'accent circonflexe « $\hat{}$ » la fluctuation spatiale par rapport à la double moyenne d'une grandeur moyennée temporellement.

Florens (2010) de l'Université de Toulouse a étudié expérimentalement la structure de la couche limite turbulente sur des macro-rugosités en canal ouvert. L'auteure a caractérisé l'influence du nombre de Froude (F_r), du confinement ($\alpha_c = \frac{h_r}{D}$ avec D la hauteur de la surface libre) et de la densité frontale (λ) des macro-rugosités sur la similarité de la couche externe. La densité frontale λ est définie comme le rapport de l'aire frontale (surface exposée à l'écoulement) sur l'aire caractéristique (d'un motif). Les macro-rugosités utilisées par l'auteure étaient des cubes de 20 mm de côté.

Pour cela, Florens (2010) a effectué des mesures de PIV (Particle Image Velocimetry) dans un canal hydraulique de 20 m de long, 1,1 m de large et 0,5 m de profondeur dont les parois sont successivement composées de verre et de plexiglas (Figure I-45).



Figure I-45. Canal hydraulique (Florens, 2010).

L'auteure a étudié deux configurations homogènes de rugosités. La première (S_1) est constituée de cubes alignés, la seconde de cubes en décalés (S_2) (Figure I-46). Dans les configurations S_1 et S_2 , les densités frontales λ sont respectivement égales à 0,2 et 0,4.

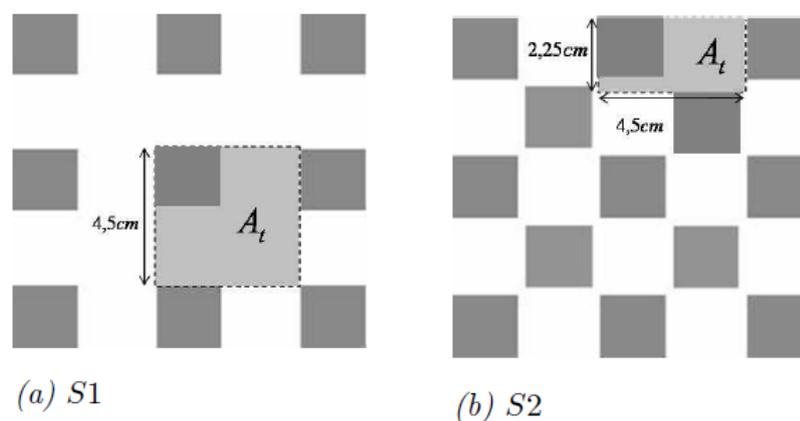


Figure I-46. Configurations de rugosités homogènes étudiées par Florens (2010). a) configuration de cubes alignés S_1 ; b) configuration de cubes en décalés S_2 .

Florens (2010) a utilisé la méthode de la double moyenne pour caractériser la couche limite développée au-dessus des macro-rugosités. Elle a ainsi effectué des mesures de PIV sur plusieurs plans verticaux et horizontaux, en ayant recours à des plots « espions » constitué de miroirs pour capter l'écoulement dans la canopée (Figure I-47).

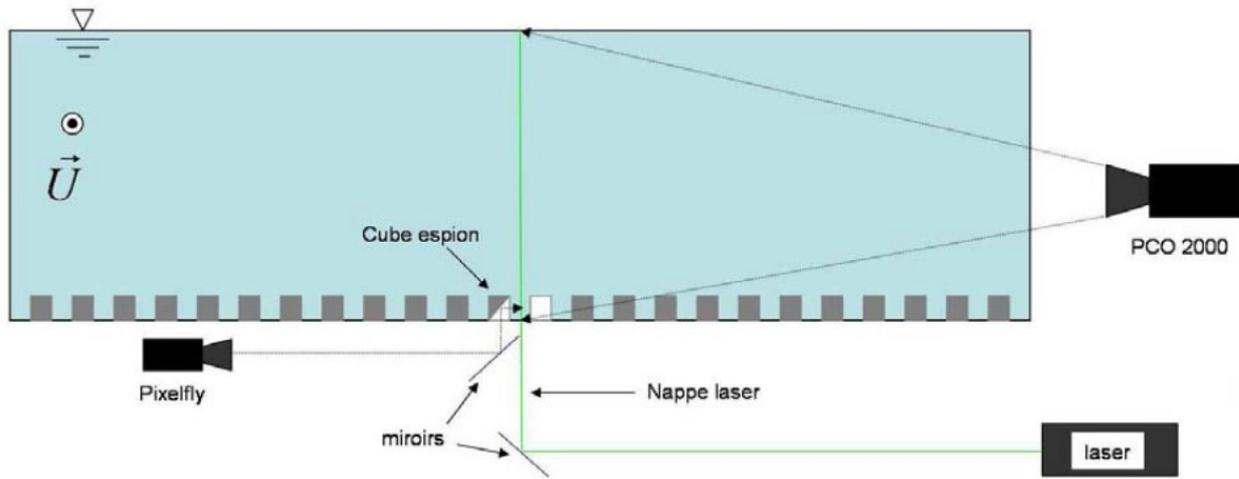


Figure I-47. Schéma du principe d'acquisition des plans verticaux (Florens, 2010).

La définition de la hauteur de la sous-couche rugueuse z_{RS} n'est pas universelle, tous les auteurs de la littérature ne se basent pas sur les mêmes caractéristiques d'écoulement pour la définir. Pour Rotach (1999), elle est définie comme étant la hauteur à laquelle les tensions de Reynolds sont maximales. Manes *et al.* (2007) l'identifient plutôt à la hauteur à laquelle les variations spatiales des quantités statistiques moyennées en temps de l'écoulement deviennent négligeables (<5%). En règle générale, z_{RS} est comprise entre $2h$ et $5h$, avec h la hauteur de rugosités.

Florens (2010) a mis en place une nouvelle méthode pour évaluer la hauteur de la sous-couche rugueuse z_{RS} . Pour cela, l'auteure calcule la dispersion spatiale D_s , qui correspond à l'écart-type à la double moyenne d'une quantité φ moyennée temporellement :

$$D_s = \left(\left(\frac{1}{np} \right) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (\langle \bar{\varphi} \rangle - \bar{\varphi}_{ij})^2 \right)^{1/2} \quad (\text{eq.I-25})$$

avec les indices i et j correspondant respectivement à la direction longitudinale X et transversale Y , n et p le nombre de valeurs respectivement suivant X et Y , $\langle \bar{\varphi} \rangle$ une quantité doublement moyennée et $\bar{\varphi}_{ij}$ une quantité moyennée temporellement.

L'auteure définit cette dispersion spatiale D_s comme étant égale approximativement à la somme de l'erreur de convergence temporelle D_{conv} et de la dispersion liée aux rugosités D_{rugo} . En considérant que $D_s = D_{conv}$ dans la partie supérieure de l'écoulement et en remarquant que D_{conv} varie linéairement en fonction de $\langle \bar{u}^2 \rangle$, elle extrapole D_{conv} jusqu'au sommet de la canopée et la retranche à D_s pour obtenir D_{rugo} . Elle peut alors définir z_{RS} comme étant la zone où la valeur normalisée de D_s est supérieure à 5%.

L'auteure a exposé cette méthode de détermination dans un article (Florens *et al.*, 2013) et a montré que la sous-couche rugueuse est de manière générale surestimée dans la littérature. Elle a notamment étudié l'influence du choix de la grandeur statistique utilisée pour la détermination de D_s (Figure I-48).

Pour une valeur seuil égale à 5% de la valeur normalisée de D_s , $\frac{z_{RS}}{h}$ est comprise entre 1,1 et 1,25. En prenant une valeur seuil de 1%, $\frac{z_{RS}}{h}$ peut atteindre 1,5 mais reste inférieure à la limite basse de $\frac{z_{RS}}{h} = 2$ habituellement définie dans la littérature.

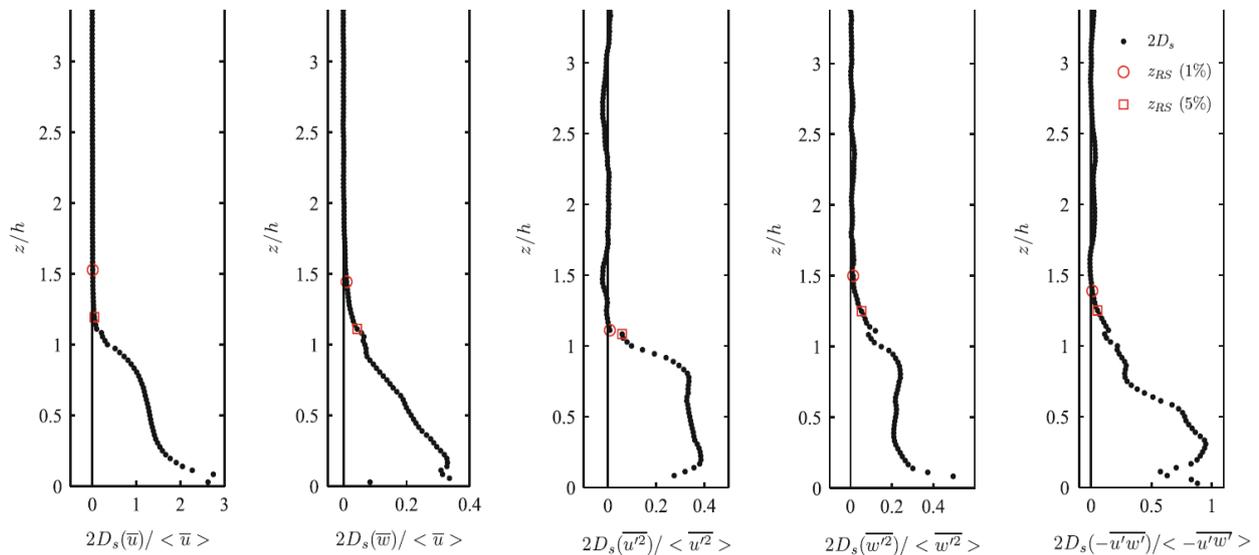


Figure I-48. Dispersion spatiale D_s normalisée, calculée pour différentes grandeurs statistiques représentatives de l'écoulement moyen et de la turbulence (Florens *et al.*, 2013).

L'étude menée par Florens (2010) a permis de montrer que le nombre de Froude ainsi que la densité des rugosités n'avaient aucune influence sur la structure de l'écoulement au-dessus de la canopée. En revanche, un changement de densité modifie significativement l'écoulement moyen dans la canopée avec l'établissement d'une recirculation dans toute la cavité inter-cube (configuration S2, Figure I-46). L'auteure a notamment mis en évidence que la sous-couche rugueuse ne dépendait pas uniquement de la géométrie mais également de l'état de confinement de la couche limite. Ce point a ensuite été étudié par Rouzes (2015) qui a observé que la hauteur de la sous-couche rugueuse augmentait avec le confinement et pouvait occuper toute la colonne d'eau dans le cas d'une faible submersion ($\alpha_c=0,66$). D'autre part, quel que soit le confinement, la loi logarithmique existe et son étendue augmente lorsque la submersion diminue.

1.2.2.c Les écoulements sur canopée flexible

La présence d'une végétation aquatique, ou canopée végétale, joue un rôle majeur dans les écoulements en rivière, en chenal ou dans les régions côtières. Elle permet, entre autre, d'améliorer la qualité de l'eau par l'absorption de nutriments et la production d'oxygène (Luhar *et al.*, 2008). Une propriété intéressante également fait l'objet d'études récentes et concerne la bio-dépollution des cours d'eau grâce à l'utilisation de végétaux supérieurs dans un but de dépollution (phytoremédiation) (Remon, 2006). La végétation constitue également une protection des berges en amortissant les vagues générées lors des tempêtes ou du passage des bateaux dans les chenaux. Dans les rivières cependant, la présence des végétaux constitue également une source de résistance à l'écoulement, favorisant ainsi les inondations. De nombreux travaux ont ainsi été menés pour évaluer la résistance à l'écoulement dans le but d'améliorer la gestion des cours d'eau.

L'une des premières études expérimentales sur une végétation flexible (en plastique) en canal à surface libre a été menée par Kouwen et Unny (1973). Les auteurs ont montré l'existence d'un profil de vitesse logarithmique au-dessus de la canopée grâce à des mesures effectuées à l'aide d'une sonde Pitot. Ils ont également établi une classification du comportement des rugosités : rigide immobile (« erect »), ondulatoire (« swaying ») ou couchée par le courant (« prone »). Kouwen et Li (1980) ont également remarqué que la configuration dans laquelle les structures se couchent est atteinte à partir d'une valeur de vitesse de cisaillement critique (u_c^*). Ils ont proposé une estimation de cette vitesse en fonction du produit de la concentration M (nombres de tiges par unités de surface) et de la rigidité flexionnelle EI , avec E le module d'Young et I le moment quadratique d'une tige, dans le cas de déformations élastiques (eq.I-26) :

$$u_c^* = 0,028 + 6,33.M.E.I^2 \quad (\text{eq.I-26})$$

et dans le cas de déformations plastiques (pour les plus grandes structures végétales) (eq.I-27) :

$$u_c^* = 0,23.M.E.I^{0,106} \quad (\text{eq.I-27})$$

En réponse à un écoulement stationnaire, la végétation aquatique submergée peut présenter une ondulation progressive, synchrone de large amplitude appelée « *monami* » (Ackerman & Okubo, 1993). Ce type de comportement s'insère dans la classification entre le comportement ondulatoire, pour lequel les structures oscillent indépendamment les unes des autres et le comportement où les structures sont couchées.

L'influence de l'immersion totale ou de l'émergence de structures flexibles sur les grandeurs caractéristiques de la turbulence et sur la structure de l'écoulement moyen a été étudiée plus tard par Nepf et Vivoni (2000). Ces auteurs ont effectué des mesures de vitesses à l'intérieur et au-dessus d'une canopée de plantes en plastiques avec une sonde acoustique à effet Doppler (ADV) et un vélocimètre laser à effet Doppler (LDV). Chaque modèle de plante était constitué de 6 fines feuilles en vinyle d'une largeur de 0,3 cm, d'une épaisseur de 0,025 cm et d'une hauteur de 16 cm. Ces feuilles étaient regroupées dans une même tige d'un diamètre de 0,64 cm et distribuées aléatoirement sur une plaque en PMMA de 7,4 m de long dans un canal expérimental en verre d'une longueur de 24 m et de 38 cm de large (Figure I-49). Des mesures de hauteur d'eau ont été effectuées 5 cm en amont et en aval de la canopée dans le but de déterminer la pente de la surface libre.

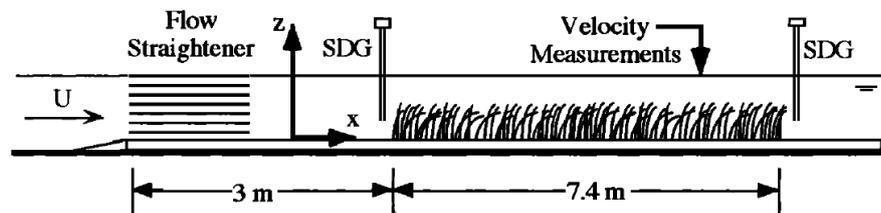


Figure I-49. Installation expérimentale (Nepf & Vivoni, 2000).

À partir de ces différentes mesures, ils ont calculé le coefficient de trainée C_D à partir de l'équation proposée par Dunn (1996) (eq.I-28). Le C_D est moyenné spatialement dans la direction transverse et longitudinale.

$$-g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial \langle \overline{uw} \rangle}{\partial z} - \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot a \cdot \langle U \rangle^2 = 0 \quad (\text{eq.I-28})$$

avec g l'accélération de la pesanteur (m.s^{-2}), H la hauteur de la surface libre (m), x la distance dans la direction longitudinale (m), z la distance dans la direction verticale (m), $\langle \overline{uw} \rangle$ la contrainte de Reynolds doublement moyennée (temporellement et spatialement) ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$), a la densité de la canopée (surface frontale de la canopée par unité de volume) (m^{-1}) et $\langle U \rangle$ la vitesse doublement moyennée (m.s^{-1}).

Les auteurs ont déterminé l'évolution de la densité de la canopée à partir de la surface frontale A_f , estimée tous les centimètres le long de l'axe vertical, de 10 plantes sélectionnées aléatoirement et dont les silhouettes ont été tracées sur papier. L'équation utilisée pour le calcul de la densité de la canopée est la suivante (eq.I-29) :

$$a(Z) = \frac{n \cdot A_f(Z)}{\Delta Z} \quad (\text{eq.I-29})$$

avec n le nombre de plantes par unité de surface (m^{-2}), A_f la surface frontale (m^2) et Z la distance sur l'axe vertical (m).

Nepf et Vivoni (2000) ont remarqué que la gamme de variation du coefficient de trainée (0,1 – 3) mesuré pour différentes submersions ($H/h=1$ (canopée émergente) à $H/h=2,5$ (canopée submergée)) correspondait à celle obtenue dans le cas de canopée terrestre (0,2 – 2) (Figure I-50).

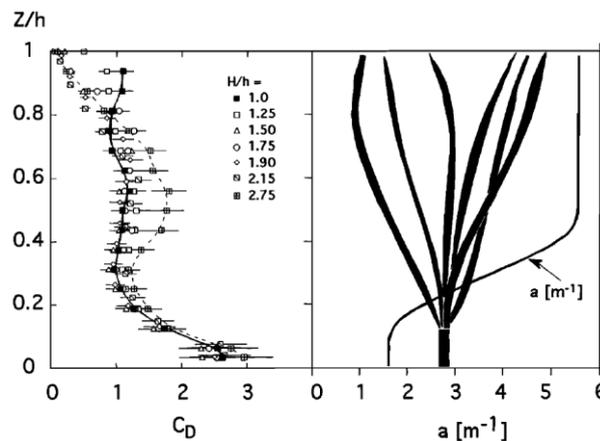


Figure I-50. À gauche : évolution du coefficient de trainée C_D sur la colonne d'eau dans la canopée (h : hauteur de la canopée) ; à droite évolution de la densité de la canopée sur la colonne d'eau (Nepf & Vivoni, 2000).

D'autre part, les auteurs indiquent que la submersion n'affecte pas le C_D , sauf près du haut de la canopée où une diminution notable est notée avec les structures émergentes. Par ailleurs l'augmentation de l'importance des effets visqueux près du fond entraîne une forte augmentation du coefficient de trainée.

Nepf et Vivoni (2000) ont défini deux zones distinctes d'écoulement à l'intérieur des canopées aquatiques. La première, dans la partie basse de la canopée, est appelée « zone d'échange longitudinal » car les échanges entre la canopée et l'écoulement se font essentiellement par advection longitudinale. Par ailleurs dans cette zone la vitesse moyenne et les fluctuations sont très dépendantes de la structure verticale de la canopée. Dans la deuxième zone, appelée « zone d'échange verticale » située dans la partie haute de la canopée, les échanges entre les structures et l'écoulement se font surtout verticalement. Dans la partie haute, au niveau de l'extrémité de la canopée, la discontinuité verticale de la trainée engendre une forte vitesse de cisaillement et augmente de manière importante l'intensité turbulente. Dans le cas d'une canopée émergente, seule la zone d'échange longitudinal existe.

D'autres études ont été menées en laboratoire pour évaluer la résistance à l'écoulement générée par des canopées végétales. Järvelä (2002) a montré que le coefficient de frottement dépendait essentiellement de la hauteur moyenne des tiges déformées, de la vitesse de l'écoulement et de la hauteur d'eau.

Ghisalberti et Nepf (2002) ont étudié la structure de l'écoulement au-dessus et à l'intérieur d'une canopée végétale aquatique non confinée et ont remarqué qu'elle s'apparentait davantage à une couche de mélange qu'à une couche limite. Les auteurs ont identifié le mécanisme de génération des *monami*. Pour cela, des manipulations ont été effectuées sur un canal expérimental de 24 m de long, 38 cm de large et 58 cm de haut (Figure I-51). Six feuilles en polyéthylène de 0,1 mm d'épaisseur et de module d'Young $E=300$ MPa ont été insérées dans des bases cylindres en bois constituant les tiges. Ces modèles ont été conçus pour ressembler aux zostères (plante aquatique marine). 850 modèles de plantes ont été disposés aléatoirement dans leur canal. Des feuilles en fibre de coco caoutchouté placées à l'entrée du canal dissipent rapidement la turbulence de l'écoulement. Des briques permettent ensuite de détruire la structure du jet et des systèmes sont mis en place pour éliminer les grandes structures de l'écoulement et l'homogénéiser (nids d'abeilles).

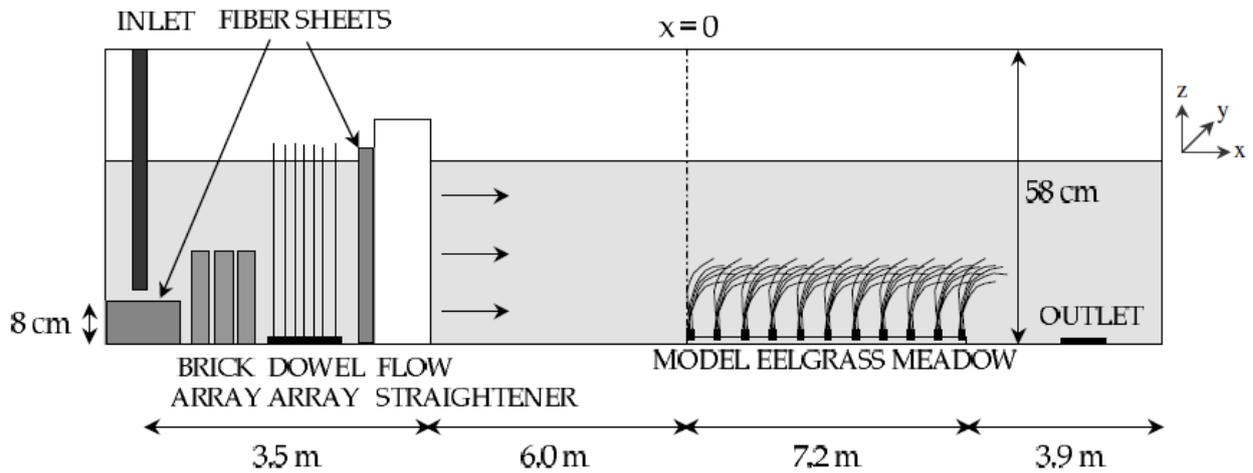


Figure I-51. Configuration expérimentale (Ghisalberti & Nepf, 2002).

La discontinuité de la traînée en haut de la canopée crée une inflexion dans le profil de vitesse générant le développement d'une allée tourbillonnaire issue des instabilités de type Kelvin-Helmholtz. Les tourbillons se propagent vers l'aval et induisent de fortes oscillations de vitesses dans l'écoulement. Les survitesses générées par les tourbillons au-dessus de la canopée font fléchir localement les plantes et créent une onde cohérente le long de la canopée, appelée *monami* (Figure I-52). Le même mouvement global d'oscillations, généré par le vent sur les champs de blé, a été étudié par Py *et al.* (2006) en PIV. Ce phénomène est alors appelé *honami*.

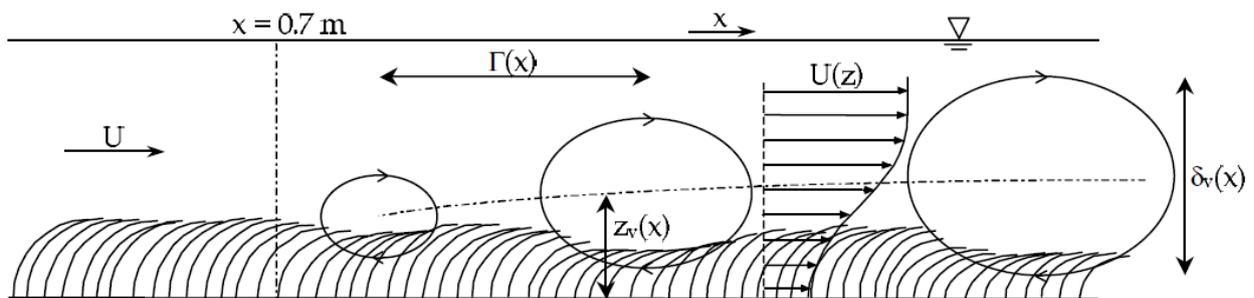


Figure I-52. Schéma montrant les caractéristiques des tourbillons générés dans un écoulement au-dessus d'une canopée végétale responsable du fléchissement périodique des plantes (*monami*) (Ghisalberti & Nepf, 2002).

Velasco *et al.* (2003) ont ensuite caractérisé la résistance à l'écoulement pour différentes densités de plantes flexibles en plastique et ont également montré qu'il existait une relation linéaire entre la rigidité flexionnelle adimensionnée et la hauteur des plantes déformées.

Luhar *et al.* (2008) ont travaillé sur une canopée aquatique submergée. Ils ont mis en évidence que pour une canopée clairsemée, les contraintes turbulentes sont importantes et engendrent la remise en suspension des sédiments. En revanche, dans le cas de canopées denses, ces contraintes sont réduites par la traînée de la canopée et ont un impact moins important sur les sédiments. Les auteurs ont notamment observé que la résistance totale est dépendante principalement du facteur de blocage (surface occupée par la végétation) et dans une moindre mesure de la morphologie de la canopée.

Plus récemment, des études numériques et expérimentales ont été menées pour caractériser la réponse en amplitude et en fréquence d'une seule structure flexible (cylindre ou feuille) (Besem *et al.*, 2016 ; Luhar *et al.*, 2016).

I.3 Conclusion

Cette revue bibliographique, non exhaustive, fournit en premier lieu une vision globale des principaux travaux effectués sur les passes à poissons à fentes verticales. Les travaux majeurs qui ont été menés pour caractériser le fonctionnement hydraulique de ce type de passe ont été présentés ainsi que les différents paramètres de dimensionnement. Des études

expérimentales et numériques ont été exposées et ont permis une description plus fine de l'écoulement turbulent et instationnaire qui se développe dans une passe à poissons à fentes verticales. L'influence de cet écoulement sur les efforts hydrodynamiques subis par le poisson et sur son comportement dans un bassin a également été montrée. Il ressort de ce chapitre que l'écoulement dans les passes à poissons à fentes verticales « classiques » (sans éléments ajoutés) est relativement bien caractérisé. Cependant, les effets de la présence d'un élément très souvent inséré dans les fentes, le seuil, sur les caractéristiques de l'écoulement et sur le comportement des poissons n'est pas abordé dans la littérature concernant les passes à poissons à fentes verticales. Bourtal (2012) a initié l'étude de l'écoulement en présence de macro-rugosités disposées sur le radier des passes à fentes verticales. Cependant, l'influence de la densité de ces macro-rugosités sur la cinématique de l'écoulement, sur les caractéristiques hydrauliques du dispositif de franchissement ainsi que sur le comportement des poissons n'a pas été caractérisée. De plus en plus de passes à poissons sont pourtant pourvues de ces macro-rugosités. Il est donc primordial de mieux comprendre les effets des seuils et des macro-rugosités sur l'écoulement, afin de fournir des recommandations précises aux concepteurs, permettant ainsi d'obtenir l'efficacité biologique optimale du dispositif. Par ailleurs, ces dix dernières années, l'insertion d'autres types d'éléments (des cylindres ou des parois rugueuses) a été proposée pour améliorer les conditions d'écoulement dans les passes à poissons existantes afin de favoriser le passage des espèces dotées d'une faible capacité de nage. Ces études ont notamment montré que l'ajout d'obstacles dans les bassins permettait de réduire l'intensité de la turbulence de l'écoulement et facilitait le franchissement du dispositif par les poissons. Pour réduire les risques de colmatage et d'obstruction (colmatage ou obstruction par un corps dérivant) qui pourraient exister en présence de ce type d'obstacles (rigide) et pour dissiper davantage l'énergie dans les bassins, une solution proposée dans cette thèse consiste à insérer des structures flexibles dans l'écoulement. Une étude bibliographique des études d'écoulement avec des seuils, des macro-rugosités et des structures flexibles dans des canaux en laboratoire a été menée. Cette caractérisation fondamentale en canal permet de poser les bases permettant de mieux comprendre les phénomènes physiques qui peuvent être observés dans les passes à poissons en présence de tels obstacles.

Chapitre 2

MOYENS EXPERIMENTAUX ET OUTILS D'ANALYSE

Sommaire

II.	MOYENS EXPERIMENTAUX ET OUTILS D'ANALYSE	47
II.1	Dispositif expérimental.....	48
II.1.1	Le modèle de passe à poissons à l'échelle 1/4	48
II.1.2	Critères de similitude	49
II.1.3	Les configurations étudiées.....	50
II.1.3.a	<i>Les seuils</i>	51
II.1.3.b	<i>Les macro-rugosités</i>	52
II.1.3.c	<i>Les structures souples</i>	53
II.2	Coefficient de débit.....	55
II.2.1	Position des sondes de hauteur.....	55
II.2.2	Acquisition et post-traitement des données	56
II.2.2.a	<i>Etalonnage et mesure de la hauteur de référence</i>	58
II.2.2.b	<i>Interface graphique et critère d'équilibre</i>	58
II.2.2.c	<i>Acquisition des données</i>	59
II.2.2.d	<i>Post-traitement des données</i>	59
II.2.3	Incertitudes de mesures.....	61
II.3	Profils de vitesses et topologies.....	66
II.3.1	Position des profils de vitesses.....	68
II.3.2	Conditions de mesure de la topologie	69
II.3.3	Acquisition et post-traitement des données	71
II.3.3.a	<i>Temps d'acquisition</i>	71
II.3.3.b	<i>Filtrage</i>	73
II.3.4	Incertitudes de mesures.....	73
II.4	Analyse du comportement des poissons.....	74
II.4.1	Présentation de l'installation expérimentale	74
II.4.2	Configurations testées et protocole expérimental	75
II.4.2.a	<i>Les configurations testées</i>	75
II.4.2.b	<i>Choix de l'espèce et de la taille des poissons</i>	76
II.4.2.c	<i>Protocole expérimental</i>	77
II.4.3	Dépouillement des vidéos et traitement des données.....	78
II.4.3.a	<i>Indices généraux de franchissement</i>	79
II.4.3.b	<i>Caractérisation du comportement</i>	79
II.4.3.c	<i>Analyses statistiques</i>	80
II.5	Conclusion.....	80

L'écoulement qui se développe dans une passe à poissons à fentes verticales est complexe, de par ses propriétés fortement turbulentes et instationnaires. Dans l'objectif de faciliter le passage des petites espèces à travers ces dispositifs, il est primordial d'étudier les grandeurs caractéristiques de la turbulence dans les bassins et de comprendre leur impact sur le comportement des poissons. Pour cela, l'approche expérimentale apparaît comme étant incontournable. Dans ce chapitre, il s'agira tout d'abord de décrire le dispositif expérimental et les caractéristiques des éléments qui ont été ajoutés pour modifier l'écoulement (seuils, macro-rugosités et structures souples). Dans un second temps, les conditions de mesures des grandeurs hydrauliques caractéristiques de l'écoulement dans une passe à poissons à fentes verticales (coefficient de débit, topologie), ainsi que les différentes configurations géométriques étudiées sont détaillées. Les positions des profils de vitesses réalisés dans la passe avec un vélocimètre acoustique à effet Doppler sont explicitées en fonction des configurations étudiées. Les paramètres liés à cette acquisition et les grandeurs issues des mesures sont ensuite décrits. Enfin, les conditions des manipulations réalisées dans la passe à poissons du laboratoire avec plusieurs espèces de poissons sont expliquées.

II.1 Dispositif expérimental

II.1.1 Le modèle de passe à poissons à l'échelle 1/4

Le laboratoire P' possède un modèle réduit de passe à poissons à fentes verticales. Ce modèle a été conçu sur la base des dimensions moyennes des passes à poissons à fentes verticales construites en France en respectant une similitude géométrique de 1/4. La passe à poissons à l'échelle 1/4 est représentée schématiquement sur la figure II-1. Ce modèle a été utilisé lors des deux dernières thèses réalisées au sein du laboratoire (Tarrade, 2007 ; Bourtal, 2012) pour étudier l'écoulement dans les passes à poissons à fentes verticales.

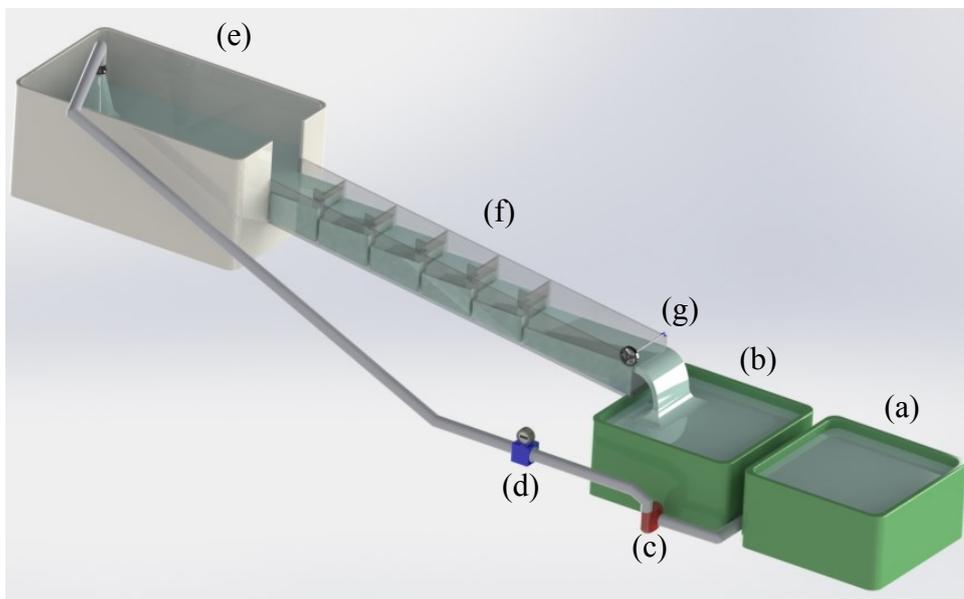


Figure II-1. Passe à poissons du laboratoire (échelle 1/4).

Le système fonctionne en boucle fermée. Une pompe centrifuge (c) permet d'aspirer l'eau des bacs de rétention (a et b) situés à l'aval de la passe à poissons proprement dite (f) et de la restituer dans la cuve d'alimentation (e). L'eau contenue dans cette cuve revient ensuite dans les bacs de rétention (a et b) par gravité en passant par les 5 bassins de la passe à poissons.

Les bacs (a et b) ont une capacité totale de $5,5 \text{ m}^3$. Cela permet d'atteindre la limite volumique de remplissage des bassins de la passe à poissons tout en garantissant un niveau d'eau suffisant au-dessus des conduites d'aspiration de la pompe. La cuve d'alimentation (e) a une capacité de $2,5 \text{ m}^3$, suffisante pour tranquilliser l'écoulement à l'entrée de la passe à poissons. Un débitmètre électromagnétique Proline Promag 10W DN80 (d) permet de mesurer le débit après la pompe. Sa

gamme de mesure est comprise entre $1,5 \text{ L.s}^{-1}$ et 50 L.s^{-1} . La mesure fournie par le débitmètre est utilisée pour régler le débit transitant dans la passe à poissons par l'intermédiaire du variateur de la pompe. Le débit transitant dans la passe à poissons peut atteindre $Q=34 \text{ L.s}^{-1}$ au maximum. Un variateur permet de régler la fréquence de rotation de la pompe. La consigne est fixée par l'utilisateur grâce à un potentiomètre et est ajustée jusqu'à ce que le débit mesuré soit égal au débit désiré. Un système de guillotine installée sur une crémaillère (g) à l'extrémité de la passe à poissons permet d'équilibrer les hauteurs de chutes entre les bassins et de maintenir une hauteur d'eau identique dans chaque bassin.

Les bassins de la passe à poissons ont été réalisés en matière transparente (PMMA) par l'atelier du laboratoire, permettant l'utilisation de techniques de mesures lasers et vidéos. Les dimensions hors tout du canal sont $L_{ht} * l_{ht} * H_{ht} \text{ (m)} = 4,843 * 0,735 * 0,58$. Les bassins ont une longueur $L=0,75 \text{ m}$ et sont séparés par des fentes verticales d'une largeur $b=0,075 \text{ m}$, lui conférant un ratio L/b égal à 10. La largeur des bassins est de $B=0,675 \text{ m}$. Elle est modifiable grâce à la mise en place de parois amovibles dans chacun des bassins. Le matériel disponible permet de régler la largeur des bassins de $B=0,425 \text{ m}$ à $B=0,675 \text{ m}$ soit $B/b=5,67$ à $B/b=9$.

La géométrie des bassins (Figure II-2) est similaire à la géométrie de type 1 étudiée par Rajaratnam *et al.* (1986).

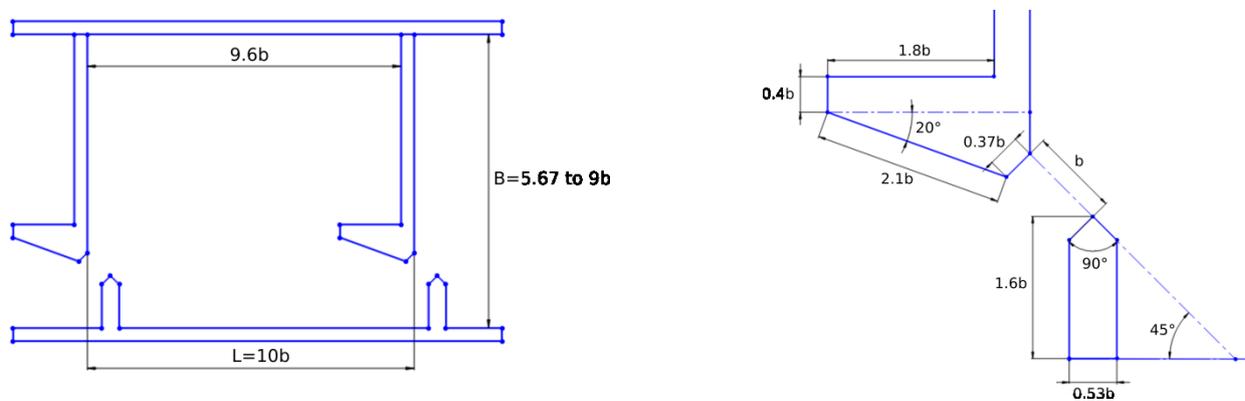


Figure II-2. Géométrie des bassins de la passe à poissons du laboratoire.

La passe à poissons est liée à un châssis en aluminium Norcan par une liaison pivot située au niveau du cinquième bassin. Un cric hydraulique permet de régler l'inclinaison du canal. Cinq jeux de cales peuvent être placés entre le châssis et la passe à poissons pour maintenir la pente de la passe à la valeur désirée ($s=5\%$, $7,5\%$, 10% , $12,5\%$ et 15%).

Les principales caractéristiques géométriques du modèle utilisé lors de ce travail de thèse sont rappelées dans le tableau 1.

Caractéristiques géométriques d'un bassin	Largeur de la fente	$b = 0,075\text{m}$
	Longueur du bassin	$L = 0,75\text{m}$
	Largeur du bassin	$0,425\text{m} \leq B \leq 0,675\text{m}$
	Hauteur du bassin	$h = 0,55\text{m}$
	Pente	5% 7,5% 10% 12,5% 15%

Tableau 1. Caractéristiques de la passe à poissons à l'échelle $\frac{1}{4}$.

II.1.2 Critères de similitude

Pour étudier les écoulements en mécanique des fluides, il est souvent nécessaire de réaliser des modèles réduits pour des questions de coût et de faisabilité. Dans le cas des écoulements à surface libre, un nombre adimensionnel appelé nombre de Froude est utilisé pour

relier les grandeurs physiques mesurées sur modèle réduit à celles de son prototype. Il est défini comme étant le rapport des forces d'inertie sur les forces de pesanteur. Appliqué à une passe à poissons, ce nombre devient (eq.I-2) :

$$F_r = \frac{U_s}{\sqrt{g \cdot Z}} \quad (\text{eq.II-1})$$

avec U_s la vitesse de l'écoulement en m.s^{-1} , Z la hauteur d'eau (m) et g l'accélération de la pesanteur (m.s^{-2}).

Le nombre de Froude permet également de classer les régimes d'écoulement. L'écoulement est dit subcritique (ou fluvial) lorsque $F_r < 1$ et supercritique (ou torrentiel) lorsque $F_r > 1$. Dans les passes à poissons à fentes verticales, le nombre de Froude varie de $F_r = 0,4$ pour une passe à fort débit et faible pente à $F_r \approx 1$ dans le cas d'une forte pente et d'un faible débit.

En admettant que la similitude de Froude est respectée entre la passe à poissons du laboratoire et son prototype, l'échelle des vitesses d'écoulement est de 1/2. L'échelle des débits peut également être déduite et vaut alors 1/32.

Un autre nombre adimensionnel, le nombre de Reynolds, permet de quantifier l'importance relative des forces d'inerties d'un écoulement sur les forces de viscosités. Il s'exprime de la manière suivante dans le cas de la passe à poissons (eq.II-2) :

$$R_e = \frac{U_s \cdot b}{\nu} \quad (\text{eq.II-2})$$

avec U_s la vitesse de l'écoulement en m.s^{-1} , b la largeur de la fente de la passe à poissons et ν la viscosité cinématique de l'eau en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$.

Obtenir à la fois une similitude de Reynolds et une similitude de Froude entre un modèle et son prototype est impossible, sauf à changer la viscosité du fluide. En effet, la diminution de l'échelle géométrique entraîne une diminution du nombre de Reynolds si la viscosité du fluide ne change pas entre le modèle et le prototype. Les effets visqueux ont donc un impact plus grand dans les écoulements sur modèle réduit. Il s'avère important de choisir une échelle géométrique la plus grande possible lors de la construction d'un modèle, de manière à limiter au maximum les effets d'échelle. Dans le cas de la passe à poissons du laboratoire, la taille du hall d'essai a conditionné le choix de l'échelle géométrique du modèle. Elle a été choisie de manière à reproduire des conditions hydrauliques représentatives de celles existantes à l'échelle réelle. Ses dimensions autorisent également à réaliser des observations sur le comportement des poissons. Le nombre de Reynolds du modèle varie entre $R_e = 62.10^3$ et $R_e = 116.10^3$ en fonction de la pente du canal, celui du prototype est 8 fois plus important. Dans la mesure où les similitudes de Froude et de Reynolds sont antinomiques, les potentiels effets d'échelles liés au non-respect de la similitude de Reynolds ont fait l'objet de plusieurs études au sein du laboratoire pour qualifier les mesures sur le modèle réduit (Calluad *et al.*, 2012).

II.1.3 Les configurations étudiées

Pour assurer un fonctionnement hydraulique en adéquation avec la capacité de nage des espèces présentes au pied de l'ouvrage (espèces cibles) mais également avec les variations de débit du cours d'eau considéré, les passes à poissons doivent être correctement dimensionnées. C'est dans cette optique que se sont inscrites les mesures hydrauliques menées sur la passe à poissons du laboratoire.

Des dispositifs peuvent être insérés dans les passes à poissons pour en corriger le fonctionnement hydraulique. Ainsi, des obstacles appelés « seuils » sont souvent disposés aux pieds des fentes entre les bassins. Ils peuvent être en béton ou sous la forme d'une planche en bois glissée dans la fente. Ces seuils permettent d'élever artificiellement le niveau d'eau dans les bassins (pour diminuer la puissance volumique dissipée), d'équilibrer les hauteurs de chutes entre chaque bassin (pour équilibrer les puissances volumiques dissipées) ou bien de réduire le débit qui transite dans la passe. Pour tenter d'apporter des modifications sur l'écoulement et favoriser le passage des petites espèces de poissons ou des espèces benthiques, des macro-rugosités sont de plus en plus souvent placées sur le radier des passes à poissons. Elles sont composées soit de roches en partie scellées dans le béton, soit de plots cylindriques moulés en béton. Elles offrent potentiellement des abris et des zones où l'écoulement pourrait être favorable à certaines espèces de poissons.

Une étude paramétrique a été menée visant à caractériser l'influence des seuils et des macro-rugosités sur l'écoulement mais également sur le comportement des poissons dans les passes à poissons à fentes verticales.

II.1.3.a Les seuils

Pour caractériser l'influence des seuils sur l'écoulement dans la passe à poissons, plusieurs seuils ont été réalisés en PPMA transparent. Les hauteurs de ces seuils (h_s) ont été définies en prenant la largeur de la fente (b) en référence. En se basant sur celles couramment utilisées en France, trois hauteurs ont été étudiées : $h_s=0,0375$ m ; $h_s=0,075$ m et $h_s=0,1125$ m (Figure II-3) soit respectivement $\frac{h_s}{b} = 0,5$; $\frac{h_s}{b} = 1$ et $\frac{h_s}{b} = 1,5$.

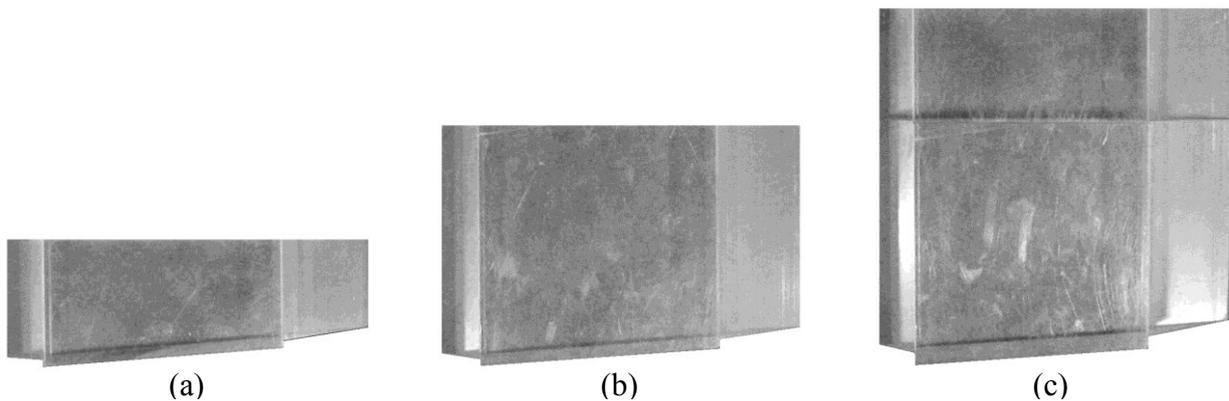


Figure II-3. Hauteurs des seuils étudiées : (a) $h_s/b=0,5$; (b) $h_s/b=1$; (c) $h_s/b=1,5$

Ces seuils, réalisés en quatre exemplaires chacun, se positionnent aux pieds des quatre premières fentes. Les fentes sont orientées d'un angle de 45° par rapport à l'axe longitudinal du canal et les cloisons sont parfaitement verticales pour une pente $s=10\%$. La base des seuils a donc été biseautée pour suivre la pente du canal et de manière à ce que la face du haut des seuils soit parfaitement horizontale (également pour $s=10\%$). Des faces d'appuis ont été usinées de part et d'autre de la zone permettant d'obstruer la fente. Elles permettent de maintenir le seuil en position grâce à la poussée générée par l'écoulement.

II.1.3.b Les macro-rugosités

Les macro-rugosités utilisées dans le modèle de passe à poissons du laboratoire sont des plots en PMMA de forme cylindrique (certains opaques et d'autres transparents pour les acquisitions vidéos). Ils sont fixés sur des plaques, également en PMMA, disposées au fond de chacun des bassins de la passe (Figure II-4).



Figure II-4. Macro-rugosités utilisées pour les expériences dans la passe à poissons.

La hauteur des plots est de $h_r=0,05$ m soit en adimensionnant par la largeur de la fente : $\frac{h_r}{b} = \frac{2}{3}$.

Le diamètre des plots est de $\phi_r=0,035$ m soit $\frac{\phi_r}{b} \cong \frac{1}{2}$.

Deux densités de macro-rugosités (d_r), représentatives de celles implantées dans les passes à poissons actuellement, ont été testées : $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$. On définit la densité de macro-rugosités d'un motif élémentaire composé de trois cylindres comme étant le rapport de la surface de ces trois cylindres (S_r) sur la surface totale du motif (S_t) (Figure II-5).

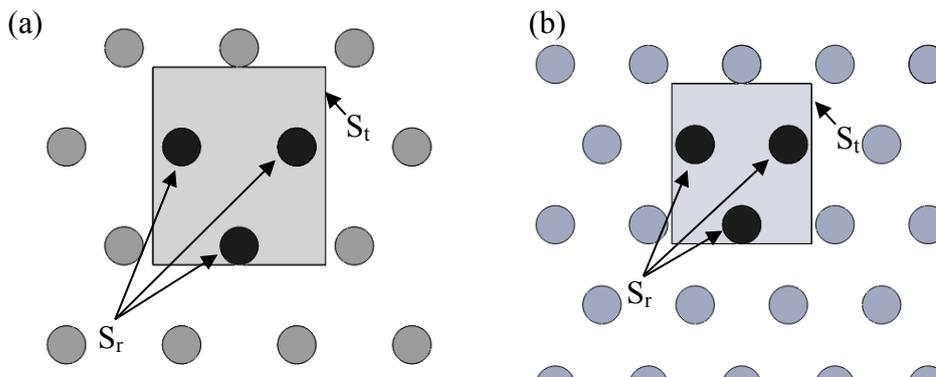


Figure II-5. Densité de macro-rugosités $d_r=10\%$ (a) et $d_r=15\%$ (b).

Les plots ont été répartis uniformément sur le radier de la passe à poissons de sorte que l'écart entre chacun des plots soit constant pour une même densité. Ils sont disposés en quinconce et le plot de référence a été positionné sur la médiatrice du segment délimité par la largeur de la fente.

Le plot de référence est situé à une largeur de la fente de la sortie du bassin pour $d_r=10\%$ et à une demi-fente pour $d_r=15\%$. L'espacement inter-plots est environ égal à la largeur de fente pour la plus faible densité (Figure II-6) et à $2/3$ de la largeur de fente pour la plus forte densité (Figure II-7).

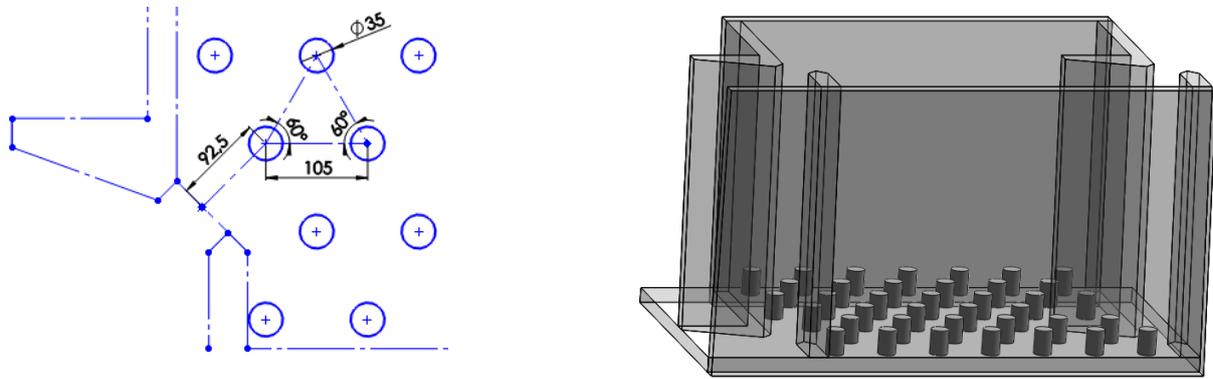


Figure II-6. Disposition des plots pour $d_r=10\%$ (à gauche), vue en 3D d'un bassin de la passe à poissons avec une densité de macro-rugosités $d_r=10\%$ (à droite)

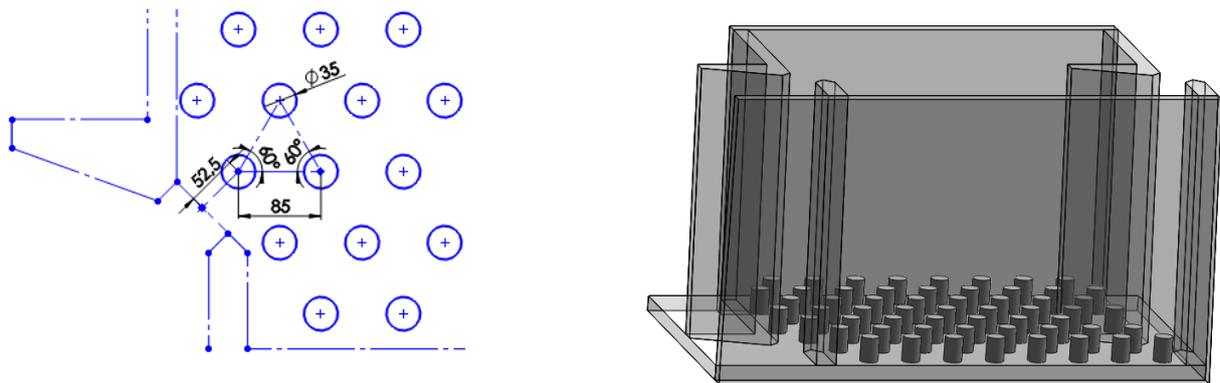


Figure II-7. Disposition des plots pour $d_r=15\%$ (à gauche), vue en 3D d'un bassin de la passe à poissons avec une densité de macro-rugosités $d_r=15\%$ (à droite)

Pour un écoulement en présence de macro-rugosités, un nombre appelé « nombre de confinement » $\alpha_c = h_r/D$ est défini, avec h_r la hauteur de la macro-rugosité et D la hauteur de la surface libre. Ce nombre évalue la submersion relative dans le cas d'écoulement à surface libre (Nepf & Vivoni, 2000). Dans le cas de la passe à poissons, une augmentation du débit entraîne une augmentation de la hauteur d'eau dans les bassins et une diminution du nombre de confinement. La zone perturbée par la présence des plots appelée sous-couche rugueuse peut donc se développer davantage, à la manière d'une couche limite turbulente dans un écoulement à surface libre. Dans cette zone, la contribution visqueuse au frottement peut être considérée comme étant négligeable devant celle de la turbulence (Florens, 2010).

II.1.3.c Les structures souples

Les structures souples sont des cylindres flexibles fixés sur une plaque posée sur le radier de la passe à poissons et situés dans le jet à la sortie des fentes pour dissiper son énergie. Ces cylindres sont disposés de manière à former quatre rangées parallèles à la fente (perpendiculaires au jet) et en quinconce (Figure II-8).

Chaque rangée est composée de 6 cylindres (mis à part la première qui n'en comporte que 5 pour laisser un espace libre d'une largeur de fente tout autour des structures flexibles). La distance entre les cylindres est constante et égale à 0,015 m soit $1/5$ de la largeur de fente. Le cylindre de référence est situé dans l'axe de la fente. En adoptant une prise de vue dans le sens de l'écoulement, deux cylindres sont positionnés à droite de ce cylindre de référence et 3 à gauche. Le cylindre le plus à droite (le plus proche de la paroi) constitue la deuxième référence. Ce dernier est positionné à une distance égale à une largeur de fente de la paroi pour ne pas créer une zone de passage inaccessible pour les poissons. La première rangée de cylindres est donc située à une distance de 0,088 m de la fente, soit à $1,17b$.



Figure II-8. Fixation des structures souples sur leur plaque support et sur la plaque disposée sur le radier de la passe à poissons.

L'objectif était d'obtenir une flèche d'environ un centimètre sur un cylindre soumis à un écoulement uniforme de $1,05 \text{ m.s}^{-1}$, correspondant à la vitesse maximale générée avec une pente de canal $s=7,5\%$. Le diamètre des cylindres a été fixé à 1 cm. Ils doivent être complètement immergés. Pour obtenir ces caractéristiques, plusieurs matériaux ont été étudiés. Le module d'Young (E) a été déterminé expérimentalement pour trois matériaux de rigidités différentes. Ces matériaux sont des résines de polyuréthane composées à partir d'un mélange de polyol et d'isocyanate dont les proportions modifient la rigidité du matériau. Un cylindre de chaque matériau (UR3558, UR3569 et RIM867) de 16 mm de diamètre et de 400 mm de long a été testé. Le module d'Young a été déduit à partir de la mesure de la déformée en utilisant la théorie des poutres en console subissant de petites déformations sous un chargement réparti (son propre poids) ainsi qu'un chargement ponctuel (masse au bout du cylindre) (eq.II-3).

$$\frac{d^2 u_y}{dx^2} = \frac{\mathcal{M}_{fz}}{E \cdot I_{Gz}} \quad (\text{eq.II-3})$$

avec u_y la déformée (m), \mathcal{M}_{fz} le moment fléchissant d'axe z , E le module de Young (MPa) et I_{Gz} le moment quadratique de la section du cylindre (m^4).

Le module d'Young (pour des petites déformations) de chacun des matériaux est récapitulé dans le tableau 2 :

Matériau	E (MPa)
UR3558	92
UR3569	509
RIM867	1693

Tableau 2. Module de Young des résines de polyuréthane testées pour la réalisation des structures flexibles

À partir des caractéristiques de l'écoulement et des caractéristiques des matériaux, il s'agit de connaître la longueur nécessaire des cylindres pour atteindre une flèche d'un centimètre. Pour cela, le nombre de Reynolds de l'écoulement est déterminé autour du cylindre pour une vitesse de $1,05 \text{ m.s}^{-1}$ et un diamètre de 0,01 m, permettant d'obtenir le coefficient de traînée. La force F_c appliquée sur le cylindre peut ensuite être obtenue puis la longueur L_c du cylindre déduite à partir de l'expression de la flèche maximale (eq.II-4) en bout de cylindre obtenue à partir de (eq.II-3) :

$$f = \frac{F_c \cdot L_c^3}{8 \cdot E \cdot I_{Gz}} \quad (\text{eq.II-4})$$

avec f la flèche à l'extrémité du cylindre, F_c (N) la force uniformément répartie appliquée sur le cylindre par l'écoulement et L_c la longueur du cylindre.

Le seul matériau permettant d'obtenir une flèche d'un centimètre dans les conditions définies en gardant une longueur inférieure à la hauteur d'eau dans les bassins est le 3558. La longueur ainsi calculée est de $L_c=15$ cm.

II.2 Coefficient de débit

Le coefficient de débit peut être déterminé grâce à la mesure des hauteurs d'eau dans les bassins. Des sondes acoustiques ont été utilisées pour mesurer cette grandeur dans chacun des quatre bassins. Ces sondes émettent des ondes acoustiques à haute fréquence dont la vitesse de propagation dans l'air est connue. Lorsque ces trains d'ondes percutent un obstacle, ils retournent vers la zone réceptrice de la sonde qui mesure alors leur temps de trajet. La distance est ainsi déduite par la relation simple : $d=v.t$. Les caractéristiques principales de ces sondes sont les suivantes :

Marque	Microsonic
Type	Mic +25/IU/TC
Reproductibilité	+/- 0,15%
Précision	+/-1%

Tableau 3. Caractéristiques des sondes acoustiques utilisées pour la mesure des niveaux d'eau

II.2.1 Position des sondes de hauteur

Le coefficient de débit a été déterminé pour différentes positions de la sonde dans le troisième bassin. L'axe suivant lequel la position de la sonde a varié était situé à une demi-longueur de bassin, la hauteur de référence dans la littérature étant la hauteur à mi-bassin (Figure II-9).

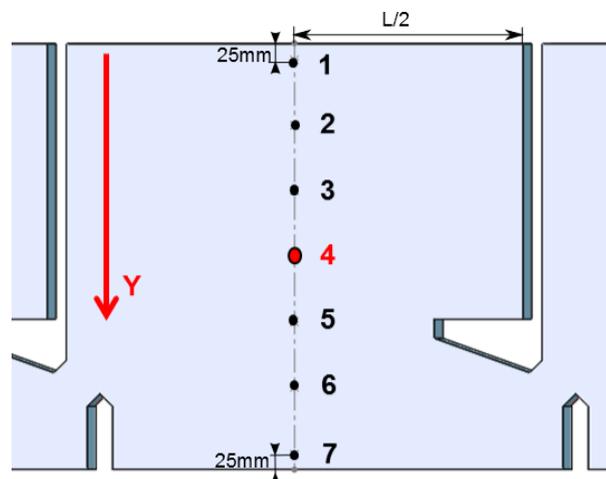


Figure II-9. Positions de la sonde acoustique dans le bassin 3.

Les points 1 et 7 ont été positionnés au plus près des parois (25 mm). La distance restante entre les points 1 et 7 a été divisée en 6 de manière à ce que le point 4 se retrouve au milieu du bassin.

Les mesures ont été effectuées pour trois largeurs de bassins $B/b=5,67$; $6,67$ et 9 , une pente de $s=7,5\%$, un débit $Q^A=4,8$ et une hauteur de seuil $h_s/b=1$. Le résultat de ces mesures (Figure II-10) permet de constater qu'il existe une similitude entre les profils de hauteur obtenus pour les largeurs de bassins les plus faibles ($B/b=5,67$ et $6,67$).

La diminution du coefficient de débit au niveau des parois du bassin (point 1 et 7 pour $B/b=5,67$ et $6,67$) correspond à une élévation de la hauteur d'eau et est la conséquence de l'impact du jet provenant de la fente, renflement caractéristique d'un écoulement de type 2. Le profil de hauteur d'eau obtenu pour la plus grande largeur ne montre pas de surélévation aussi nette au niveau des

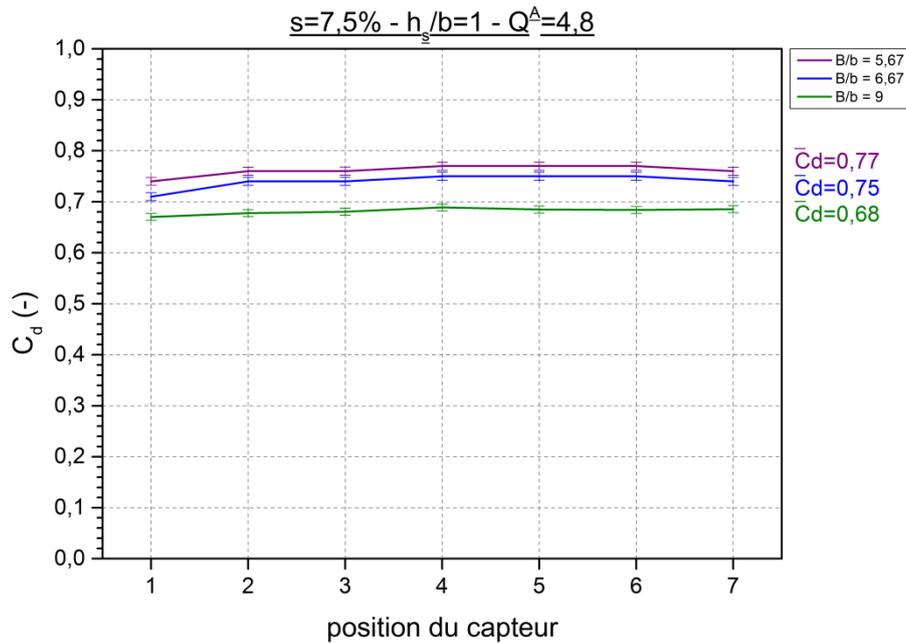


Figure II-10. Evolution du coefficient de débit sur la largeur du bassin.

parois, l'analyse topologique montre que l'écoulement est de type 1. Le point 4, situé au milieu du bassin dans chacune des configurations, ne semble pas être positionné à un endroit particulier de l'écoulement qui serait susceptible de ne pas refléter la hauteur moyenne régnant dans les bassins. De plus, la position de la sonde a une faible influence sur la valeur du coefficient de débit (variation d'environ 1% sur la zone « plateau » des points 2 à 6 par rapport à la valeur moyenne calculée sur toute la largeur du bassin). En conséquence, aucune caractéristique particulière de l'écoulement n'indique un point plus approprié que le point central. Les sondes seront positionnées au milieu des bassins (point 4) pour l'ensemble des séries de mesures.

II.2.2 Acquisition et post-traitement des données

Les sondes ont été disposées au milieu des quatre premiers bassins à $L/2$ et $B/2$ perpendiculairement au radier (Figure II-11).

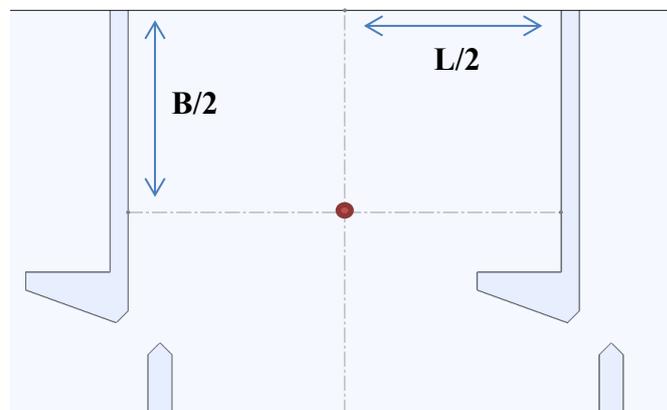


Figure II-11. Position des sondes acoustiques dans les bassins.

Les sondes ont été positionnées dans le repère de la passe, perpendiculairement au radier (Figure II-12). Elles sont montées sur des guides en aluminium munis d'une crémaillère qui permet un déplacement précis (au dixième de millimètre) le long de l'axe Z. Ces guides possèdent un afficheur numérique avec une fonction remise à zéro. Chacun d'entre eux est fixé sur une traverse en aluminium Norcan vissée sur des longerons au-dessus du canal. Il est ainsi possible de déplacer ces sondes dans les trois directions de l'espace, ce qui a permis un positionnement rapide des 4 sondes pour chacune des 284 configurations étudiées.

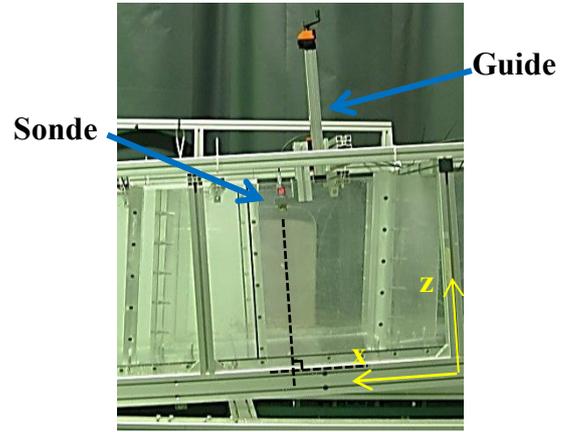


Figure II-12. Montage des sondes acoustiques dans les bassins.

Les signaux de hauteur sont acquis par l'intermédiaire d'un convertisseur courant/tension 4-20 mA et d'un boîtier d'acquisition National Instrument USB-6000.

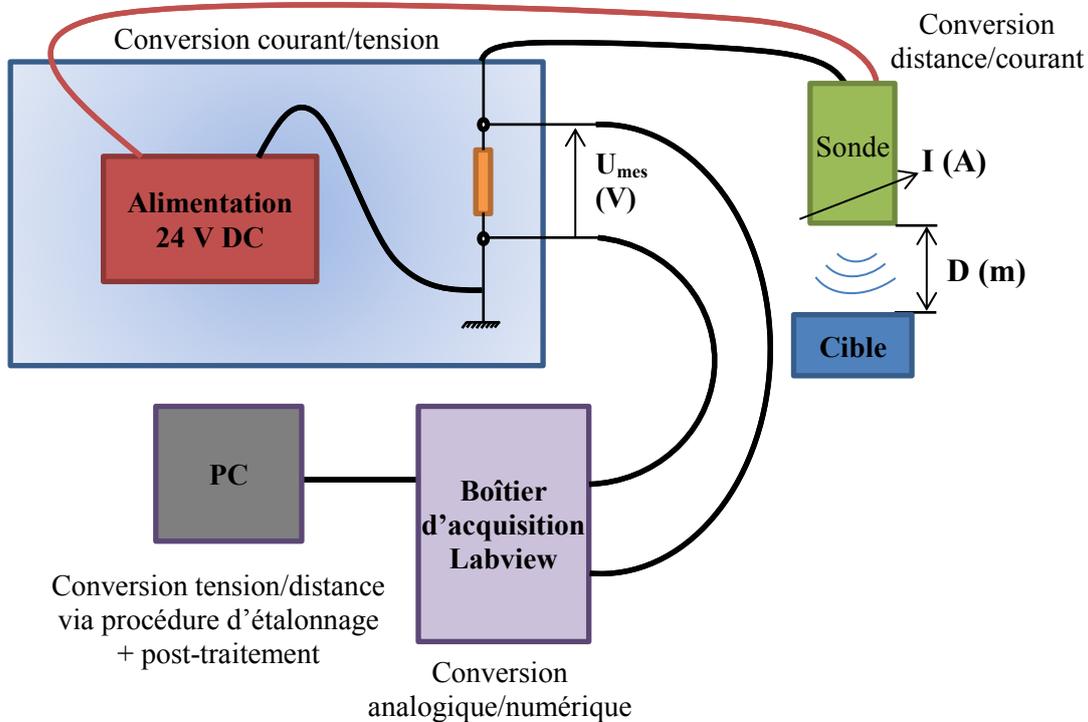
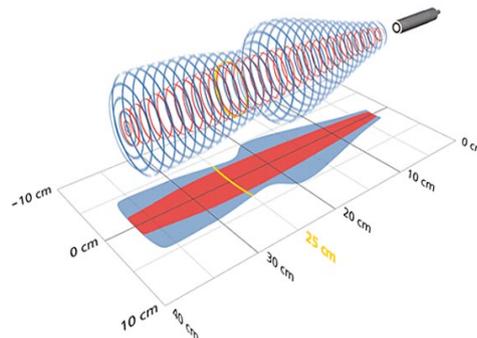


Figure II-13. Schéma de la chaîne d'acquisition des hauteurs d'eau dans les bassins.

La chaîne d'acquisition est schématisée sur la figure II-13. L'interface utilisée a été développée sous Labview et permet de visualiser les signaux de hauteur fournis par les sondes. Les sondes



(Source : <http://www.microsonic.de>)

Figure II-14. Zone de détection des sondes acoustiques.

de hauteurs utilisées ont une zone de mesure comprise entre 30 mm et 250 mm (Figure II-14). Associées au système de guidage, ces sondes sont capables de mesurer les hauteurs d'eau de l'ensemble des configurations.

II.2.2.a Etalonnage et mesure de la hauteur de référence

Pour l'étalonnage, une cale est positionnée entre le radier et le capteur. Cinq acquisitions sont ensuite réalisées sur toute la gamme de mesure du capteur. Pour la première acquisition, l'écart entre le capteur et la cale est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse, les suivantes étant réalisées de manière relative grâce à l'afficheur numérique du guide de réglage puis renseignées dans le logiciel d'acquisition. Les coefficients de la droite d'étalonnage sont ensuite calculés, permettant ainsi de convertir le signal initialement en unité de tension, en unité de distance.

Le capteur renvoie un signal permettant de déterminer la distance qui le sépare d'un obstacle. Dans le cas de la passe à poissons l'obstacle étant la surface libre de l'écoulement, il est nécessaire de connaître la position du capteur par rapport au radier pour en déduire le niveau d'eau. La distance séparant le radier du capteur (hauteur de référence) est mesurée à chaque changement de position de ce dernier et renseignée dans le logiciel qui effectue ensuite la soustraction (niveau d'eau = hauteur de référence – distance mesurée).

II.2.2.b Interface graphique et critère d'équilibre

Une interface (Figure II-15) a été développée sur Labview au sein du laboratoire pour permettre l'acquisition des signaux délivrés par les sondes acoustiques.

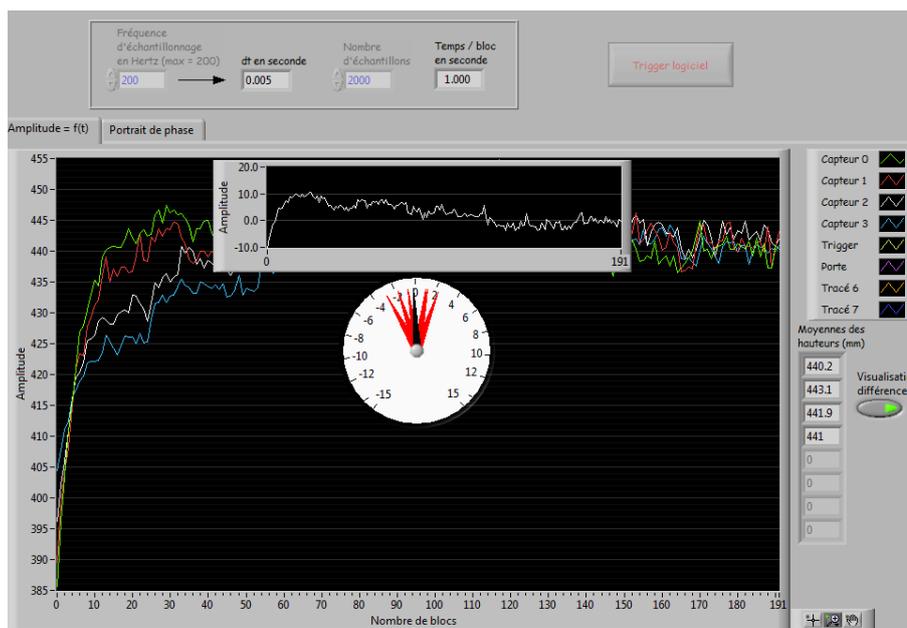


Figure II-15. En arrière-plan : visualisation des variations de hauteur d'eau dans chaque bassin. Au premier plan : cadran circulaire à aiguilles et graphe déroulant pour la visualisation de l'état d'équilibre des hauteurs d'eau.

Cette interface, composée d'un graphique déroulant, permet de visualiser les variations de hauteur d'eau mesurées par les sondes au cours du temps. La fréquence d'acquisition choisie correspond à la fréquence d'acquisition maximale des sondes soit 200 Hz. Pour faciliter la visualisation des signaux, une moyenne temporelle est effectuée avec un fenêtrage d'une seconde (temps de bloc). Un point qui correspond à la moyenne de 200 points est donc tracé toutes les secondes. Les hauteurs mesurées sont sur l'axe des ordonnées (mm) et les temps de blocs sur l'axe des abscisses (s). Pour visualiser le déséquilibre de hauteur d'eau et, *a fortiori*, le déséquilibre des hauteurs de chutes entre chaque bassin, un indicateur donne la valeur des écarts de hauteurs, moyennés à chaque temps de bloc, entre chacun des quatre bassins. Un second graphique donne accès à la variation de la valeur moyenne des écarts de hauteurs existant entre chaque bassin au cours du temps. Lorsque cette dernière tend vers une valeur asymptotique (autour de 0, en général +/-5 mm) les hauteurs de chute sont considérées équilibrées.

La position des guides sur lesquels sont installés les capteurs a été définie de manière à pouvoir mesurer le niveau d'eau dans toutes les configurations, sans avoir à effectuer un repositionnement du guide¹. Pour pouvoir utiliser pleinement les 250 mm de la zone de détection², le capteur a été positionné à 30 mm au-dessus du niveau d'eau maximal atteignable (correspondant à la hauteur des bassins : 550 mm). De cette manière, des hauteurs d'eau variant de 300 mm à 550 mm peuvent être mesurées (dans le repère de la passe).

II.2.2.c Acquisition des données

En ce qui concerne l'acquisition des données, elle est réalisée à la fréquence maximale (200 Hz). Pour définir le temps d'enregistrement des données, une acquisition de 15 min a été effectuée sur une configuration présentant visuellement une oscillation basse fréquence d'amplitude importante. Une FFT a ensuite été déterminée sur cette acquisition (Figure II-16).

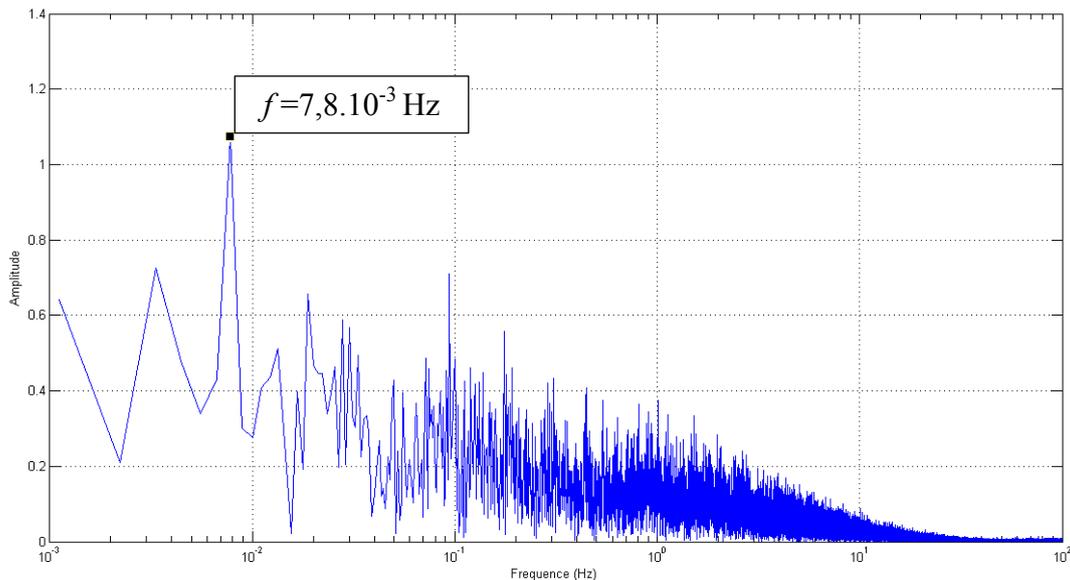


Figure II-16. Spectre du signal de hauteur pour une acquisition de 15 minutes.

Il existe un pic sur le spectre à une fréquence $f = 7,8.10^{-3}$ Hz. Dans le domaine temporel cette fréquence correspond à une période de 128 s. Pour prendre en compte l'amplitude de hauteur associée à cette fréquence, un temps d'acquisition de 300 s a été retenu pour l'ensemble des acquisitions (afin d'obtenir au moins deux périodes), l'échantillonnage a été fixé à 200 Hz.

II.2.2.d Post-traitement des données

Les résultats récupérés à l'issu des séries de mesures sont au format ASCII (.txt) recensant les hauteurs mesurées sur chacun des capteurs à chaque pas de temps à une fréquence de 200 Hz pendant 5 min.

Les fortes déformations de la surface libre ainsi que les projections de gouttelettes d'eau durant les phases d'acquisitions ont régulièrement fait perdre le signal de retour des capteurs, ce qui crée des valeurs aberrantes se retrouvant sous forme de pics dans les fichiers de données enregistrés (Figure II-17).

¹ Un repositionnement du guide implique d'effectuer une nouvelle fois la mesure des hauteurs de références.

² La gamme de détection varie de 30 mm jusqu'à 280 mm à partir du capteur

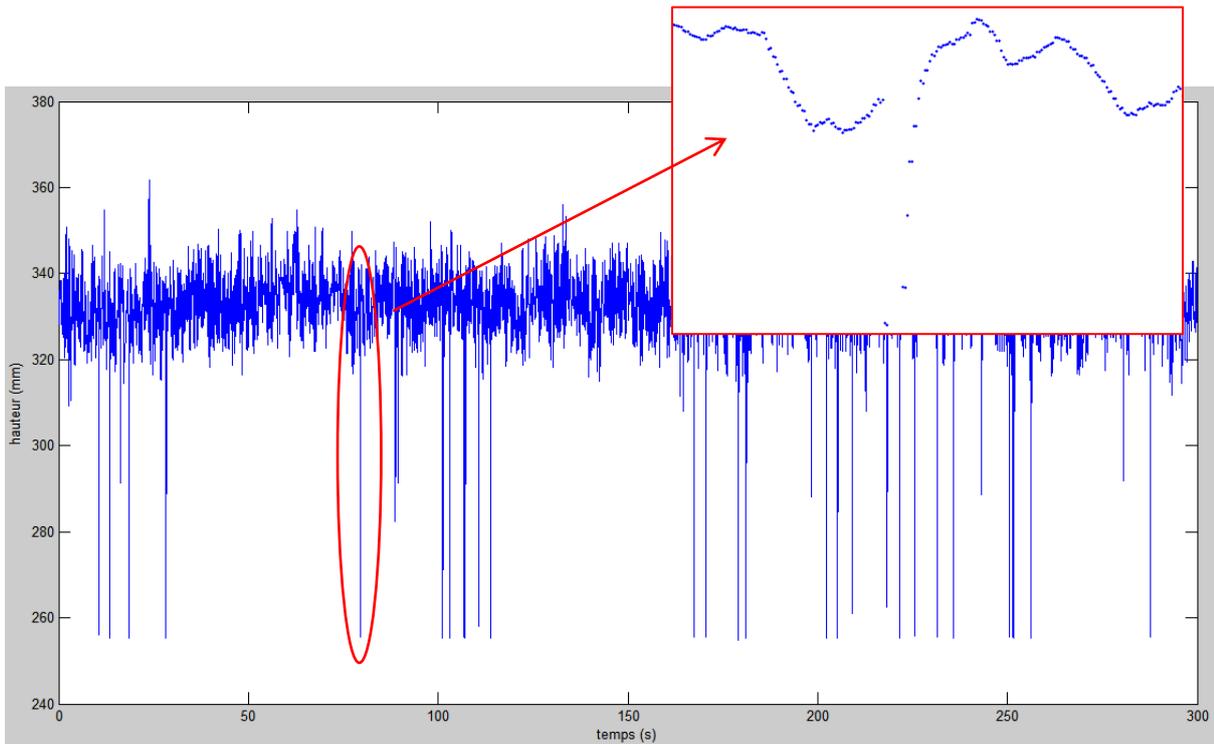


Figure II-17. Exemple d'une acquisition de hauteur comportant des valeurs aberrantes dues à la perte de signal du capteur.

Ces fichiers bruts de points ont donc été filtrés avant toute autre opération et analyse. L'utilisation d'un filtre passe-bas est suffisante pour atténuer tous les pics. En revanche, avec ce type de filtre l'information concernant l'amplitude des fluctuations est perdue. Afin d'éviter cela, un filtre de vitesse a été développé qui calcule dans un premier temps la dérivée du signal de hauteur (Figure II-18).

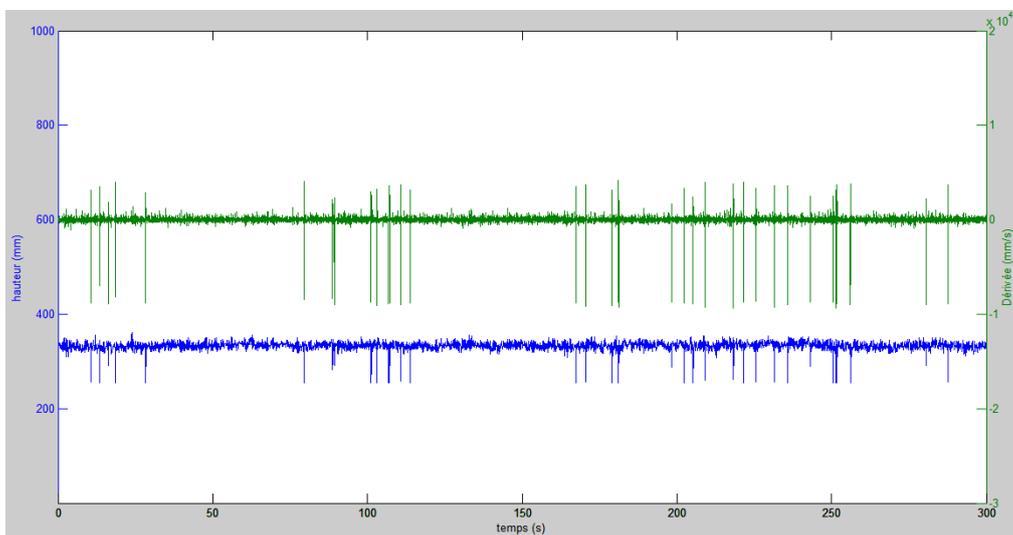


Figure II-18. Signal de hauteur (en bleu) et sa dérivée (en vert) pour la détection des pics.

Elle est l'image de la vitesse à laquelle varie la hauteur d'eau mesurée entre deux points consécutifs. La suppression des points aberrants débute dès lors que la valeur de la vitesse entre deux points est supérieure à une valeur seuil. Cette valeur correspond à l'application d'un coefficient multiplicateur k_f sur l'écart-type calculé de l'ensemble du signal³. La valeur de k_f (entre 2 et 4) est définie par l'utilisateur de manière à enlever les pics sans atténuer l'amplitude du signal. La suppression des points s'arrête dès qu'un point revient dans une zone définie par

³ Le signal considéré est celui correspondant à la dérivée du signal de hauteur.

l'écart-type autour de la moyenne du signal de hauteur. Les points supprimés sont ensuite remplacés au moyen d'une interpolation (Figure II-19).

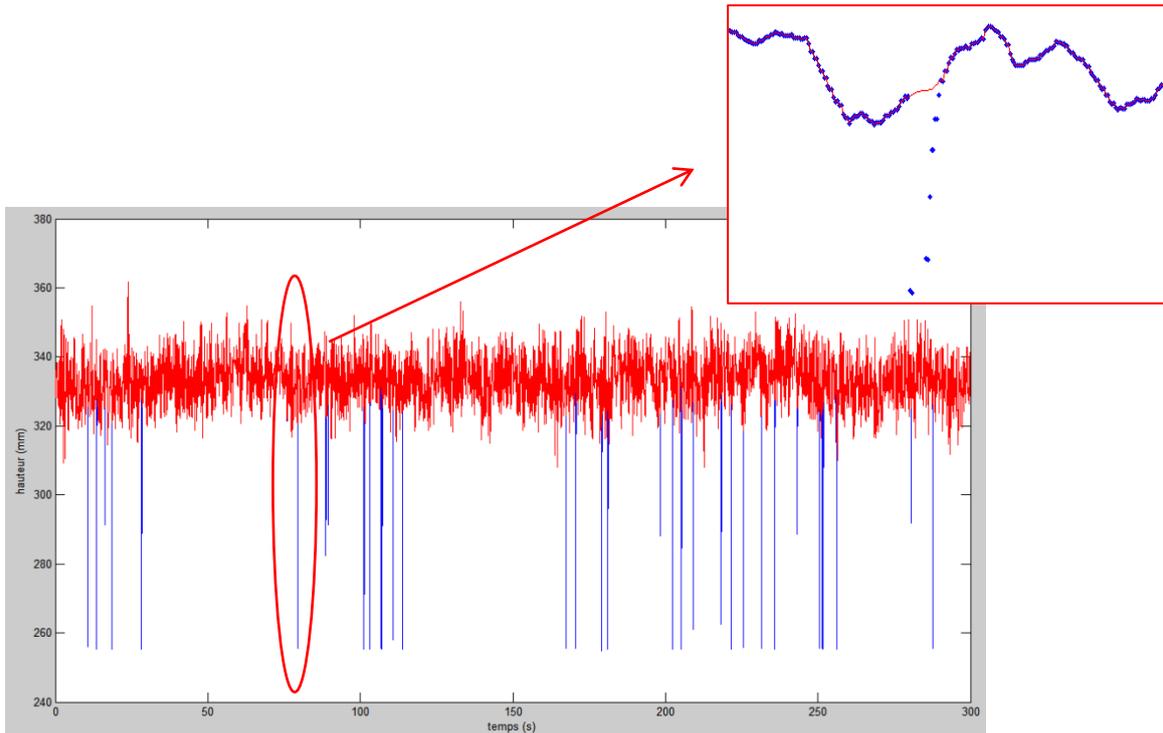


Figure II-19. Signal non filtré (en bleu) et signal après filtrage (en rouge).

II.2.3 Incertitudes de mesures

L'évaluation des incertitudes associées à la mesure du coefficient de débit est primordiale pour garantir une bonne qualité d'analyse. Elle permet d'attester d'une certaine objectivité et significativité lors de la comparaison des résultats.

La méthode utilisée pour évaluer les incertitudes sur le coefficient de débit est basée sur celle proposée par le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (JCGM, 2008). Ce document donne la définition suivante de l'incertitude de mesure :

« paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande »

La valeur mesurée est appelée estimation et son écart-type estimé associé est appelé incertitude-type. L'incertitude-type associée à un mesurande peut être déterminée à partir de lois de distribution de fréquence (incertitude de type A). Dans ce cas, la meilleure estimation du mesurande X correspond à la moyenne arithmétique \bar{x} des n observations indépendantes x_i (eq.II-5).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n x_i \quad (\text{eq.II-5})$$

L'incertitude-type $u(x_i)$ (eq.II-7), définie comme étant le meilleur estimateur de l'écart-type sur la valeur moyenne, est alors calculée à partir de l'écart-type expérimental s_{exp} (racine carrée de la variance) (eq.II-6) :

$$s_{exp} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (\text{eq.II-6})$$

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n}} \cdot s_{exp} \quad (\text{eq.II-7})$$

L'incertitude-type peut également être déterminée grâce à des lois *a priori*, établies à partir d'un jugement scientifique basé sur des mesures antérieures, des spécifications de constructeur ou encore sur des connaissances empiriques (incertitude de type B). En considérant par exemple une répartition uniforme des valeurs mesurées possibles sur un intervalle $[-a; a]$, une loi rectangulaire peut être utilisée et l'incertitude-type devient (eq.II-8) :

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{eq.II-8})$$

Pour évaluer l'incertitude-type composée $u_c(y)$ d'un résultat y obtenu à partir de plusieurs grandeurs mesurées x_i , les incertitudes associées à ces grandeurs d'entrée doivent être prises en compte. Lorsque ces dernières sont indépendantes, l'incertitude type composée est évaluée à partir de l'équation suivante (eq.II-9) :

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u(x_i)^2} \quad (\text{eq.II-9})$$

avec $y = f(x_1, x_2 \dots x_n)$ et f la relation fonctionnelle permettant de déterminer y à partir des grandeurs x_1 à x_n . Les dérivées partielles $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ sont appelées coefficients de sensibilité. Elles permettent de définir l'importance du rôle joué par chacune des grandeurs d'entrée sur l'incertitude associée à la grandeur de sortie.

Enfin, il est d'usage de définir un intervalle autour du résultat de mesure dans lequel peut raisonnablement se trouver une grande proportion de la distribution des valeurs du mesurande.

Cette nouvelle définition de l'incertitude, appelée incertitude élargie U_e , est obtenue par l'application d'un facteur d'élargissement k sur l'incertitude-type $u_c(y)$ (eq.II-10) :

$$U_e = k \cdot u_c(y) \quad (\text{eq.II-10})$$

En règle générale, le coefficient k est choisi dans une plage allant de $k=2$ à $k=3$. Pour l'expression de l'incertitude élargie sur la mesure du coefficient de débit, un coefficient $k=2$ a été adopté. Le niveau de confiance associée à l'intervalle ainsi obtenu est de 95%.

L'estimation du coefficient de débit et son incertitude élargie associée nécessite donc de prendre en compte l'ensemble des incertitudes associées à chacune des grandeurs qui interviennent dans sa détermination. La méthode utilisée pour les mesurages de ces grandeurs d'entrée, ainsi que les estimations des incertitudes liées à ces mesurages sont détaillées ci-après :

- Largeur de fente b : La largeur des fentes de la passe à poissons du laboratoire a été mesurée à l'aide de cales étalons. La largeur de fentes a été mesurée à la base, au milieu et au sommet de chacune des 5 fentes. La largeur nominale est de $7,5 \cdot 10^{-3}$ m, la largeur moyenne obtenue par mesurage est de $7,483 \cdot 10^{-3}$ m. L'incertitude-type relative $u(b)/b$ associée à ce mesurage tient compte des performances métrologiques des cales et vaut 0,86%.

- La pente s : La pente du canal est réglable et est ajustée avec des cales. Leurs valeurs nominales sont : $s=5\%$; $7,5\%$; 10% ; $12,5\%$ et 15% . La mesure de ces 5 pentes a été effectuée à l'aide d'un mètre ruban de 2 m de classe II d'Erreur Maximale Tolérée (EMT) égale à $7 \cdot 10^{-4}$ m. La distance altitudinale entre le châssis et le canal a été mesurée à intervalles réguliers le long de la passe à poissons. Les pentes ont ensuite été calculées en propageant les incertitudes sur chaque mesure. Les pentes moyennes obtenues par mesurage sont $s=5,36\%$; $7,82\%$; $10,33\%$; $12,93\%$ et $15,36\%$, donnant une erreur systématique moyenne de $0,34\%$. Les incertitudes-types relatives $u(s)/s$ associées à ces mesurages tiennent compte des performances métrologiques du mètre ruban et valent respectivement $1,30\%$; $1,26\%$; $1,12\%$; $1,02\%$ et $0,90\%$.
- La hauteur de seuil h_s : La hauteur des seuils a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse d'une capacité de $150 \cdot 10^{-3}$ m à $0,01 \cdot 10^{-3}$ m et d'EMT connue ($50 \cdot 10^{-6}$ m) conforme à la norme NF E 11-091 : 2013. Les hauteurs nominales des trois dimensions de seuils sont $h_s=37,5 \cdot 10^{-3}$ m ; $75 \cdot 10^{-3}$ m et $112,5 \cdot 10^{-3}$ m. Les hauteurs moyennes issues des mesurages des quatre seuils de chacune des dimensions précédemment citées valent respectivement $h_s=37,15 \cdot 10^{-3}$ m ; $75,40 \cdot 10^{-3}$ m et $112,50 \cdot 10^{-3}$ m. Les incertitudes-types relatives $u(h_s)/h_s$ associées à ces mesurages tiennent compte des performances métrologiques du pied à coulisse et valent respectivement $0,35\%$; $0,1\%$ et $0,08\%$.
- Les hauteurs d'eau à mi-bassin Z_0 et Z : Les hauteurs d'eau à mi-bassin sont mesurées grâce à des sondes acoustiques de marque Microsonic (cf. spécification Tableau 3). Les sondes sont positionnées perpendiculairement au radier, 30 mm au-dessus du canal et au milieu des bassins. Les parois délimitant les bassins n'étant pas perpendiculaires au radier, l'intersection des ondes envoyées par les sondes et la surface libre ne se situe pas tout à fait au milieu des bassins et une correction doit être apportée à la hauteur mesurée (Figure II-20). Pour une pente donnée, il existe une relation linéaire entre ces hauteurs corrigées

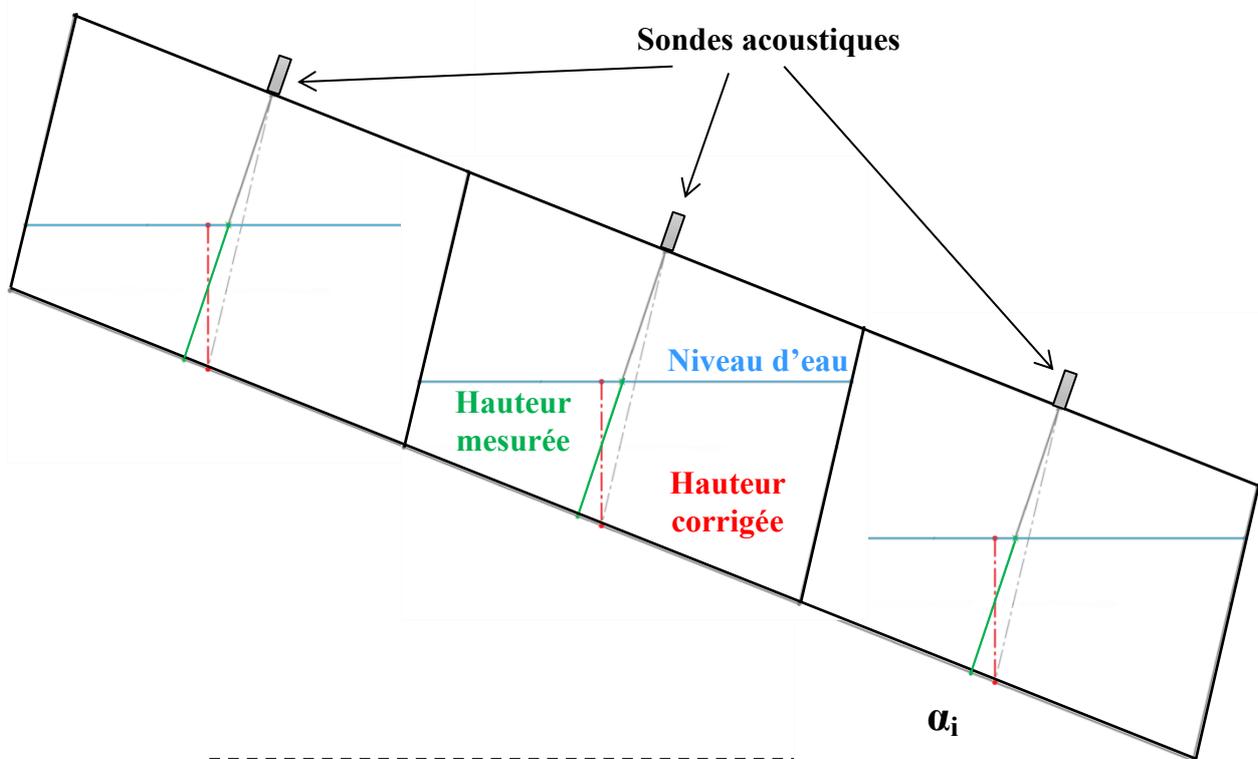


Figure II-20. Correction sur la hauteur mesurée. En rouge la hauteur corrigée, en vert la hauteur mesurée, en bleu le niveau d'eau dans le bassin. α correspond à l'angle d'inclinaison de la passe à poissons.

(Z_0 et Z) et les hauteurs mesurées Z_{0mes} et Z_{mes} . Les coefficients de ces fonctions affines en fonction de la pente sont donnés dans le tableau 4 :

Pente du canal (%)		5	7,5	10	12,5	15
$Z_0 = a.Z_{mes} + b$	a	0,9987	0,9972	0,9950	0,9923	0,9889
	b (m)	$2,896.10^{-3}$	$4,338.10^{-3}$	$5,771.10^{-3}$	$7,194.10^{-3}$	$8,604.10^{-3}$

Tableau 4. Coefficient des fonctions affines utilisées pour corriger les mesures de hauteurs d'eau.

La procédure d'étalonnage des capteurs ajoute des incertitudes à la mesure des hauteurs d'eau. L'étalonnage permet de convertir le signal en unité de tension (Volt) en unité de distance (m). Le protocole d'étalonnage est le suivant :

- Positionnement d'une cale étalon sous la sonde (elle-même positionnée au milieu des bassins sur le canal). Cette cale cylindrique a été usinée à l'atelier du laboratoire et a une longueur nominale de 350 mm. La longueur de cette cale a ensuite été contrôlée sur un marbre à l'aide de cales d'épaisseur de marque MITUTOYO et d'un palpeur MITUTOYO de capacité $0,8.10^{-3}$ m à $0,01.10^{-3}$ m d'EMT connues. L'incertitude du palpeur s'est révélée négligeable devant la dispersion de la mesure de longueur effectuée en plusieurs points sur la surface de la cale. La valeur moyenne de la longueur de la cale est de $350,23.10^{-3}$ m et l'incertitude-type relative associée à cette mesure est de 0,022%.
- Mesure de la distance entre la sonde et la cale étalon à l'aide d'un pied à coulisse d'une capacité de 150.10^{-3} m à $0,01.10^{-3}$ m et d'EMT connue (50.10^{-6} m) conforme à la norme NF E11-091 : 2013. Cette valeur est ensuite renseignée dans le logiciel d'acquisition.
- Acquisition de 1000 échantillons (valeurs en Volt) via le logiciel d'acquisition. La tension moyenne de ces 1000 échantillons est ensuite liée à la distance mesurée au pied à coulisse.
- Déplacements verticaux de la sonde à l'aide du guide à crémaillère (précision au dixième de millimètre). Les nouvelles distances séparant la cale de la sonde sont renseignées et de nouvelles acquisitions de 1000 échantillons sont effectuées. L'étalonnage est effectué sur 5 points balayant toute la plage de détection des sondes (250.10^{-3} m).
- Une droite d'étalonnage est ensuite calculée par régression linéaire à partir des valeurs moyennes de tension obtenues sur chacun des points.

La dispersion des échantillons par rapport à la droite d'étalonnage a été évaluée. L'incertitude-type relative d'étalonnage prenant en compte les défauts de géométrie de la cale et les erreurs de mesurage est de 0,26%.

L'incertitude liée à la répétabilité de la mesure de hauteur (erreur aléatoire) a été évaluée en calculant les hauteurs moyennes obtenues à partir d'essais répétés en respectant toujours le même protocole (extinction de la pompe, remise en position initiale de la guillotine, remise en position initiale des sondes de hauteurs, démarrage de la pompe, réglage guillotine, réglage de la position des sondes). L'incertitude-type relative obtenue est de 0,15%.

- L'accélération de la pesanteur g : L'accélération de la pesanteur en fonction de l'altitude et de la latitude du lieu est donnée par la norme NF X 02-011 : 1974. La passe à poissons du laboratoire se situe à une latitude de $46,66^\circ$ et à une altitude de 100 m. Localement, l'accélération de la pesanteur est de $9,8073 \text{ m.s}^{-2}$ avec une incertitude-type relative de 5.10^{-5} .
- Le débit volumique Q : 4 débits ont été étudiés : $Q=0,018 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $0,023 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; $0,027 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et $0,032 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. La mesure du débit est effectuée à l'aide d'un débitmètre électromagnétique Proline Promag 10W DN80 d'EMT connue (0,5%). L'incertitude-type prend en compte les performances métrologiques du débitmètre et vaut 0,29%.

- La longueur des bassins L : La longueur nominale des bassins est de $L=750.10^{-3}$ m. La longueur de chacun des bassins a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban de 2 m de classe II d'Erreur Maximale Tolérée (EMT) égale à 7.10^{-4} m, à plusieurs niveaux et à différentes positions longitudinales. La longueur moyenne des bassins est $L=754,4.10^{-3}$ m. L'incertitude-type qui tient compte des défauts géométriques des bassins et des performances métrologiques du mètre est de 0,1%.
- Enfin, le biais introduit par le déséquilibre des hauteurs d'eau pouvant exister entre les bassins a été pris en compte dans le calcul de l'incertitude sur le coefficient de débit. Ce biais induit un déséquilibre de hauteur de chute et donc une variation de la vitesse débitante maximale de l'écoulement estimée dans l'équation du coefficient de débit par $V_d = \sqrt{2.g.L.s}$. Le sens du biais lié à ce déséquilibre a été déterminé et permet d'asymétriser l'erreur autour du coefficient de débit estimé.

Les incertitudes-types composées puis les incertitudes élargies sur toutes les mesures des coefficients de débit ont donc été calculées à partir de toutes ces données. Les coefficients de débits mesurés varient de 0,6 à 0,9, toutes configurations confondues. Les parts de chaque grandeur d'entrée sur les incertitudes élargies moyennes associées au coefficient de débit sont représentées sur la figure II-21.

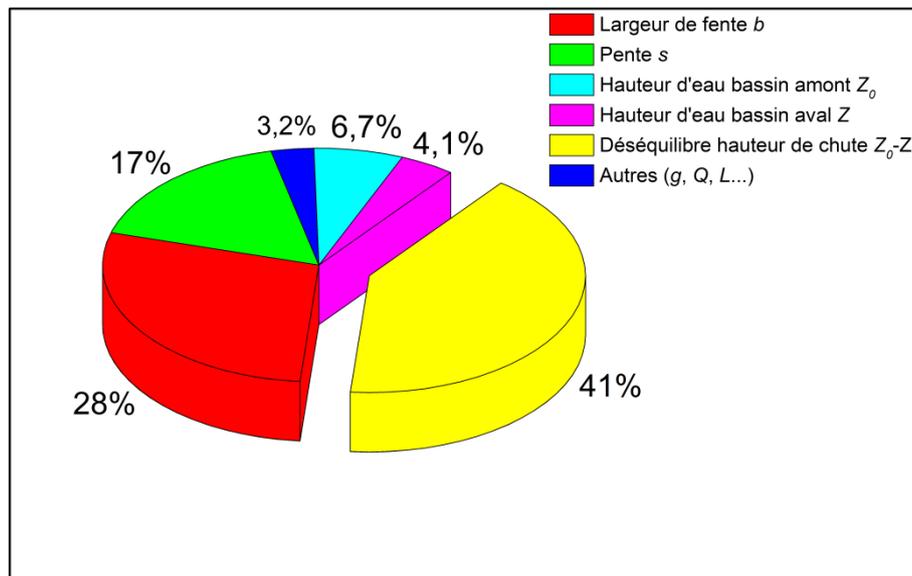


Figure II-21. Contribution moyenne des différentes grandeurs d'entrées sur les incertitudes élargies moyennes associées aux mesures du coefficient de débit.

Le déséquilibre de hauteur de chute est le facteur qui influence le plus la valeur de l'incertitude de mesure du coefficient de débit (Figure II-21). L'incertitude sur la largeur de la fente et sur la pente contribuent également fortement à l'incertitude globale. La répartition montrée ici est une répartition moyenne sur l'ensemble des mesures. La part de chacun des facteurs est variable en fonction notamment de la pente.

L'histogramme de la figure II-22 donne la répartition de l'incertitude de mesure relative associée à chacun des points de mesures. Elle est globalement concentrée autour de 4% avec 90% des mesures qui ont une incertitude relative comprise entre 3,5 et 7,5%.

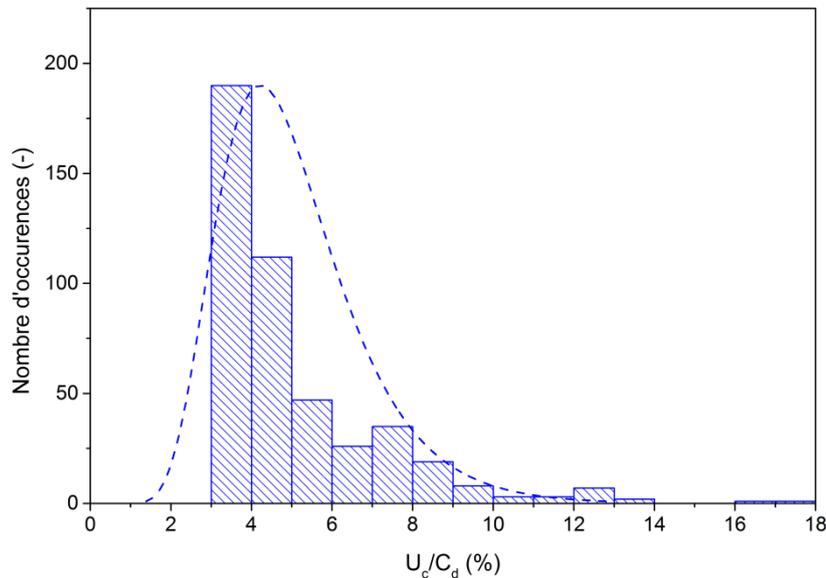


Figure II-22. Histogramme de l'incertitude relative sur la mesure du coefficient de débit pour l'ensemble des points de mesures.

II.3 Profils de vitesses et topologies

Des mesures de vitesses ont été effectuées dans la passe à poissons du laboratoire à l'aide d'un Vélocimètre Acoustique à effet Doppler (ADV SonTek MicroADV 16 Mhz). L'objectif de ces mesures est de caractériser au mieux l'influence des dispositifs étudiés (seuils, macro-rugosités et structures souples) à la fois sur la structure de l'écoulement (topologie) et sur sa cinématique.

Le principe de fonctionnement de la sonde ADV est basé sur l'effet Doppler. Un signal acoustique émis à haute fréquence par l'émetteur de la sonde percute des particules en mouvement dans un volume de mesure. La vitesse qui anime ces particules induit un décalage en fréquence entre le signal émis et le signal reçu par la sonde. Connaissant la fréquence d'émission de l'onde acoustique et la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré (ici de l'eau), la vitesse des particules présentes dans le volume de mesure peut être calculée à partir de la mesure de la fréquence de réception.

La sonde ADV est composée d'un corps étanche comportant tout le système de conditionnement du signal et d'une tige au bout de laquelle se trouve 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 $0,1 \text{ cm}^3$ et est situé à 5 cm de l'émetteur.

Les particules utilisées sont des particules de polyamide 12 de marque Vestosint® (réf : 2157). Leur diamètre moyen est de $56 \mu\text{m}$ et leur densité est proche de celle de l'eau (1,016).

La sonde avec laquelle les profils de vitesses ont été réalisés a été positionnée sur un système asservi en position comportant 3 tables de déplacement permettant de faire varier la position de la sonde dans les trois directions de l'espace. Une interface Labview gère à la fois l'acquisition des données et le déplacement de la sonde ADV. Les profils sont réalisés de manière automatique grâce au logiciel d'acquisition qui permet, par l'intermédiaire de la lecture d'un fichier de maillage, de déplacer la sonde automatiquement d'un point à un autre dès que le temps d'acquisition est atteint.

Les grandeurs déduites des mesures sont :

- Les trois composantes de la vitesse moyenne :

$$U(x, y, z) = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} u_i(x, y, z, t_i) \quad (\text{eq.II-11})$$

$$V(x, y, z) = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} v_i(x, y, z, t_i) \quad (\text{eq.II-12})$$

$$W(x, y, z) = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} w_i(x, y, z, t_i) \quad (\text{eq.II-13})$$

avec $u_i(x, y, z, t_i)$, $v_i(x, y, z, t_i)$, $w_i(x, y, z, t_i)$ les trois composantes d'un vecteur instantané à un instant t_i , définies par leur coordonnées x, y et z . L'indice i permet de situer les vecteurs dans les N_e échantillons successifs.

- Le module tridimensionnel du vecteur vitesse moyen :

$$\|V\|_{3D} = \sqrt{U(x, y, z)^2 + V(x, y, z)^2 + W(x, y, z)^2} \quad (\text{eq.II-14})$$

- Le module bidimensionnel (dans le plan XY) du vecteur vitesse moyen :

$$\|V\|_{2D} = \sqrt{U(x, y, z)^2 + V(x, y, z)^2} \quad (\text{eq.II-15})$$

- Les moyennes quadratiques des trois composantes fluctuantes de vitesses :

$$RMS_u = \sqrt{\overline{u'^2}(x, y, z)} = \sqrt{\frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1}^{N_e} (u_i(x, y, z, t_i) - U(x, y, z))^2} \quad (\text{eq.II-16})$$

$$RMS_v = \sqrt{\overline{v'^2}(x, y, z)} = \sqrt{\frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1}^{N_e} (v_i(x, y, z, t_i) - V(x, y, z))^2} \quad (\text{eq.II-17})$$

$$RMS_w = \sqrt{\overline{w'^2}(x, y, z)} = \sqrt{\frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1}^{N_e} (w_i(x, y, z, t_i) - W(x, y, z))^2} \quad (\text{eq.II-18})$$

- L'énergie cinétique turbulente pour un écoulement tridimensionnel :

$$k_{3D} = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2}(x, y, z) + \overline{v'^2}(x, y, z) + \overline{w'^2}(x, y, z) \right) \quad (\text{eq.II-19})$$

- L'énergie cinétique turbulente pour un écoulement bidimensionnel :

$$k_{2D} = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2}(x, y, z) + \overline{v'^2}(x, y, z) \right) \quad (\text{eq.II-20})$$

II.3.1 Position des profils de vitesses

Les profils de vitesses ont été réalisés grâce à la sonde ADV citée précédemment. L'origine du repère lié à la passe à poissons (X, Y, Z) est située à l'intersection du plan formé par la paroi amont (côté intérieur au bassin), de celui formé par la paroi latérale (côté petit déflecteur) et de celui du radier (Figure II-23). L'axe X est dans le sens de l'écoulement et parallèle au radier, l'axe Y pointe vers l'intérieur du bassin, l'axe Z est donc dirigé vers le haut.

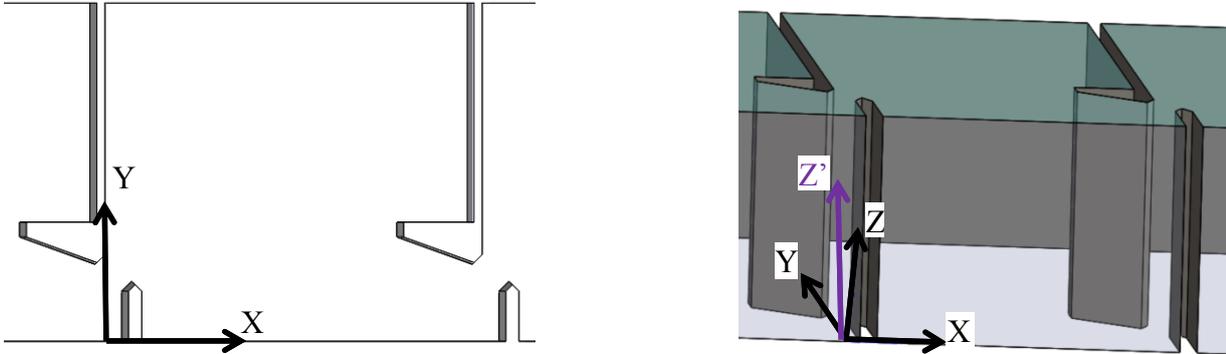


Figure II-23. Position et orientation du repère lié à la passe à poissons (X, Y, Z) et de l'axe Z' définissant la direction verticale du repère absolu (repère terrestre).

Un ensemble de 8 profils de vitesses a été défini de manière à caractériser l'écoulement, 4 dans un plan parallèle au radier et 4 dans des plans verticaux (Figure II-24). Les deux profils transversaux (A et B) ainsi que les deux profils longitudinaux (E et F) sont définis dans un plan parallèle au plan XY à $Z/b=2$ (avec b la largeur de la fente). Pour ces profils, les premiers et derniers points sont situés à 50 mm des parois. Les profils verticaux sont dirigés suivant l'axe Z' (repère terrestre) et le premier point est situé à 10 mm du radier (ou de la rugosité de fond). Le pas d'échantillonnage pour tous les profils est de 15 mm.

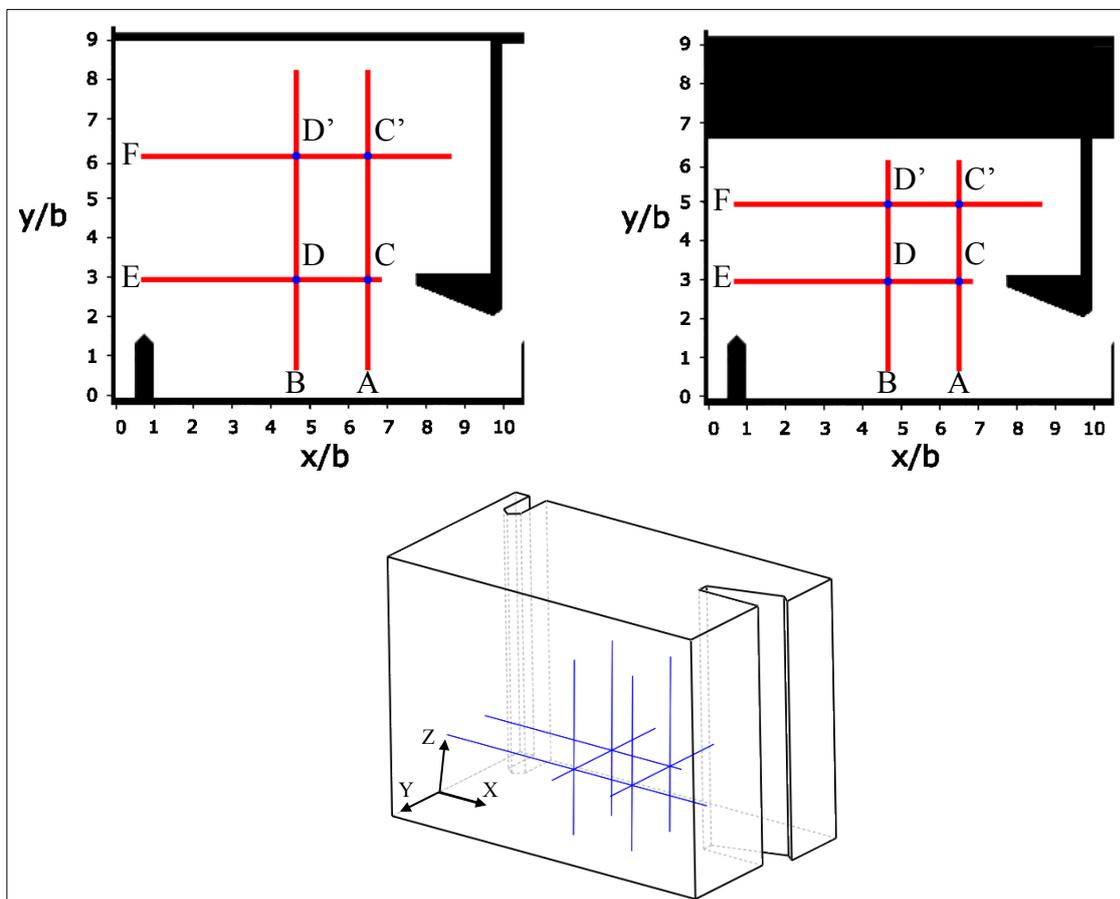


Figure II-24. Profils de vitesses définis pour étudier l'écoulement dans la passe à poissons.

Les profils A et B sont des profils suivant Y situés respectivement à $X/b=6,5$ et $X/b=4,7$. Les profils E ($Y/b=2,95$) et F ($Y/b=4,92$ pour $B/b=6,67$ et $Y/b=6,07$ pour $B/b=9$) sont des profils suivant X . Le profil F est situé au milieu de la zone définie par le grand déflecteur et la paroi opposée à la fente. Les profils C, C', D et D' sont des profils verticaux et se situent à l'intersection des profils longitudinaux et transversaux. Le tableau 5 récapitule la position de tous les profils pour les deux largeurs de bassins étudiées ($B/b=9$ et $B/b=6,67$).

	$B/b=6,67$			$B/b=9$		
	X/b	Y/b	$Z/b, Z'/b$	X/b	Y/b	$Z/b, Z'/b$
A	6,51	0,67 à 6,1	2	6,51	0,67 à 8,3	2
B	4,67	0,67 à 6,1	2	4,67	0,67 à 8,3	2
C	6,31 à 6,66	2,95	0,13 à 5	6,31 à 6,66	2,95	0,13 à 5
C'	6,31 à 6,66	4,92	0,13 à 5	6,31 à 6,66	6,07	0,13 à 5
D	4,47 à 4,82	2,95	0,13 à 5	6,31 à 6,66	2,95	0,13 à 5
D'	4,47 à 4,82	4,92	0,13 à 5	6,31 à 6,66	6,07	0,13 à 5
E	0,67 à 6,87	2,95	2	0,67 à 6,87	2,95	2
F	0,67 à 8,67	4,92	2	0,67 à 8,67	6,07	2

Tableau 5. Coordonnées des profils de vitesses dans le repère de la passe à poissons.

Les profils ont été réalisés à un débit $Q^A=4,8$, pour une pente $s=7,5\%$ et pour $B/b=6,67$ et 9. Dans le cas où la passe à poissons ne disposait d'aucun dispositif particulier (qualifiée de « passe à poissons avec radier lisse » dans ce document), les profils pour une pente $s=10\%$ ont été mesurés. L'influence de la pente sur la cinématique de l'écoulement a ainsi pu être étudiée. Ces mêmes profils ont été mesurés dans le cas où la passe à poissons était munie de seuils de hauteurs $h_s/b=0,5$; 1 et 1,5. Dans le cas de la passe à poissons munie de rugosités de fond, seuls les profils B, D, D' et E ont été réalisés pour les deux densités $d_r=10\%$ et 15%. La mesure de ces quatre profils a été jugée suffisante pour pouvoir mettre en avant l'effet des rugosités sur l'écoulement et permettre une comparaison avec les simulations numériques. Enfin pour les structures souples, les profils B, D, D', E et F ont été réalisés.

	$B/b=6,67$ et 9			
	Radier lisse	Seuils	Macro-rugosités	Structures souples
A	✓	✓		
B	✓	✓	✓	✓
C	✓	✓		
C'	✓	✓		
D	✓	✓	✓	✓
D'	✓	✓	✓	✓
E	✓	✓	✓	✓
F	✓	✓		✓

Tableau 6. Profils de vitesses réalisés pour chaque configuration.

II.3.2 Conditions de mesure de la topologie

Dans les passes à fentes verticales, la pente, la largeur des bassins et le débit sont les principaux paramètres influençant la topologie de l'écoulement. Deux topologies distinctes (Figure II-25) ont été mises en évidence (Wu *et al.*, 1999 ; Wang *et al.*, 2010), avec un passage de l'une à l'autre par l'intermédiaire d'une zone de transition où l'écoulement n'est ni périodique ni permanent.

La topologie de type 1 (T1) est caractérisée par la formation d'un jet reliant la fente amont à la fente aval avec, de part et d'autre, deux zones principales de recirculation contrarotatives.

En ce qui concerne la topologie de type 2 (T2), le jet va cette fois impacter la paroi opposée à la fente puis se diriger vers la fente aval en contournant le déflecteur principal, créant une zone de recirculation importante derrière le déflecteur de la fente amont.

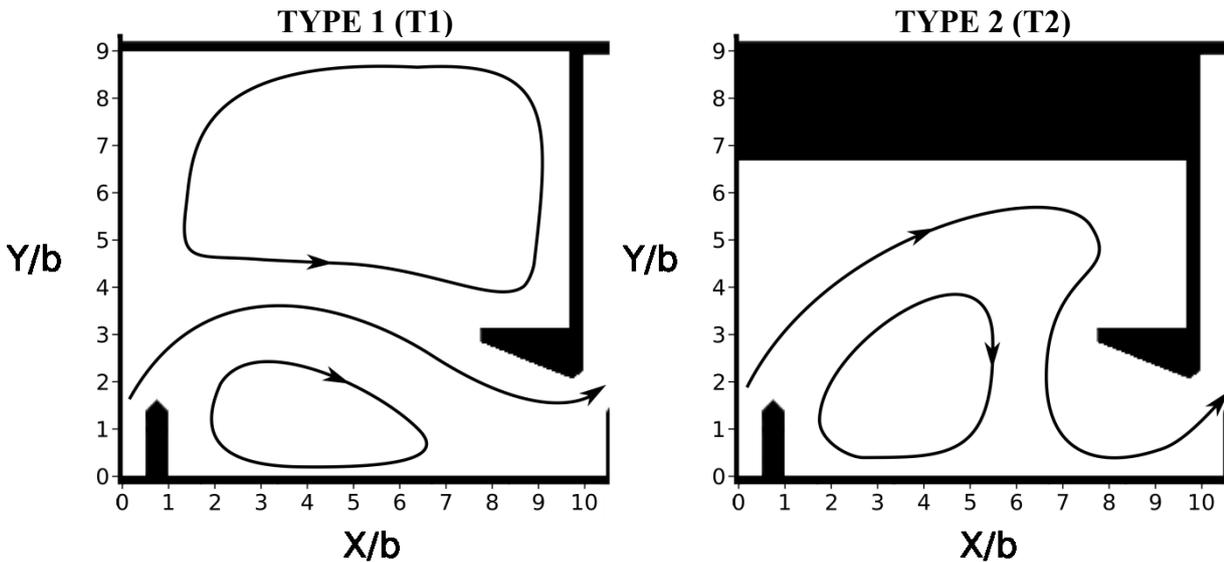


Figure II-25. Topologies d'écoulement T1 et T2 dans les passes à poissons à fentes verticales.

Pour mettre en évidence ces deux topologies mais également la transition de l'une vers l'autre, un protocole de mesure a été mis en place (Wang *et al.*, 2010). Il consiste à mesurer à l'aide d'un Vélocimètre Acoustique à effet Doppler (ADV) la composante longitudinale de la vitesse de l'écoulement (u) en un point stratégique du bassin. Ce point est à une distance de 150 mm du radier, 50 mm de la paroi opposée à la fente et à mi-longueur de bassin, correspondant à une zone de recirculation dans le cas de l'écoulement de type 1 et à une zone située dans le jet en type 2 (Figure II-26).

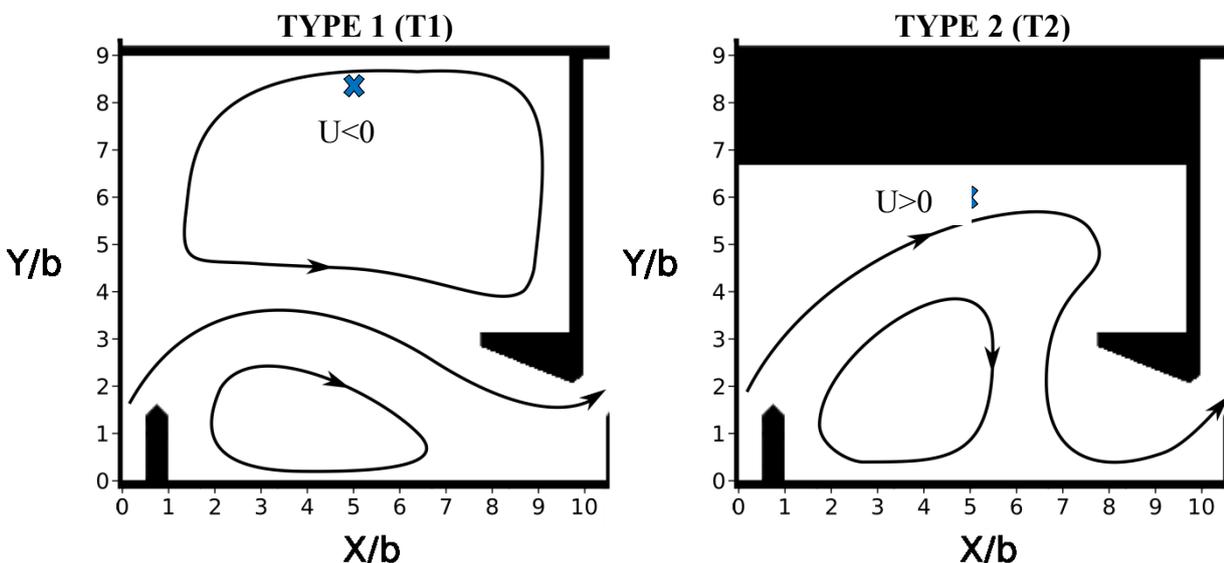


Figure II-26. Position du point de mesure (croix bleue) pour la détermination de la topologie de l'écoulement.

Les vitesses de l'écoulement dans les trois dimensions sont mesurées par la même sonde ADV que celle utilisée pour les profils de vitesses (SonTek 16 Mhz). Pour déterminer la topologie, seule la composante longitudinale (u) de la vitesse de l'écoulement de la passe à poissons est nécessaire.

Les lignes de courant représentées schématiquement sur les figures II-25 et II-26 sont issues des champs de vitesses moyennes obtenus par PIV (Tarrade *et al.*, 2006). L'écoulement étant en

réalité très turbulent et le jet pouvant présenter un battement périodique, la vitesse mesurée dans le cas d'un écoulement de type 1 n'est pas constamment négative. La règle suivante a donc été suivie pour différencier les deux topologies et la zone de transition :

Type 1 : L'acquisition de la vitesse u donne 80% d'échantillons négatifs. Autrement dit, le sens de l'écoulement au point de mesure est opposé à celui du jet pendant au moins 80% du temps d'acquisition, indiquant la présence de la zone de recirculation.

Type 2 : L'acquisition de la vitesse u donne 80% d'échantillons positifs. Dans ce cas, le jet passe par le point de mesure pendant au moins 80% du temps d'acquisition.

Transition : La vitesse u mesurée ne respecte aucun des deux critères précédents.

II.3.3 Acquisition et post-traitement des données

II.3.3.a Temps d'acquisition

Le temps d'acquisition pour la mesure de vitesse (topologie et profils de vitesses) a été fixé à 300s (5 min) suite à une analyse de convergence basée sur la vitesse moyenne et sur la moyenne quadratique des composantes fluctuantes (RMS_u, RMS_v, RMS_w) en plusieurs points de l'écoulement.

Ces points ont été positionnés à des emplacements où la vitesse est importante ou au niveau des zones de recirculation. La figure II-27 donne le positionnement des points par rapport à une topologie d'écoulement de type 2.

Position du point 1 : Sur le profil A ($X/b=6,51$; $Y/b=0,67$; $Z/b=2$).

Position du point 2 : Sur le profil E ($X/b=4,92$; $Y/b=2,95$; $Z/b=2$).

Position du point 3 : Sur le profil E ($X/b=6,73$; $Y/b=2,95$; $Z/b=2$).

Position du point 4 : Sur le profil F ($X/b=3,12$; $Y/b=4,92$; $Z/b=2$).

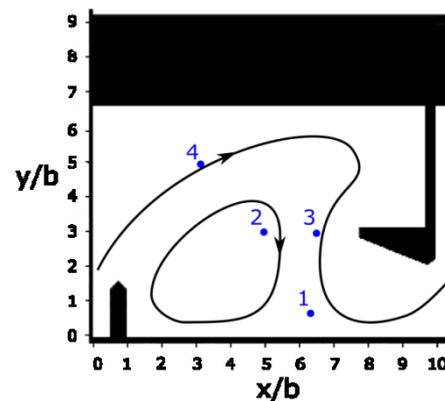


Figure II-27. Positionnement des points utilisés pour l'analyse de la convergence en temps des signaux de vitesses.

L'analyse de la convergence temporelle des signaux acquis par la sonde ADV a été faite dans la configuration de passe suivante : $B/b=6,67 - s=7,5\%$ - radier lisse. Les graphiques des figures II-28 et II-29 présentent, respectivement, l'évolution du taux de convergence déterminé sur les vitesses moyennes et sur les fluctuations. Ce taux de convergence est calculé à partir du dernier point d'acquisition (taux de convergence à 100%) qui correspond à la moyenne ou à l'écart-type du signal sur 300 s d'acquisition.

La variation maximale obtenue en fin d'acquisition sur un temps équivalent à 5% du temps d'acquisition (15 s) est de 3,5% pour les vitesses moyennes et 0,7% pour les fluctuations de vitesses pour l'ensemble des points (1, 2, 3 et 4). Ce taux de convergence a été estimé suffisant et un temps d'acquisition de 300 s a été adopté à chaque fois qu'une mesure de vitesse a été faite dans la passe à poissons (profils de vitesses et mesure de la topologie).

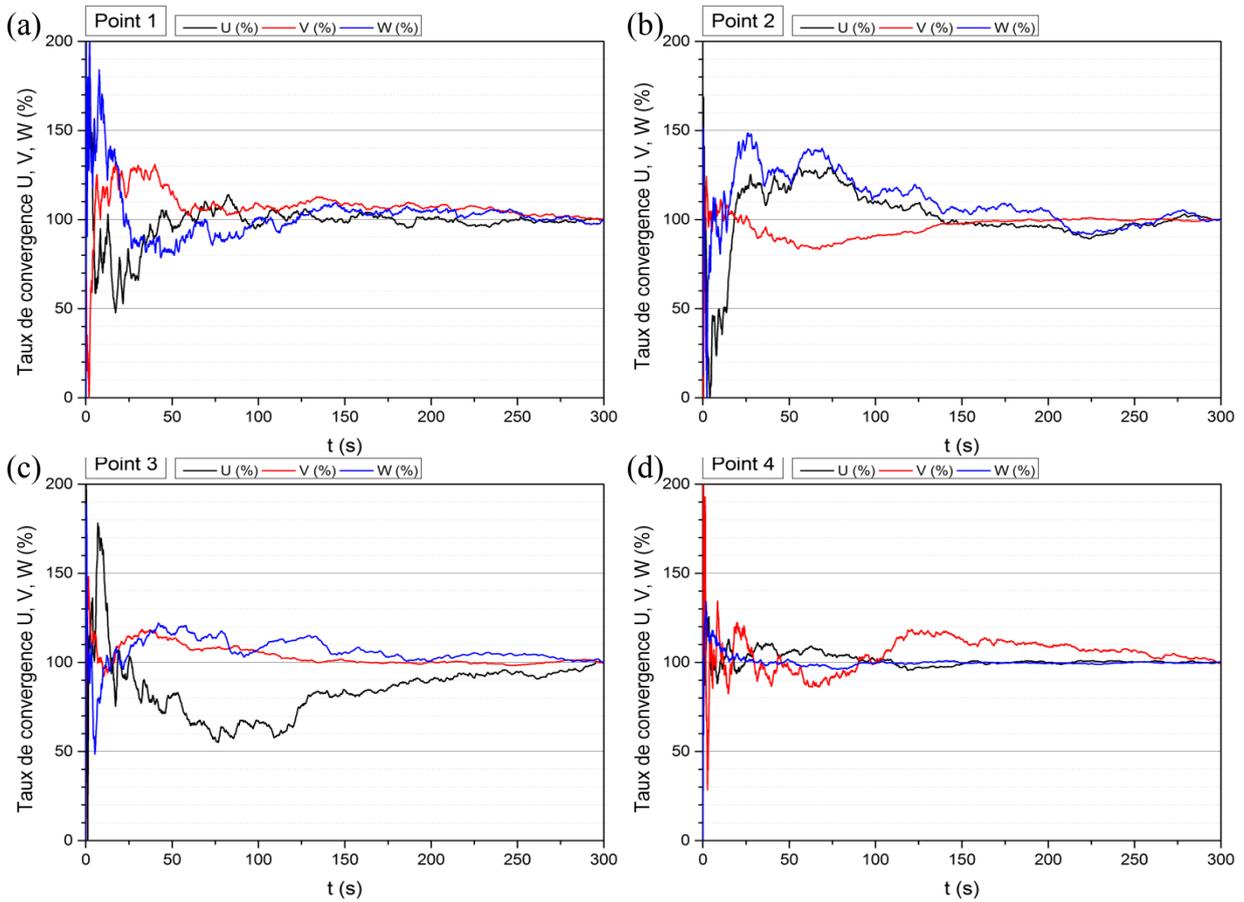


Figure II-28. Taux de convergence temporel sur les composantes de vitesses moyennes aux points 1 (a), 2 (b), 3 (c) et 4 (d).

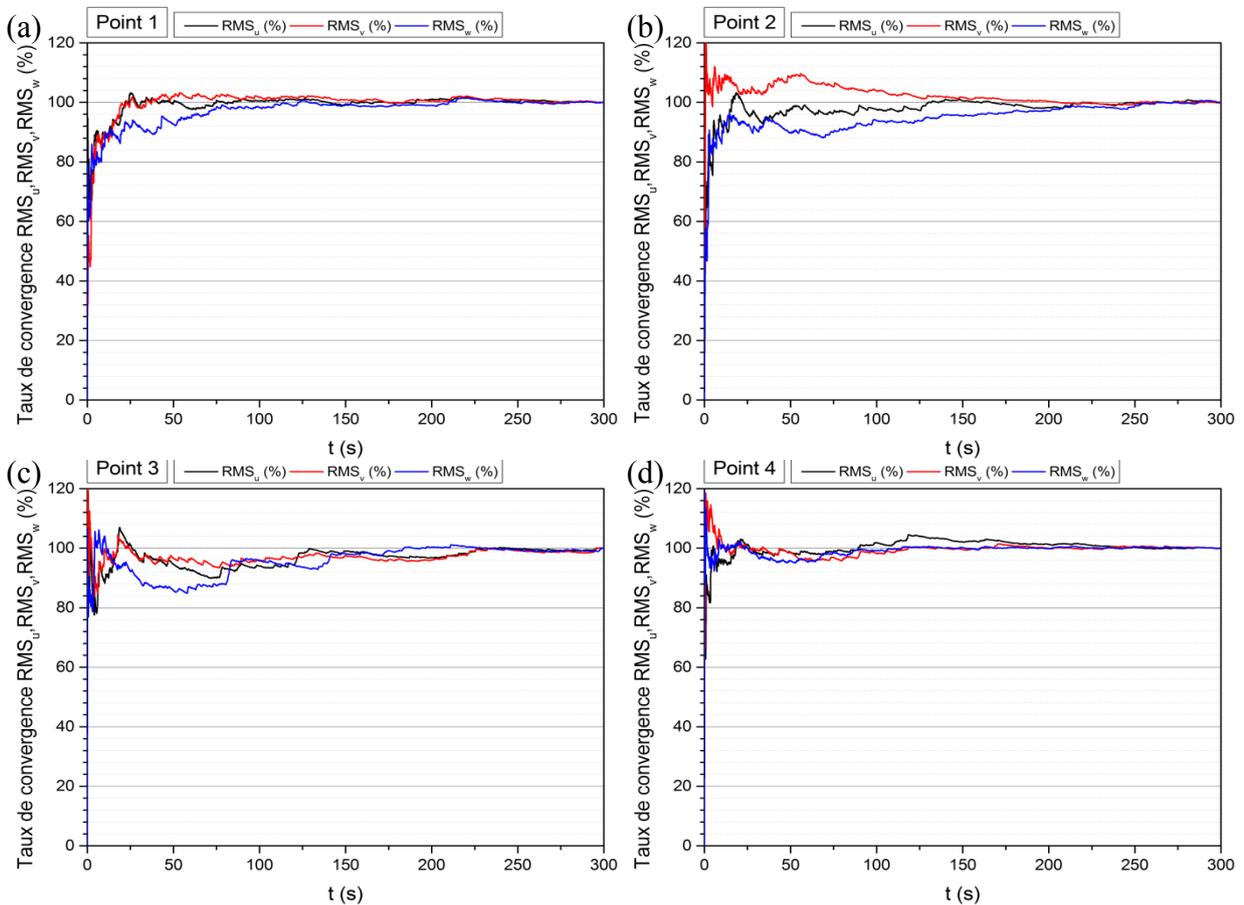


Figure II-29. Taux de convergence temporel sur les composantes fluctuantes de vitesse aux points 1 (a), 2 (b), 3 (c) et 4 (d).

II.3.3.b Filtrage

Les fichiers enregistrés suite à l'acquisition des données fournies par l'ADV contiennent, outre les trois composantes de vitesses, un certain nombre d'informations sur les caractéristiques des échantillons acquis (15000 échantillons pour 300 s d'acquisition). Ils contiennent notamment le rapport signal sur bruit (SNR), qui est une mesure de la qualité du signal reçu par l'ADV et la corrélation (COR) qui donne une indication sur la dispersion de la mesure de vitesse pendant le temps d'acquisition d'un échantillon. Il est recommandé pour obtenir une mesure fiable avec l'ADV de s'assurer d'avoir un rapport signal sur bruit $SNR > 15$ et une corrélation $COR > 70\%$ (Sontek, 1997).

Le signal fourni par l'ADV comporte souvent des valeurs aberrantes (pics) qu'il faut alors filtrer pour ne pas aboutir à des statistiques erronées. Le but du filtrage est de détecter ces pics, de les supprimer et de les remplacer. De nombreux algorithmes ont été développés pour filtrer les données issues des mesures faites avec un ADV. Certaines méthodes sont basées sur un seuillage des accélérations instantanées (filtre d'accélération), la difficulté étant alors de définir la valeur du seuil k_g . Une valeur de $k_g = 1,5.g$ (avec g la constante gravitationnelle) a été définie par Goring et Nikora (2002). Cea *et al.* (2007) proposent une méthode permettant de rendre l'utilisation de ce filtre plus objective en déterminant la valeur du seuil k_g à partir des quantités statistiques du signal (nombre d'échantillons, écart-type). De plus la valeur de ce seuil peut être adaptée aux caractéristiques du signal de chaque composante de vitesse (k_{gx} , k_{gy} , k_{gz}). Un autre type de filtre, le filtre de phase spatiale (Goring & Nikora, 2002), se base sur l'hypothèse que l'ensemble des données valides se situent à l'intérieur d'un ellipsoïde. Pour cela, les composantes fluctuantes des vitesses et leurs dérivées première et seconde par rapport au temps sont tracées les unes par rapport aux autres. Les données qui se situent en dehors de cet ellipsoïde sont alors considérées comme étant aberrantes et sont supprimées. Les propriétés géométriques de l'ellipsoïde sont définies à partir d'un critère $\lambda = \sqrt{2 \ln(n)} \sigma$, qui donne la valeur maximale attendue pour n variables aléatoires, indépendantes, distribuées uniformément et d'écart-type σ . L'utilisation d'une interpolation polynomiale basée sur les données de chaque côté des pics est considérée comme étant la méthode la plus satisfaisante pour remplacer les valeurs aberrantes (Goring & Nikora, 2002). Une comparaison entre ces deux types de filtre a été réalisée par Goring et Nikora (2002). Il en ressort que la méthode la plus adaptée pour traiter les signaux comportant des pics multiples est celle du filtre de phase spatiale. C'est ce filtre, qui ne nécessite aucun paramétrage par l'utilisateur, qui a été utilisé pour filtrer toutes les données acquises avec la sonde ADV.

II.3.4 Incertitudes de mesures

De nombreuses études ont contribué à l'évaluation de l'efficacité du système ADV pour l'étude des écoulements turbulents. Des mesures couplées entre une sonde ADV et un vélocimètre laser à effet Doppler (LDV) ont été réalisées (Voulgaris & Trowbridge, 1998) dans le but d'évaluer la précision des mesures faites avec l'ADV sur les vitesses moyennes et sur les contraintes de Reynolds. Il en ressort que l'écart entre les vitesses moyennes mesurées à l'ADV et celles mesurées avec la LDV est de l'ordre de 1%. Les contraintes de Reynolds mesurées à l'ADV sont sous-estimées d'environ 1%. La méthode d'évaluation est basée sur l'hypothèse que les volumes de contrôle des deux systèmes de mesures sont identiques et pointent au même endroit. Les vitesses mesurées à partir de la LDV et de l'ADV sont décomposées en une partie liée au bruit de mesure et une autre liée à la vitesse « vraie ». En partant de l'hypothèse que les variances de leur bruit de mesures sont égales et décorréelées, il est alors possible d'obtenir la vitesse « vraie » pour chacun des systèmes de mesure. Cette méthode donne une estimation de l'erreur relative associée à la mesure de la vitesse par une sonde ADV et démontre la capacité de cette sonde à restituer correctement les propriétés statistiques de l'écoulement. Cependant cette erreur relative est difficilement transposable aux mesures de vitesses faites dans la passe à poissons. L'existence de zones de recirculation impliquerait des incertitudes de mesures très faibles en raison des vitesses faibles, voire nulles. Pour cette raison, les incertitudes associées aux mesures de vitesses et d'énergie cinétique turbulente ont été évaluées à partir des

informations fournies par le constructeur qui annonce une erreur sur la vitesse égale à 1% de la gamme de vitesse choisie (calibre). Il est possible de choisir entre plusieurs calibres : $0,03 \text{ m.s}^{-1}$; $0,1 \text{ m.s}^{-1}$; $0,3 \text{ m.s}^{-1}$, 1 m.s^{-1} et $2,5 \text{ m.s}^{-1}$. Les vitesses dans la passe à poissons pour une pente de 7,5% n'excèdent pas 1 m.s^{-1} , c'est ce calibre qui a été utilisé. Ceci mène à une erreur estimée sur les vitesses instantanées mesurées par l'ADV égale à $0,01 \text{ m.s}^{-1}$. Le défaut d'alignement de l'ADV avec le repère de la passe à poissons a été estimé à $\pm 5^\circ$. L'incertitude relative associée à chaque composante de vitesse due à cette erreur a été estimée égale à 1%.

L'incertitude relative totale associée à chaque composante de vitesse moyenne, a été calculée à partir de l'équation générale de propagation de l'incertitude, en prenant un facteur d'élargissement $k=2$ (intervalle de confiance de 95%). Connaissant l'incertitude sur la vitesse moyenne et sur la vitesse instantanée, l'incertitude sur les normes de vitesses moyennes et sur les énergies cinétiques turbulentes a pu être déterminée. Les histogrammes (Figure II-30) donnent la répartition des incertitudes relatives pour la norme de la vitesse (3D) et l'énergie cinétique turbulente (3D).

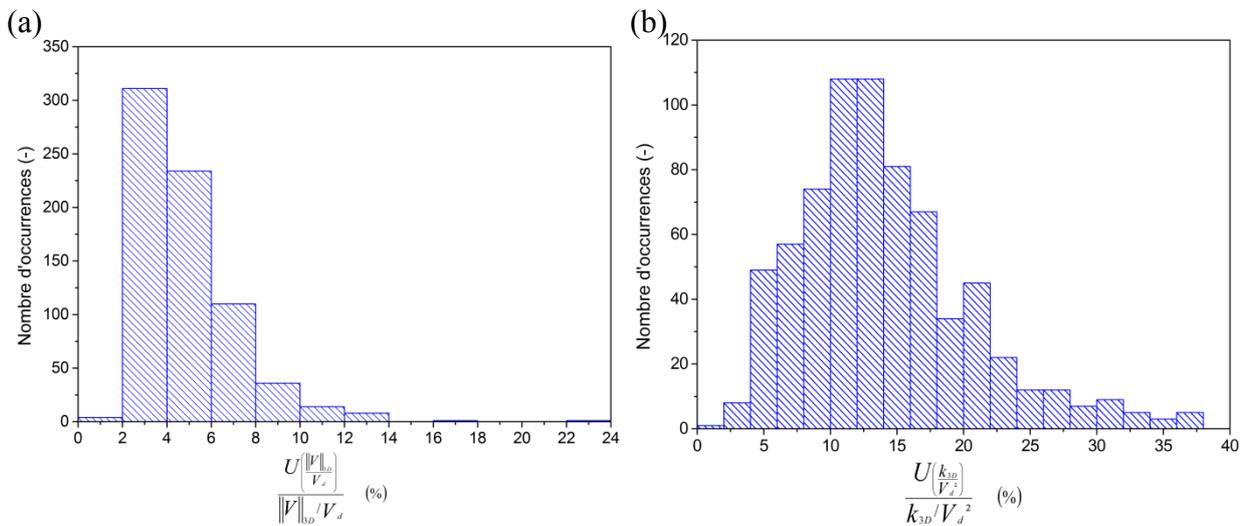


Figure II-30. Histogrammes des incertitudes relatives associées à la mesure avec la sonde ADV pour l'ensemble des points de mesures sur : a) la norme de la vitesse (3D) ; b) l'énergie cinétique turbulente (3D).

Les incertitudes relatives sont globalement autour de 4% pour $\frac{\|V_{3D}\|}{V_d}$ et autour de 12% pour $\frac{\|k_{3D}\|}{V_d^2}$.

II.4 Analyse du comportement des poissons

L'objectif de ces essais est de déterminer l'influence des différents dispositifs (seuils, macro-rugosités, structures souples) sur le comportement des poissons. Pour cela des tests biologiques ont été conduits avec différentes espèces de poissons, issues de piscicultures ou de pêche en rivière. Plusieurs campagnes d'essais ont été menées, chacune d'entre elles ayant pour but d'étudier un dispositif en particulier. Un protocole précis et adapté aux espèces de poissons utilisées a été élaboré au cours des nombreux essais biologiques, antérieurs à ce travail de thèse, qui ont été effectués au sein du laboratoire (Cornu *et al.*, 2012).

II.4.1 Présentation de l'installation expérimentale

La passe à poissons du laboratoire a été utilisée pour réaliser les expérimentations avec les poissons. Pour cela, elle a été adaptée et équipée pour pouvoir les accueillir et réaliser les mesures.

Afin de stocker les poissons dans des conditions similaires à celles des expérimentations, des viviers (Figure II-31 d) ont été ajoutés dans le bassin de redistribution. Un dispositif de régulation de la température a été installé dans le bassin de réception (Figure II-31 c).

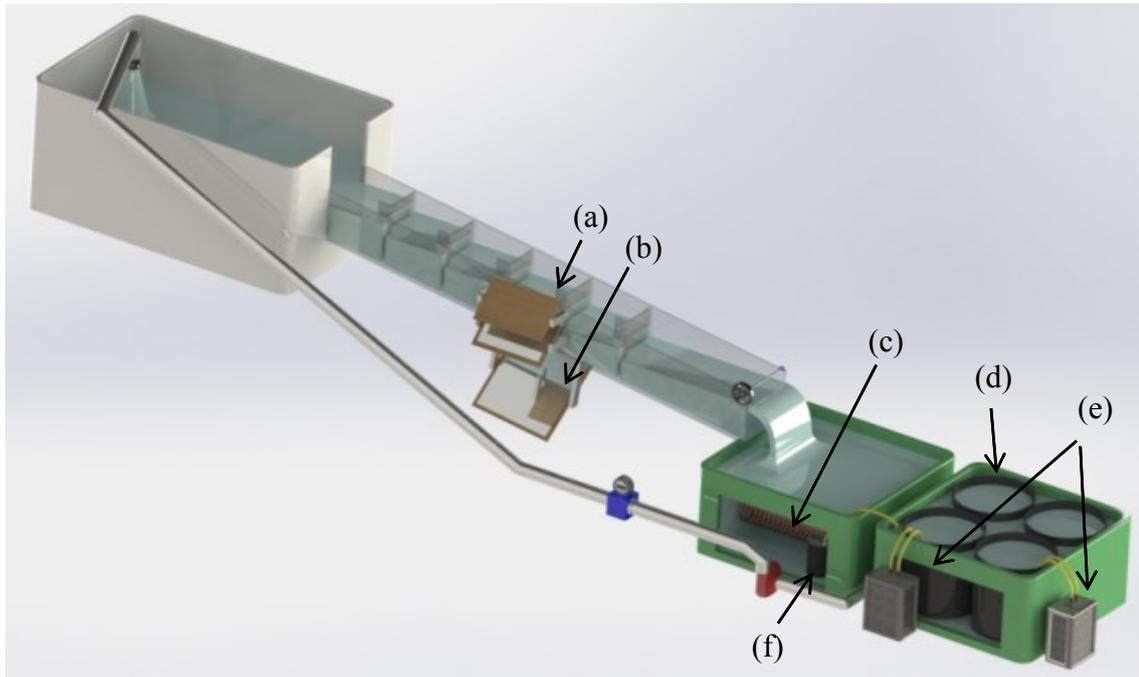


Figure II-31. Equipement installé sur la passe à poissons du laboratoire lors des manipulations avec les poissons.

Pour assurer une bonne oxygénation des poissons dans les viviers et une bonne filtration biologique, deux pompes de filtrations ont été installées dans le bassin de redistribution (Figure II-31 e). Une pompe vide cave (Figure II-31 f) a également été installée, refoulant l'eau du bassin de réception dans le bassin de redistribution, permettant ainsi d'assurer une température homogène dans les deux bassins mais également d'ajouter une oxygénation supplémentaire. La température de l'eau a été régulée à la température désirée (14°C) grâce à une vanne de régulation et une source d'alimentation en eau refroidie. Une grille a été positionnée à l'extrémité aval du bassin 5 (au niveau de la guillotine) de manière à éviter que les poissons chutent dans le bassin de réception. Un miroir (Figure II-31 a) situé sous la passe à poissons permet de projeter la vue de dessous du bassin 3 vers la caméra, tandis que les deux miroirs latéraux (Figure II-31 b) projettent une vue de côté. La caméra enregistre alors les deux vues simultanément, permettant d'avoir la position des poissons dans le bassin 3. Des projecteurs halogènes ainsi que des plaques en PMMA dépolies positionnées sur la passe à poissons ont également été installés pour que la luminosité soit plus homogène le long de la passe et ainsi éviter de perturber les poissons. La passe à poissons a complètement été recouverte de papier noir pour obtenir des conditions qui soient les plus proches possibles des conditions réelles. Enfin, pour éviter que la lumière ambiante ne parasite l'acquisition vidéo, la caméra a été protégée par une bâche.

II.4.2 Configurations testées et protocole expérimental

II.4.2.a Les configurations testées

Au cours des manipulations, une alternance entre une configuration de référence (radier lisse) et une configuration munie d'un dispositif a été réalisée. Cette alternance limite les phénomènes d'apprentissage et permet d'évaluer l'influence de chacun des dispositifs (seuils, macro-rugosités et structures souples) sur le comportement des poissons et sur l'efficacité de la passe à poissons.

Pour toutes les campagnes d'essais, la largeur de la passe est de $B=500$ mm ($B/b=6,67$), le débit $Q^A=4,8$ et la pente $s=7,5\%$.

Ce paramétrage correspond à un cas plutôt défavorable pour le poisson car l'écoulement est transitoire dans la configuration *radier lisse*. Lors de l'étude des structures souples, la largeur de bassin $B=0,675$ m ($B/b=9$) a également été testée.

En ce qui concerne l'étude de l'influence des seuils sur le comportement des poissons, une seule configuration a été testée ($h_s/b=1$ dans le cas des seuils). En revanche, les expérimentations avec les macro-rugosités ont donné lieu à trois campagnes d'essais et ont permis de tester les deux densités ($d_r=10\%$ et $d_r=15\%$). Le tableau suivant récapitule les caractéristiques des configurations testées au cours des campagnes d'essais :

Dispositif testé	Configuration $s=7,5\%$; $Q^A=4,8$	Largeur de bassin B/b
Seuils	radier lisse $h_s/b=1$	6,67
Macro-rugosités	radier lisse $d_r=10\%$ $d_r=15\%$	6,67
Structures souples	radier lisse structures souples	6,67 et 9

Tableau 7. Configurations étudiées lors des expérimentations biologiques.

II.4.2.b Choix de l'espèce et de la taille des poissons.

La taille est un critère très important à prendre en compte lors du choix des poissons. En effet, la taille d'un poisson définit sa capacité de nage qui est propre à l'écoulement dans lequel il est introduit. Lors du franchissement des fentes, le poisson utilise sa vitesse de pointe, c'est-à-dire celle qu'il peut tenir pendant de courtes durées (Larinier *et al.*, 1998). Cette vitesse de pointe varie en fonction de la taille de l'individu, de sa morphologie et de la température de l'eau. Le choix de cette vitesse de pointe a donc été basé sur les caractéristiques de l'écoulement dans la passe à poissons du laboratoire en condition de test, et notamment sur la vitesse maximale atteinte ($V_d=1,05$ m.s⁻¹) pour une pente $s=7,5\%$.

Selon le diagramme réalisé par Beach (1984) dans Larinier *et al.* (1998), la vitesse maximale de nage de 1,05 m.s⁻¹ est atteinte par un salmonidé d'une taille d'environ 5 cm dans une eau à 14°C.

Lorsque c'était possible, les expérimentations ont été effectuées avec deux classes de tailles de poissons. La plus petite était choisie de manière à ce que les poissons aient des difficultés à franchir les bassins dans la configuration de référence (*radier lisse*). Dans ce cas, une éventuelle influence positive d'un des dispositifs peut-être facilement détectée par l'augmentation du taux de franchissement des poissons dans le bassin de mesure. De la même façon, l'influence négative peut-être détectée avec les poissons de taille supérieure. La taille des petits individus utilisés dans les expérimentations a donc été fixée entre 5 cm (taille limite du poisson pouvant franchir un bassin) et 16 cm (taille d'un poisson ayant une vitesse maximale égale au double de la vitesse limite).

Pour tester la configuration avec les seuils, les manipulations ont été effectuées avec des truites *fario* provenant d'une pisciculture de la région. Les manipulations précédentes (Cornu *et al.*, 2012) ont montré que les truites supportaient mieux la stabulation et avaient une réelle volonté de montaison par rapport à d'autres espèces (types gardons ou spirilins). Des truites ont également été utilisées lors de deux campagnes d'essais sur les macro-rugosités (truites *fario* et truites arc-en-ciel). Des poissons prélevés dans un cours d'eau lors d'une pêche de recensement effectuée par l'ONEMA ont été utilisés lors de la troisième campagne d'essais sur les macro-rugosités. Trois espèces ont pu être représentées au cours de ces manipulations : le gardon, le chevesne et le goujon. Seules ces trois espèces avaient été pêchées en quantité suffisante dans les

classes de tailles recherchées. Le goujon était un poisson particulièrement intéressant pour les expérimentations, dans la mesure où c'est une espèce benthique (qui vit au fond des cours d'eau) et qui est donc susceptible d'être impactée par la présence des macro-rugosités. Enfin, des truites arc-en-ciel ont été utilisées pour tester l'influence des structures souples sur l'efficacité de la passe à poissons.

Lors des expérimentations, les poissons ont été divisés en lots puis placés dans les viviers. Ils ont été divisés de façon à créer des lots de poissons dits de « petite taille » et des lots de poissons de « grande taille ». Le nombre de poissons par lot était sensiblement identique. La biométrie réalisée lors de l'arrivée des poissons dans le laboratoire, a permis de regrouper les poissons par classe de taille et de connaître leurs caractéristiques morphologiques.

Le tableau 8 synthétise les paramètres importants des expérimentations effectuées sur les poissons en fonction du dispositif. Il donne notamment des statistiques sur les longueurs (longueur moyenne L_m et écart-type σ_m) des différents lots de poissons utilisés.

Dispositif testé	Espèces de poissons	Nom scientifique	N° Lot	Nombre	L_m (mm)	σ_m (mm)	
Seuils	Truite <i>fario</i>	<i>Salmo trutta fario</i>	1	38	168	15	
			2	38	169	12	
			3	44	90	5	
			4	44	92	5	
Macro-rugosités	Truite <i>fario</i>	<i>Salmo trutta fario</i>	1	30	210	19	
			2	30	222	20	
			3	35	66	6	
			4	35	65	6	
	Truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	1	33	141	6	
			2	31	144	6	
			3	33	109	8	
			4	32	111	10	
	Gardon		<i>Rutilus rutilus</i>	1	23	130	26
				2	23	132	19
				3	20	145	21
	Goujon		<i>Gobio gobio</i>	1	30	109	10
Chevesne		<i>Squalius cephalus</i>	1	10	149	5	
Structures souples	Truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	1	23	168	8	
			2	22	172	8	
			3	33	116	6	
			4	34	118	4	

Tableau 8. Caractéristiques des lots de poissons réalisés lors des expérimentations biologiques.

II.4.2.c Protocole expérimental

Un protocole a été défini pour assurer le bon déroulement des tests et la répétabilité des mesures.

En premier lieu, il s'agit de régler le débit à la valeur souhaitée ($Q=23 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, $Q^4=4,8$). Une fois l'écoulement établi, un lot de poisson est introduit dans le dernier bassin de la passe (bassin 5). Un dispositif (grille) empêche alors les poissons de remonter pendant les 15 premières minutes,

temps nécessaire à leur acclimatation. L'acquisition vidéo démarre une fois la grille enlevée. Durant la période d'acquisition, à intervalle régulier, la taille du bassin 5 est réduite pour inciter les poissons à remonter en les mettant en situation inconfortable. La durée de l'acquisition est égale au temps de travail des poissons, soit 90 minutes. Les poissons sont ensuite transférés dans leur vivier.

Chaque configuration a été testée deux fois pour chacun des lots au cours des campagnes expérimentales de manière à pouvoir effectuer un traitement statistique sur les données.

Chaque lot n'a travaillé qu'une seule fois par jour et tous les poissons ont bénéficié du même temps de repos entre chaque séance.

II.4.3 Dépouillement des vidéos et traitement des données

Les mouvements de base effectués par les poissons entre les bassins 2, 3 et 4 ont été utilisés pour caractériser les déplacements. Ces mouvements caractérisent les passages des poissons à travers les fentes du bassin 3 (Cornu *et al.*, 2012). Lorsqu'il s'agit d'une montaison, les franchissements des fentes aval et amont sont identifiés respectivement par les lettres A et B. En dévalaison, le franchissement de la fente amont est identifié par la lettre C et celui de la fente aval par D.

L'enchaînement dans le temps de ces différents mouvements permet de définir différents scénarios (Figure II-32) :

- **AB** : le poisson franchit le bassin en montaison,
- **AD** : le poisson accède au bassin 3 par la fente aval et dévale par cette même fente,
- **AE** : le poisson accède au bassin 3 par la fente aval et reste dans celui-ci jusqu'à la fin de l'enregistrement,
- **CB** : le poisson accède au bassin 3 par la fente amont puis accède au bassin 2 par cette même fente,
- **CD** : le poisson franchit le bassin 3 en dévalaison,
- **CE** : le poisson accède au bassin 3 par la fente amont et y reste jusqu'à la fin de l'enregistrement.

À partir de l'analyse des vidéos, les temps de séjour dans le bassin 3 et les temps de stabulation des poissons dans les zones de repos ont été chronométrés. De même, les scénarios et les trajectoires suivis par les poissons ont été notés.

Au total, les campagnes d'essais ont généré près de 240 h d'enregistrement.

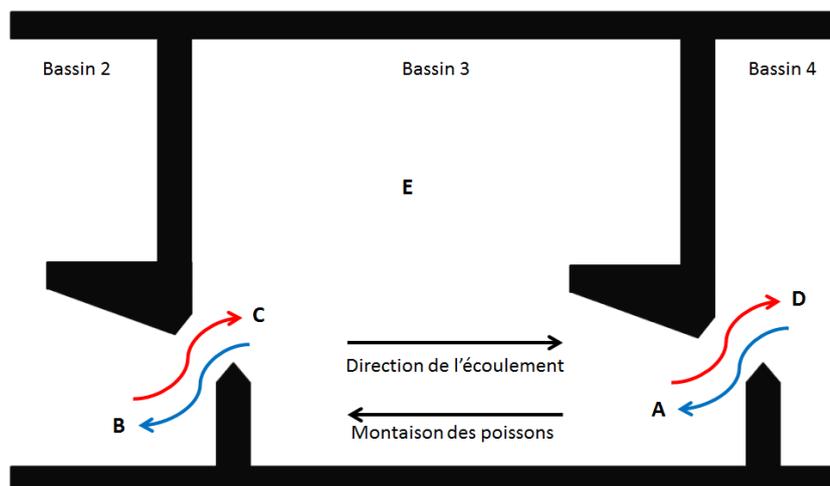


Figure II-32. Définition des différents mouvements de base.

II.4.3.a Indices généraux de franchissement.

- **Efficacité totale**

Le paramètre principal pour comparer les différentes configurations est l'efficacité totale en montaison pour le bassin 3 ($E_{ff_{tot}}$). Il est défini comme étant le nombre de poissons se retrouvant en amont du bassin 3 à la fin du test par rapport au nombre de poissons placés dans le bassin 5 au début du test (eq.II-21).

$$E_{ff_{tot}}(\%) = \frac{AB - CD - CE}{N_{tot}} \quad (\text{eq.II-21})$$

- **Franchissement total**

Un autre paramètre utilisé est le franchissement total (FT). Il donne le nombre de poissons ayant accédé au bassin 3 par rapport au nombre total d'individus (eq.II-22).

$$FT(\text{accès}/\text{ind}) = \frac{AB + AD + AE}{N_{tot}} \quad (\text{eq.II-22})$$

- **Indice de dévalaison**

Une quantité non négligeable de poissons franchissant une fente en montaison la réemprunte ensuite dans le sens contraire.

L'indice de dévalaison (ID) est le rapport entre le nombre de poissons qui franchissent une fente du bassin 3 en dévalaison et le nombre de poissons qui la franchissent en montaison (eq.II-23).

$$ID(\%) = \frac{C + D}{A + B} \quad (\text{eq.II-23})$$

- **Indice d'Activité**

L'indice d'activité ($Mouv$) est défini par le rapport entre la somme des mouvements de base effectués par les poissons (nombre de franchissement de fentes) et le nombre total de poissons (eq.II-24).

$$Mouv = \frac{A + B + C + D}{N_{tot}} \quad (\text{eq.II-24})$$

Cet indice est exprimé en mouvements entre bassins par individu (mvt/ind).

II.4.3.b Caractérisation du comportement

- **Temps de séjour**

Pour calculer le temps passé par chaque poisson dans le bassin 3, des critères ont été définis pour assurer la reproductibilité des mesures de temps. Le début de la mesure commence dès qu'une partie du poisson est rentrée dans le bassin 3. Elle s'arrête dès que le poisson est complètement sorti du bassin.

La fréquence d'enregistrement du caméscope étant de 25 Hz, l'erreur qui peut être commise sur la mesure du temps de séjour est d'au maximum 0,08s (2/25).

Les poissons qui n'ont pas quitté le bassin avant la fin de l'enregistrement (scénario AE et CE) n'ont pas été pris en compte.

- **Zones de stabulation**

Il existe des zones, dans lesquelles les poissons sont susceptibles d'adopter une nage stationnaire. Ces zones sont appelées zones de stabulation. Leur position et leur taille varient en fonction de la configuration de l'écoulement.

Pour l'analyse de l'utilisation de ces zones et du temps passé dans chacune d'elles, il a été nécessaire de définir le moment à partir duquel un poisson est considéré en situation de nage stationnaire dans une zone de stabulation. En l'occurrence, dès qu'un poisson restait plus de 5s dans une zone de stabulation, il était considéré comme étant en situation de repos. La zone 0 n'est pas une zone de stabulation, elle correspond à une zone où les grandeurs cinématiques de l'écoulement sont les plus importantes (Tarrade, 2007). Elle a été prise en compte dans l'étude des trajectoires seulement lorsqu'un poisson ne passait par aucune des autres zones lors de son passage dans le bassin 3.

II.4.3.c Analyses statistiques

Pour utiliser des tests statistiques paramétriques tels que l'analyse de variance (ANOVA) ou le *test t de Student* à deux échantillons qui permettent de déterminer si les échantillons sont significativement différents ou non, deux critères doivent être vérifiés. En effet, ces deux tests se basent sur deux hypothèses fortes : la normalité et l'homoscédasticité (variances identiques) des échantillons. Il convient donc, avant de les utiliser, de vérifier que ces deux hypothèses ne sont pas violées. La normalité des échantillons a été vérifiée avec le test de *Kolmogorov-Smirnov* pour les échantillons de grandes tailles ($N > 50$) et avec le test de *Shapiro-Wilk* pour les échantillons de petites tailles ($N < 50$) (Devos, 2012). Quant à l'homogénéité des variances, le test de *Brown-Forsythe* a été utilisé, considéré plus robuste que le test de *Levene* (Statsoft, 2015).

Le *test t de Student* à deux échantillons a été utilisé quand le nombre de groupes à comparer était égal à deux, le test ANOVA lorsque le nombre de groupes était supérieur.

Si les conditions d'homoscédasticité et de normalité ne sont pas présentes, d'autres tests qui ne se basent pas sur les hypothèses de distribution d'échantillon peuvent être utilisés (tests non paramétriques).

Les tests non paramétriques ont été utilisés dans les cas suivants (iPLESP, 2015) :

- *Kruskal-Wallis* : nombre de groupes supérieur à 2, échantillons indépendants, distribution non normale des échantillons, égalité des variances.
- *Mann-Whitney* : nombre de groupes égal à 2, échantillons indépendants, distribution non normale des échantillons, égalité des variances.
- *Test t de Welch* : distribution normale des échantillons, échantillons indépendants, inégalité des variances.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les moyens expérimentaux et les outils d'analyse utilisés pour mener ce travail de thèse ont été décrits. L'objectif de l'approche expérimentale est d'étudier l'influence de trois dispositifs (les seuils, les macro-rugosités et les structures souples) insérés dans la passe à poissons, à la fois d'un point de vue hydraulique et biologique. Tout d'abord, les caractéristiques du montage expérimental ainsi que celle des trois dispositifs étudiés ont été présentées. Dans un second temps, une description du processus d'acquisition des hauteurs d'eau effectuées à l'aide de sondes acoustiques dans chacun des bassins a été proposée, ainsi que la démarche d'obtention du coefficient de débit et de son incertitude associée. Le principe de fonctionnement du vélocimètre acoustique à effet Doppler (ADV), utilisé pour l'acquisition des profils de vitesse ainsi que pour la mesure de la topologie de l'écoulement, a été brièvement rappelé. La position de chaque profil en fonction de la configuration étudiée, et les conditions de mesures de la topologie ont ensuite été précisées. La dernière partie de ce chapitre est tout d'abord consacrée à la présentation des modifications qu'il a été nécessaire d'apporter à

l'installation expérimentale pour réaliser les tests biologiques. Le protocole expérimental suivi au cours des manipulations, les configurations étudiées et les différentes espèces de poissons utilisées ont été détaillés. Les grandeurs déduites des analyses des vidéos, acquises pendant les tests, ont ensuite été présentées. Enfin, les conditions d'utilisation des différents tests statistiques sur ces grandeurs ont été décrites.

Chapitre 3

MOYENS NUMERIQUES

Sommaire

III.	MOYENS NUMERIQUES.....	83
III.1	L'outil numérique.....	84
III.1.1	La discrétisation spatiale et la méthode de résolution	84
III.1.2	Les méthodes RANS/URANS et les modèles de fermeture.....	84
III.1.3	La méthode LES.....	86
III.1.4	La modélisation de l'interaction fluide/structure (FSI)	88
III.2	Mise en place des simulations numériques	90
III.2.1	Caractéristiques des simulations.....	90
III.2.1.a	<i>La géométrie et les configurations étudiées</i>	<i>90</i>
III.2.1.b	<i>Les modèles physiques.....</i>	<i>91</i>
III.2.1.c	<i>Les conditions aux limites.....</i>	<i>91</i>
III.2.1.d	<i>Le maillage du corps du domaine</i>	<i>92</i>
III.2.1.e	<i>Maillage de la couche limite</i>	<i>94</i>
III.2.1.f	<i>Les conditions initiales.....</i>	<i>96</i>
III.2.2	Choix du pas de temps et convergence des calculs	96
III.2.2.a	<i>Choix du pas de temps.....</i>	<i>96</i>
III.2.2.b	<i>Convergence des calculs</i>	<i>97</i>
III.2.2.c	<i>Convergence en maillage</i>	<i>98</i>
III.2.3	Validation des résultats numériques en configuration radier lisse.....	99
III.3	Conclusion.....	103

La simulation numérique a été utilisée au cours de ce travail de thèse, pour avoir accès à des grandeurs difficilement mesurables expérimentalement et ainsi compléter les analyses physiques. Dans ce chapitre, les méthodes utilisées pour modéliser l'écoulement avec le logiciel Star-CCM+© dans les différentes configurations de passe à poissons à fentes verticales sont expliquées brièvement. Les caractéristiques techniques de chacune des simulations sont ensuite détaillées (maillage, conditions aux limites...). Enfin la comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux permet de valider la méthode de modélisation la plus adaptée dans la configuration *radier lisse*, en petite et grande largeur de bassin ($B/b=6,67$ et 9).

III.1 L'outil numérique

III.1.1 La discrétisation spatiale et la méthode de résolution

Le code de calcul Star-CCM+ utilise la méthode des volumes finis pour discrétiser le domaine de simulation. Ce domaine de calcul est ainsi divisé en une multitude de petits volumes appelés volumes de contrôles (ou encore cellules). Les équations de conservation aux dérivées partielles sont dans un premier temps réécrites sous une forme conservative. Cette méthode utilise la version discrétisée de la forme intégrale des équations de conservation pour chacun des volumes de contrôle. La détermination des flux aux frontières des volumes, passe par l'application du théorème de Green-Ostrogradski (théorème de flux-divergence). Elle permet de transformer les intégrales de volumes des termes de divergences en intégrales de surfaces. Les flux numériques sont ensuite évalués par des approximations en différences finies. Cette méthode est dite localement conservative car les flux sur les frontières communes de chaque cellule sont équilibrés. Enfin le système d'équations est transformé en système d'équations algébriques linéaires, dont le nombre total d'inconnues dans chaque équation est égal au nombre de cellules composant le domaine. Dans Star-CCM+, l'algorithme « Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations » (SIMPLE) est utilisé pour le couplage vitesse/pression.

III.1.2 Les méthodes RANS/URANS et les modèles de fermeture

La méthode RANS utilise le principe de décomposition proposé par Reynolds. Les grandeurs instantanées de l'écoulement sont ainsi décomposées en une partie moyenne et une partie fluctuante. Lorsque l'écoulement est statistiquement stationnaire, elle donne un champ résolu qui correspond à une moyenne temporelle (hypothèse d'ergodicité). Cette méthode modélise toutes les échelles de la turbulence.

Elle est basée sur la décomposition des variables instantanées (f^*) de l'écoulement en une partie moyenne (F) et une partie fluctuante (f) (eq.III-1 et III-2).

Soit pour la vitesse :

$$U_i^* = U_i + u_i \quad (\text{eq.III-1})$$

et pour la pression :

$$P^* = P + p \quad (\text{eq.III-2})$$

avec U_i et P les moyennes d'ensemble de la vitesse et de la pression instantanées.

Il en résulte les équations de Navier-Stokes moyennées, pour un écoulement incompressible (eq.III-3 et III-4) :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{eq.III-3})$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} \quad (\text{eq.III-4})$$

Le passage à la moyenne des équations de Navier-Stokes entraîne une perte d'informations qui se traduit par l'ajout de ce que l'on appelle le tenseur de Reynolds qui correspond aux corrélations doubles des fluctuations de vitesse en un point ($\partial \overline{u_i u_j}$). La présence de ce tenseur augmente le nombre d'inconnues à 10 pour seulement 4 équations, le système d'équations est donc ouvert. L'utilisation des modèles de turbulences est ainsi nécessaire pour fermer le système d'équations.

La fermeture au premier ordre consiste tout d'abord à résoudre les moments d'ordre 1 des équations (eq.III-3 et III-4) (U, V, W, P) puis de les utiliser pour modéliser les moments d'ordre 2 grâce à une loi de comportement (EVM⁴). Une analogie peut être faite entre la relation de Newton et les contraintes dues à l'agitation turbulente pour un modèle de turbulence du premier ordre, dans ce sens qu'il relie le tenseur de Reynolds (équivalent à une contrainte) au tenseur de déformation du champ moyen. La relation de Boussinesq établit une proportionnalité entre les contraintes turbulentes et les vitesses de déformations du champ moyen. Cette relation part notamment du postulat que le tenseur des contraintes de Reynolds et le tenseur de déformation du champ moyen sont alignés (eq.III-5) (Chassaing, 2000) :

$$-\overline{u_i u_j} = -\frac{2}{3} k \delta_{ij} + \nu_t \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{eq.III-5})$$

où ν_t est le coefficient de proportionnalité à déterminer, appelé viscosité turbulente, k l'énergie cinétique turbulente et δ_{ij} le tenseur identité (symbole de Kronecker).

L'analyse des dimensions de ν_t ($[L]^2[T]^{-1}$) montre que $\nu_t \sim u \cdot l_m$. L'objectif des modèles à viscosité turbulente est donc d'arriver à déterminer une échelle de vitesse (u) et de longueur caractéristique (l_m) permettant d'estimer ν_t .

Certains modèles du premier ordre ont recours à l'utilisation de deux équations de transport afin de déterminer la valeur de cette viscosité de turbulence. Le plus répandu dans le milieu industriel est le modèle $k - \varepsilon$ standard proposé initialement par Jones et Launder (1972), qui utilise donc deux fonctions caractéristiques de la turbulence : l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation ε . L'échelle de vitesse est déterminée par l'équation de transport de k , quant à celle de longueur caractéristique elle est fournie par l'équation de transport de ε . Il existe d'autres modèles à deux équations de transports, dans lesquels, en général, seule la manière de déterminer la longueur caractéristique varie ($k - \omega$, $k - l$, $k - \varphi$...).

Les modèles basés sur la loi de comportement linéaire recensent un certain nombre de défauts connus, tels que la réponse immédiate de la turbulence à une modification du champ moyen, la mauvaise prise en considération de l'anisotropie de la turbulence, l'insensibilité à la courbure des lignes de courants.... Pour tenter d'améliorer les prédictions et prendre en compte l'anisotropie, des lois de comportement non linéaires ont été développées (cubique, quadratique...).

La fermeture au second ordre résout elle aussi les moments d'ordre 1 des équations (eq.III-3 et 4). En revanche, contrairement aux modèles du premier ordre, elle résout les 6 équations de transport des tensions de Reynolds (modèle RSM⁵) ainsi qu'une équation de transport d'une grandeur caractéristique de la turbulence permettant d'estimer une échelle de longueur. Elle ne se base donc plus sur l'hypothèse de Boussinesq. Elle a par ailleurs l'avantage de prendre en compte l'anisotropie et de reproduire un effet mémoire de la turbulence.

⁴ Eddy Viscosity Model

⁵ Reynolds Stress Model

La modélisation URANS est identique à la modélisation RANS, à ceci près qu'elle prend en compte l'instationnarité de l'écoulement par l'ajout du terme $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)$. Un schéma de discrétisation temporel implicite basé sur celui proposé initialement par Jameson (1991) est utilisé. Dans le principe, ce schéma est constitué de deux boucles imbriquées : une boucle en temps physique qui permet de décrire l'évolution instationnaire et une boucle en temps dual qui cherche à atteindre un état quasi-stationnaire.

De nombreuses études montrent que la solution URANS moyennée dans le temps est plus proche des résultats expérimentaux que la solution RANS (Laccarino *et al.*, 2003 ; Dejoan *et al.*, 2005). Ceci s'explique par le fait que la méthode URANS résout de manière explicite la partie du spectre contenant les plus grandes échelles et modélise les fluctuations représentatives de l'agitation turbulente. Elle agit alors comme un filtre spatial ou temporel (Fadai-Ghotbi, 2007). La fréquence de coupure de ce filtre est définie par l'échelle intégrale (de longueur ou de temps) du modèle de turbulence. Ainsi, elle ne dépend pas de la taille des mailles. Cette méthode est adaptée lorsque le temps de vie des structures cohérentes aux très grandes échelles est long par rapport à l'échelle de la turbulence de fond (Fadai-Ghotbi, 2007). Dans le cas d'un calcul URANS, l'énergie cinétique totale est donc la somme de l'énergie cinétique modélisée k_m et de l'énergie cinétique résolue k_r (eq.III-6) :

$$k = k_r + k_m \quad (\text{eq.III-6})$$

III.1.3 La méthode LES

Contrairement à la méthode RANS qui modélise toutes les échelles de la turbulence, la méthode LES (Large Eddy Simulation) consiste à résoudre les grandes structures de l'écoulement qui sont fortement dépendantes de la géométrie et ne modélise que les petites qui sont supposées plus universelles. Dans le principe, un filtre spatial dont le nombre d'onde de coupure κ_c est donné par la taille des mailles du domaine est appliqué sur chacune des variables de l'écoulement. Le nombre κ_c définit la taille des échelles qui vont être résolues et celles qui vont être modélisées.

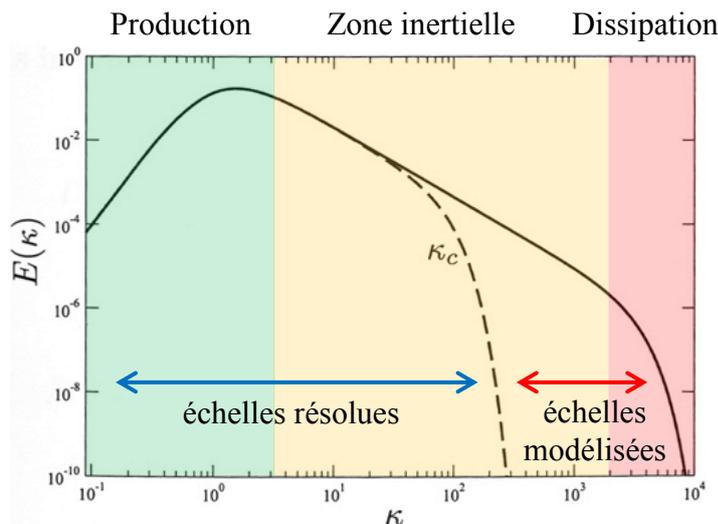


Figure III-1. Spectre d'énergie en nombre d'onde en turbulence pleinement développée. Frontière entre les échelles résolues et les échelles modélisées en LES.

Dans un écoulement turbulent, l'énergie est contenue dans les grandes structures de l'écoulement. Cette énergie est transférée à travers un processus appelé « cascade énergétique » aux petites structures qui se chargent de la dissiper entièrement. La zone de transfert énergétique au cours de laquelle les grandes structures se brisent en structures de plus en plus petites sans produire ni dissiper d'énergie, est appelée zone inertielle. En LES, le nombre d'onde de coupure

κ_c doit se situer dans cette zone inertielle (Figure III-1). Plus κ_c sera grand, plus la proportion des échelles résolues par rapport aux échelles modélisées prendra de l'importance et plus la méthode LES se rapprochera d'une simulation numérique directe (DNS).

Pour séparer les échelles qui sont résolues de celles qui sont modélisées, un opérateur de moyenne spatiale filtrée est introduit (eq.III-7) :

$$\tilde{f}(x) = \int G_{\Delta}(x, x') f^*(x') dx' \quad (\text{eq.III-7})$$

où \tilde{f} représente une grandeur instantanée filtrée (celle qui est résolue) et non filtrée f^* , $G_{\Delta}(x, x')$ correspond au filtrage spatial au point x et Δ est la taille du filtre.

Les grandeurs de sous-mailles f' sont modélisées et définies par (eq.III-8) :

$$f' = f^* - \tilde{f} \quad (\text{eq.III-8})$$

La taille caractéristique Δ du filtre peut être déterminée par (eq.III-9) (Germano *et al.*, 1991) :

$$\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} \quad (\text{eq.III-9})$$

avec $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ les pas de discrétisation spatiaux suivant x,y et z.

L'opérateur de moyenne spatiale filtrée est ensuite appliqué aux équations de Navier-Stokes, sur lesquelles il se comporte comme un filtre passe-bas (eq.III-10 et 1) :

$$\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial \tilde{x}_j} = 0 \quad (\text{eq.III-10})$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{eq.III-11})$$

où le tenseur de contrainte de sous-maille τ_{ij} est introduit :

$$\tilde{\tau}_{ij} = \tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (\text{eq.III-12})$$

Tout comme l'approche RANS, ce terme non linéaire amène de nouvelles inconnues au système d'équations. Pour fermer ce système, il faut alors utiliser un modèle appelé « modèle de sous-maille » permettant de modéliser le tenseur de sous-maille.

Il existe plusieurs manières de modéliser l'effet du tenseur de sous-maille. L'une d'entre elles consiste à ne pas utiliser de modèle. Dans ce cas, ce sont les erreurs numériques qui jouent le rôle de la dissipation moléculaire. Le modèle proposé par Smagorinsky (1963) est l'un des modèles le plus utilisé en LES. Il est basé sur l'hypothèse qu'il existe une relation linéaire entre le déviateur du tenseur de contrainte de sous-maille ($\tilde{\tau}_{ij}^D$) et le champ de vitesse de déformation filtrée \tilde{S}_{ij} (eq.III-13) :

$$\tilde{\tau}_{ij}^D = -2\nu_t \tilde{S}_{ij} \quad (\text{eq.III-13})$$

avec ν_t la viscosité turbulente.

Le coefficient ν_t est une propriété du mouvement du fluide et est proportionnel au produit de l'échelle de longueur donnée par le filtre et la vitesse déduite de \tilde{S}_{ij} (eq.III-14) :

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}} \quad (\text{eq.III-14})$$

Le coefficient C_s est appelé constante de Smagorinsky. La valeur de ce coefficient peut être déterminée à partir de la théorie de Kolmogorov, en supposant que la dissipation de sous-maille est égale à la dissipation des échelles qui ne sont pas résolues. La valeur théorique de cette constante est $C_s = 0,18$. Cette valeur n'est pourtant pas universelle car elle est adéquate dans le cas d'une turbulence homogène et isotrope mais doit être adaptée dans les autres cas. Pour un écoulement en canal, la valeur habituellement conseillée est $C_s = 0,1$. Une des limites de ce modèle est qu'il n'offre pas un comportement satisfaisant à la paroi en raison d'une large surestimation de la viscosité turbulente. Le modèle de WALE (Wall Adapting Local Eddy-viscosity) développé par [Nicoud et Ducros \(1999\)](#) se propose de corriger ce problème en prenant en compte à la fois le taux de déformation et le taux de rotation. Il s'ensuit l'établissement d'une nouvelle constante (C_w) également calibrée à partir d'une turbulence homogène et isotrope mais étant considérée comme une « vraie » constante ($C_w=0,5$), indépendante de la nature de l'écoulement. De par sa construction, ce modèle fait tendre la viscosité turbulente vers une valeur nulle sans fonction d'amortissement. Il s'avère particulièrement adapté dans le cas des géométries complexes, il a donc été utilisé dans le cadre de cette thèse.

III.1.4 La modélisation de l'interaction fluide/structure (FSI)

La modélisation de l'interaction fluide/structure (FSI) est nécessaire lorsqu'un écoulement de fluide rentre en contact avec une structure en provoquant une déformation de cette dernière. Cette déformation induit alors un changement sur les conditions aux limites appliquées sur la structure et modifie à son tour les caractéristiques de l'écoulement. La modélisation FSI permet d'effectuer le couplage entre un solveur de mécanique des fluides et un solveur de mécanique des structures ([Souli & Sigrist, 2009](#)).

Il existe plusieurs types de couplages qu'il est possible de classer dans deux catégories : les couplages faibles et les couplages forts. Dans le cas d'un couplage faible, le fluide agit sur la déformation de la structure mais la réponse de la structure à cette sollicitation n'entraîne pas de modification significative de l'écoulement. Ce couplage peut également être fait de la structure vers le fluide. En revanche, dans le cas d'un couplage fort, le mouvement du fluide ainsi que la pression exercée sur la structure, entraînent une déformation et/ou un déplacement de la structure affectant ensuite en retour l'écoulement du fluide.

Le code de calcul Star-CCM+ dispose d'un solveur permettant de calculer les contraintes et les déformations sur les structures. Ceci rend possible le calcul des interactions fluide/structures dans Star-CCM+ sans avoir recours à un logiciel tiers. C'est cette solution qui a été retenue pour simuler les interactions entre les 92 structures souples et l'écoulement dans la passe à poissons. Il est également possible d'effectuer des co-simulations avec un logiciel dédié à la simulation mécanique (Abaqus par exemple) ou même d'effectuer une co-simulation entre deux instances de Star-CCM+. Dans ce dernier cas, une instance de Star-CCM+ modélise l'écoulement du fluide et l'autre les déformations de la structure. La co-simulation est particulièrement intéressante lorsqu'il existe une différence importante entre la dynamique de la structure et la dynamique de l'écoulement.

Dans le contexte de cette étude, il existe un couplage fort entre l'écoulement du fluide et les déformations des structures. La première étape d'une simulation FSI consiste à initialiser l'écoulement autour de la structure. Les contraintes de cisaillement et la pression à l'interface entre le fluide et les structures sont ainsi calculées par le solveur « fluide ». Le solveur « structure » récupère ces informations et calcule leur déformation. Cette déformation entraîne un déplacement des points du maillage de l'interface fluide/structure par l'intermédiaire d'une opération de « morphing ». Les équations de transport de la partie fluide sont ensuite résolues en prenant en compte le mouvement du maillage.

Pour résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles liées aux problèmes de mécanique du solide, la méthode des éléments finis est habituellement utilisée. En revanche, pour les problèmes de mécanique des fluides, la méthode des volumes finis est plus adaptée, car elle est plus performante pour résoudre les termes non-linéaires. Dans Star-CCM+, les problèmes liés au fluide et à la structure sont résolus par la même méthode : les volumes finis (« Finite Volume Stress Analysis » pour la partie structure).

Dans le cas des simulations réalisées au cours de cette étude, le déplacement attendu à l'extrémité des cylindres est de l'ordre du centimètre, soit environ 7% de leur hauteur. D'autre part, des mesures expérimentales menées pour déterminer le module d'Young ont permis d'observer le caractère élastique et isotrope du matériau. Un matériau est considéré élastique quand il existe une relation linéaire entre la contrainte et la déformation. En outre, lorsqu'un matériau élastique est soumis à un cycle du type charge/décharge, il retrouve sa forme initiale, contrairement à un matériau élastoplastique. Le problème de la partie structure est donc résolu sous l'hypothèse des grandes déformations et d'élasticité linéaire.

Dans Star-CCM+, la formulation des grandes déformations est en fait construite à partir de l'hypothèse des petites déformations, en considérant qu'entre chaque itération les déformations sont faibles (Souli & Sigrist, 2009). Cette technique est basée sur la Formulation Lagrangienne Actualisée, qui met à jour la position des nœuds après chaque itération dans un pas de temps, permettant ainsi de respecter l'hypothèse des petites déformations. Pour cela, le maillage de la partie structure se déforme, ainsi que celui de la partie fluide qui doit s'adapter à la nouvelle forme de la structure. Ce processus est considéré comme étant « topologiquement » constant, dans le sens où chacune des cellules conserve les mêmes cellules voisines mais leur forme peut varier au cours du temps. Les équations de transport de mécanique des fluides sont alors résolues en prenant en compte le mouvement arbitraire du maillage. Star-CCM+ utilise une formulation mixte Arbitraire Lagrange-Euler (ALE) qui combine à la fois les formulations eulérienne et lagrangienne pour décrire le mouvement des particules fluides.

La relation constitutive qui lie la déformation au déplacement dans le cas de petites déformations est de la forme (eq.III-15) :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{eq.III-15})$$

avec ε_{ij} le tenseur des déformations linéarisé et u_i le vecteur déplacement.

L'hypothèse d'un comportement linéaire et élastique du matériau, toujours pour des petites déformations, permet d'écrire la relation entre les déformations et les contraintes dans la structure sous la forme suivante (loi de Hooke) (eq.III-16) :

$$\sigma_{ij} = 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ij} + \lambda \cdot \text{tr}(\varepsilon) \cdot \delta_{ij} \quad (\text{eq.III-16})$$

avec σ_{ij} le tenseur des contraintes, ε_{ij} le tenseur des déformations, δ_{ij} le symbole de Kronecker et μ et λ les coefficients de Lamé de la structure.

Les coefficients de Lamé peuvent être déterminés à partir du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν de la structure (eq.III-17 et III-18) :

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (\text{eq.III-17})$$

$$\mu = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{eq.III-18})$$

Pour les problèmes instationnaires, l'équation à résoudre est la loi de mouvement, ou première loi de Cauchy, qui peut-être écrite sous la forme locale (assortie des conditions aux limites) :

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} = \nabla \sigma + \rho f \quad (\text{eq.III-19})$$

avec f la densité massique des forces de volumes et ρ la masse volumique du matériau.

La résolution du problème consistant à déterminer le champ de déplacement u qui satisfait à la fois les relations eq.III-16,17 et 18, l'équation (eq.III-19) et les conditions aux limites, est ensuite effectuée par la méthode des volumes finis.

III.2 Mise en place des simulations numériques

Les simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel Star-CCM+ développé par la société CD-Adapco.

III.2.1 Caractéristiques des simulations

III.2.1.a La géométrie et les configurations étudiées

L'écoulement dans la passe à poissons est caractérisé de manière expérimentale en termes de vitesses moyennes et de fluctuations mais également en termes de charge hydraulique. Les tests avec des poissons ont également été réalisés dans cette passe. Il est donc apparu judicieux, pour des questions de validations expérimentales, de baser les simulations numériques sur la géométrie de la passe à poissons du laboratoire. La géométrie a été conçue à l'aide d'un logiciel de CAO puis importée dans Star-CCM+. La géométrie de base est composée de 5 bassins inclinés suivant une pente $s=7,5\%$ (Figure III-2).

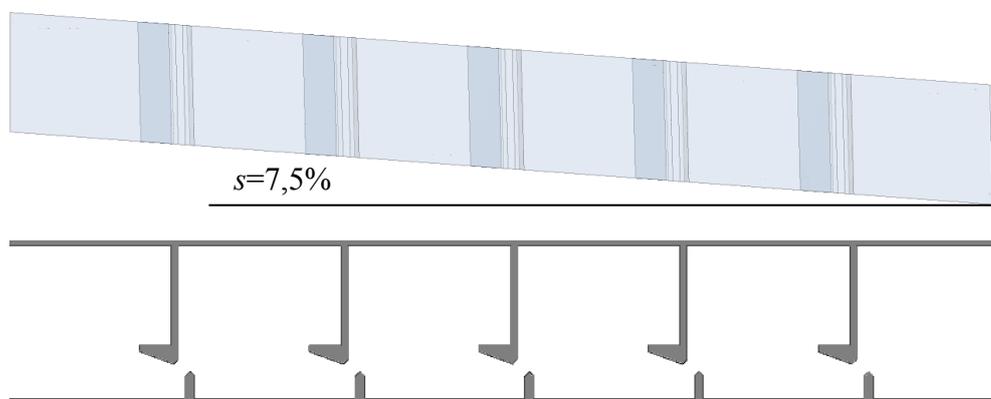


Figure III-2. Géométrie de la passe à poissons utilisée (configuration *radier lisse*).

L'écoulement a été simulé pour chaque configuration étudiée (*radier lisse*, *seuils*, *macro-rugosités* et *structures souples*) et pour la plupart d'entre elles avec deux largeurs de bassins ($B/b=6,67$ et 9). Les simulations ont toutes été réalisées avec un modèle URANS. Dans la configuration *radier lisse*, *seuils* et *macro-rugosités*, elles ont été réalisées également en LES pour $B/b=6,67$ et 9 . Le tableau 9 récapitule l'ensemble des simulations qui ont été effectuées.

	B/b	Radier lisse	Seuils	Macro-rugosités	Structures souples
URANS	6,67	✓	✓	✓	✗
	9	✓	✓	✓	✓
LES	6,67	✓	✓	✓	✗
	9	✓	✓	✓	✗

Tableau 9. Configurations étudiées en simulation en URANS et en LES.

III.2.1.b Les modèles physiques

Toutes les simulations réalisées sont tridimensionnelles et instationnaires.

Pour la partie fluide, la méthode de Volume of Fluid (VOF) a été utilisée pour simuler l'écoulement à surface libre. Cette méthode est basée sur une fonction qui permet de définir la fraction de volume d'un des fluides présent dans un volume de contrôle. Dans les simulations présentées ici, deux fluides sont en contact : l'eau et l'air. Lorsqu'un volume de contrôle n'est composé que d'un seul fluide, la fraction de volume de ce fluide est égale à 1 et celle de l'autre fluide est égale à 0. La surface libre se situe au niveau du volume de contrôle qui présente une fraction de volume égale pour chacune des deux phases.

Un schéma de discrétisation temporel du second ordre a été utilisé en URANS et en LES. Pour la discrétisation spatiale, un schéma du second ordre décentré amont et du troisième ordre (MUSCL) a été utilisé pour respectivement la méthode URANS et LES.

Le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ Bas-Reynolds a été choisi pour fermer le système d'équations de la modélisation URANS. Pour la LES, le modèle de Wale a été utilisé pour modéliser l'effet des plus petites échelles (inférieures à la taille du filtre).

Concernant la partie solide de la simulation FSI, le matériau qui a été choisi et qui se rapproche le plus de celui utilisé pour les cylindres souples, est le silicone. Sa masse volumique a été modifiée à 1040 kg.m^{-3} et son module d'Young à 92 MPa. Le tenseur des déformations est calculé à partir du tenseur des contraintes sur la base d'un modèle d'élasticité linéaire et isotrope.

III.2.1.c Les conditions aux limites

Les types de conditions aux limites du domaine sont les mêmes pour toutes les simulations. Des conditions de pression hydrostatique et des niveaux d'eau sont fixés à l'entrée et à la sortie du domaine de calcul. Ces niveaux d'eau imposés sont issus des mesures de hauteurs d'eau effectuées sur la passe à poissons. Des conditions de type « parois » associées à des conditions de non glissement ont été spécifiées sur toutes les parois solides du domaine de calcul. Le domaine de calcul a été agrandi au-dessus de la passe à poissons, permettant ainsi d'éloigner la frontière du domaine de la surface libre de l'écoulement. Des conditions de symétrie ont été imposées sur les frontières de cet agrandissement (Figure III-3).

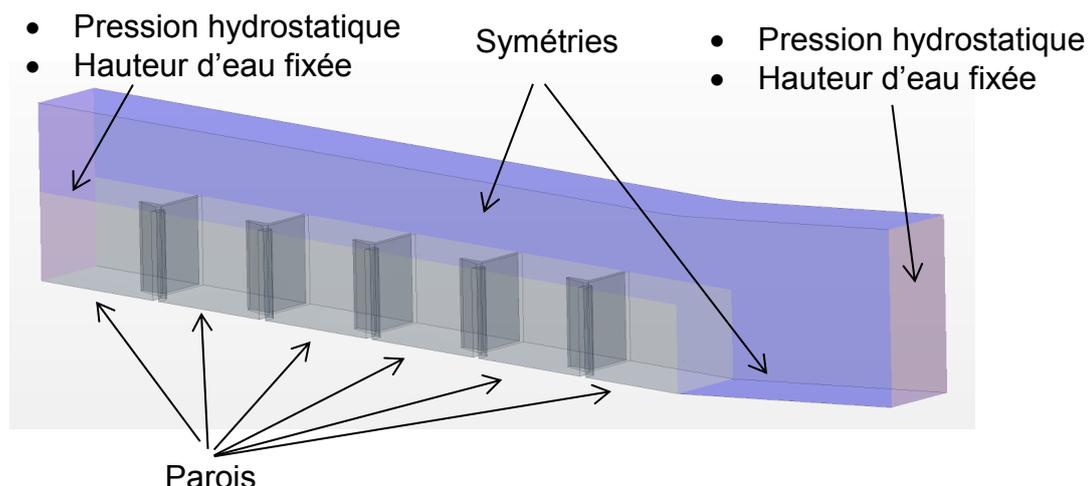


Figure III-3. Conditions aux limites spécifiées sur les frontières du domaine de calcul.

En ce qui concerne la simulation dans la configuration avec les structures souples, des conditions aux limites particulières ont été définies sur les frontières des cylindres. Pour commencer, le domaine de calcul est divisé en plusieurs régions, une région fluide et plusieurs régions solides. Ces régions solides sont au nombre de 92 (nombre de cylindres). Au sein de la région fluide, les frontières correspondant à chacun des 92 cylindres sont séparées et une condition aux limites de

type « parois » est appliquée sur chacune d'entre elles. Une interface est ensuite définie entre chaque région solide et la frontière du cylindre fluide qui lui correspond.

Deux types de conditions aux limites sont choisis sur la partie « solide » permettant de définir les degrés de liberté des cylindres. Dans la configuration étudiée au cours de cette thèse, les cylindres sont fixés sur le radier de la passe à poissons. Une condition de type « encastrement » a été définie à la base des cylindres. Les surfaces restantes sont des interfaces et sont laissées libres de toute contrainte. Elles sont cependant soumises aux efforts calculés par le solveur dédié à la partie mécanique, à la manière d'une poutre en console.

III.2.1.d Le maillage du corps du domaine

Le domaine de simulation a été discrétisé à l'aide d'un maillage structuré hexaédrique qui a l'avantage de générer moins de cellules qu'un maillage non structuré pour une taille de domaine donnée. De plus, en raison de sa conception « structurée », ce type de maillage est plus efficace en termes d'utilisation de la mémoire car l'agencement des cellules est stocké sous forme de tableau dans lequel les cellules adjacentes sont connues implicitement. Avec un maillage non structuré (composé de tétraèdres ou de polyèdres par exemple), il sera plus facile de mailler un domaine complexe. En revanche, le recours à un tableau donnant la connexion de chaque cellule les unes par rapport aux autres fait que ce maillage requiert une utilisation de mémoire plus importante. Un maillage conforme étant nécessaire au niveau des interfaces entre la partie fluide et la partie structure, un maillage polyédrique a dû être utilisé pour mailler le domaine de simulation de la passe à poissons munie de structures souples.

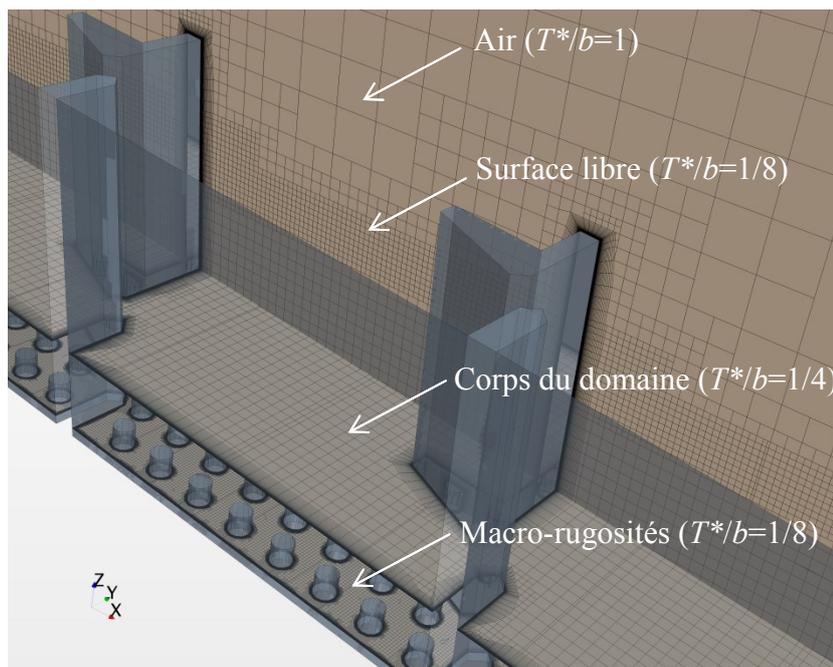


Figure III-4. Maillage de la passe à poissons munie de macro-rugosités utilisé en simulation URANS avec les différents degrés de raffinement.

La taille des mailles T^* du corps du domaine de simulation a été définie par rapport à la largeur de la fente (T^*/b). En modélisation URANS, ce rapport a été fixé à $1/4$ ce qui permet d'une part d'obtenir une bonne définition de la géométrie mais également d'avoir des erreurs de discrétisation spatiale réduites (Figure III-4). Le niveau d'eau étant déterminé expérimentalement, la position moyenne de la surface libre dans chacun des bassins peut être estimée. Le maillage a été raffiné à $T^*/b=1/8$ dans une zone autour de cette position ($\pm 20\%$). La partie du domaine qui ne contient que de l'air (au-dessus de la surface libre) a été maillée avec une taille de maille $T^*/b=1$. Pour la simulation de l'écoulement dans la passe à poissons munie de macro-rugosités, un raffinement ($T^*/b=1/8$) a été opéré dans une zone délimitée par la hauteur des cylindres. Le nombre de mailles ainsi généré permet d'utiliser pleinement les ressources en

calcul disponibles au laboratoire (calculateur linux SGI UV2000 possédant 58 processeurs Intel Xeon de 16 cœurs en hyper-threading et plus de 1,4To de mémoire vive).

Le maillage de la passe à poissons avec les structures souples a été défini de la même manière mais avec des mailles polyédriques (Figure III-5).

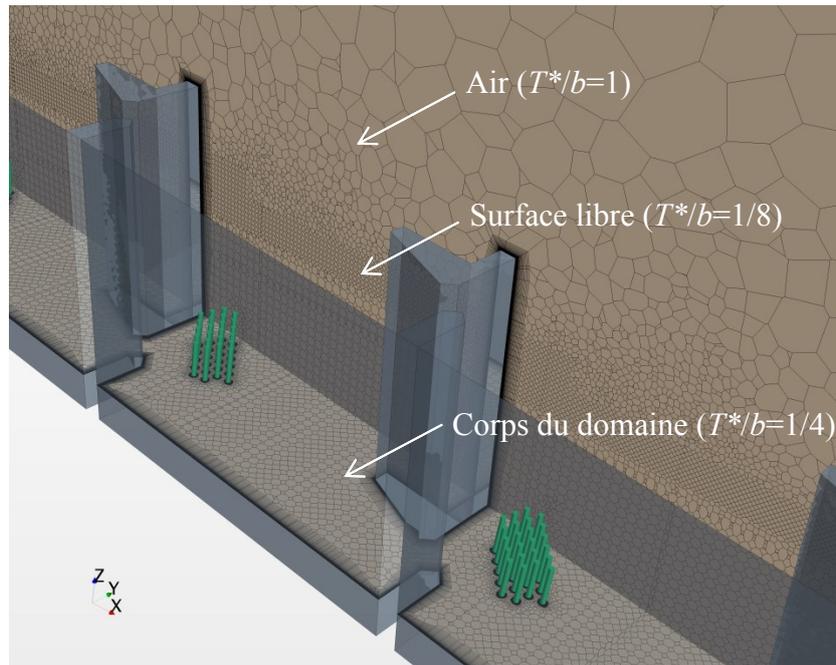


Figure III-5. Maillage de la passe à poissons munie de structures souples utilisé en simulation URANS avec les différents degrés de raffinement.

En modélisation LES, la taille des mailles est très importante car elle définit la taille du filtre. La taille de maille utilisée pour les simulations URANS a été conservée pour mailler tous les bassins sauf le troisième, correspondant au bassin de référence. Sur ce bassin la taille des mailles du corps du domaine a été divisée par deux, soit $T^*/b=1/8$ (Figure III-6).

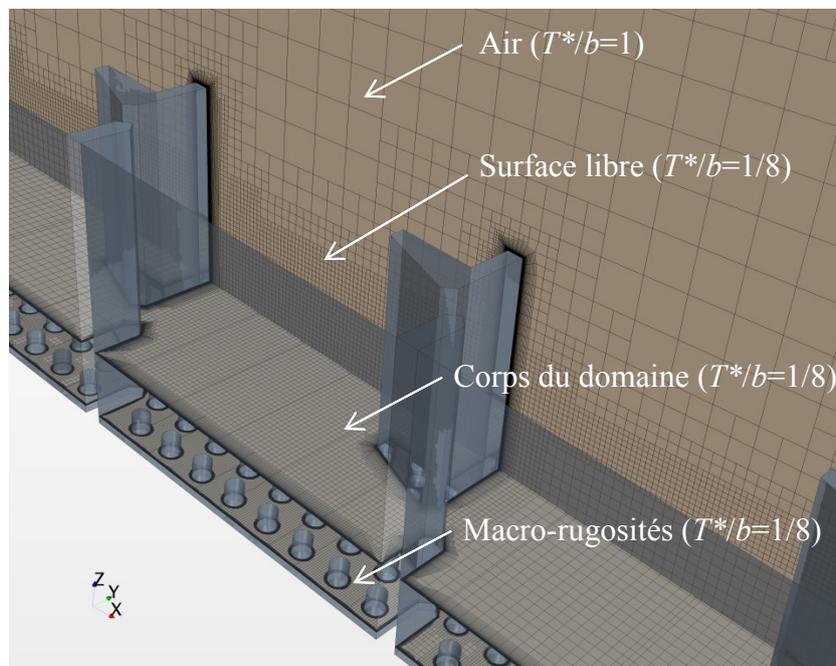


Figure III-6. Maillage de la passe à poissons munie de macro-rugosités utilisé en simulation LES avec les différents degrés de raffinement.

III.2.1.e Maillage de la couche limite

En dehors de la région de paroi, on définit l'échelle de longueur δ représentative de l'épaisseur de la couche limite et correspondant à la distance à laquelle la vitesse dans la couche limite atteint 99% de la vitesse dans la région externe. Cependant, à l'échelle δ les effets visqueux sont négligeables ce qui la rend inadaptée pour étudier l'écoulement de proche paroi. On définit alors une autre échelle (δ_v) basée sur des paramètres internes de la couche limite, la vitesse de frottement pariétal u_τ et la viscosité cinématique du fluide ν (eq.III-20) :

$$\delta_v = \frac{\nu}{u_\tau} \quad (\text{eq.III-20})$$

La vitesse de frottement pariétale u_τ , caractéristique de la turbulence en proche paroi est définie par (eq.III-21) :

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{eq.III-21})$$

avec ρ la masse volumique du fluide et τ_w la contrainte de cisaillement en proche paroi définie par (eq.III-22) :

$$\tau_w = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \quad (\text{eq.III-22})$$

avec C_f le coefficient de frottement et U_∞ la vitesse dans la zone externe à la couche limite.

L'échelle δ_v permet de définir la grandeur adimensionnée (y^+) qui s'apparente à un nombre de Reynolds local qui varie en fonction de la distance à la paroi (y) (eq.III-23) :

$$y^+ = \frac{y}{\delta_v} \quad (\text{eq.III-23})$$

La vitesse u^+ correspond au rapport entre la vitesse locale u et la vitesse de frottement pariétal u_τ et est donnée par (eq.III-24) :

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (\text{eq.III-24})$$

Afin de déterminer u^+ et y^+ , il est nécessaire d'estimer au préalable la contrainte de cisaillement τ_w qui dépend de la valeur du coefficient de frottement C_f . Un grand nombre de lois sont disponibles dans la littérature pour déterminer de manière empirique la valeur de C_f en fonction d'un nombre de Reynolds local. La relation de Schultz-Grunow fondée sur une loi logarithmique déficitaire a été utilisée (eq.III-25) :

$$C_f = \frac{0,37}{\log(U_\infty x / \nu)^{2,584}} \quad (\text{eq.III-25})$$

À partir de l'analyse de l'évolution de u^+ en fonction de y^+ , il est possible de distinguer trois zones dans la région de proche paroi (Figure III-7) :

- La sous-couche visqueuse dans laquelle le profil de vitesse moyenne est linéaire ($u^+ = y^+$). Dans cette zone, les fluctuations ne contribuent pas significativement au frottement. Elle est présente pour $0 \leq y^+ < 5$.
- La zone tampon pour $5 \leq y^+ < 30$, dans laquelle les contraintes visqueuses et turbulentes sont du même ordre de grandeur .

- La zone inertielle pour $30 \leq y^+ \leq 500$ dans laquelle les contraintes visqueuses deviennent négligeables devant les contraintes turbulentes.

Le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ qui a servi pour les simulations URANS est intégrable jusqu'à la paroi (modèles bas-Reynolds). Cette propriété impose l'utilisation d'un maillage raffiné jusqu'à $y^+ = 1$, pour que le premier point de calcul se situe dans la sous-couche visqueuse (Figure III-8). La même condition doit être respectée en LES pour que la région de proche paroi soit correctement résolue. Pour la LES, la vitesse de frottement pariétal a été estimée à partir des résultats URANS et non à partir de la loi de Schultz-Grunow (eq.III-25).

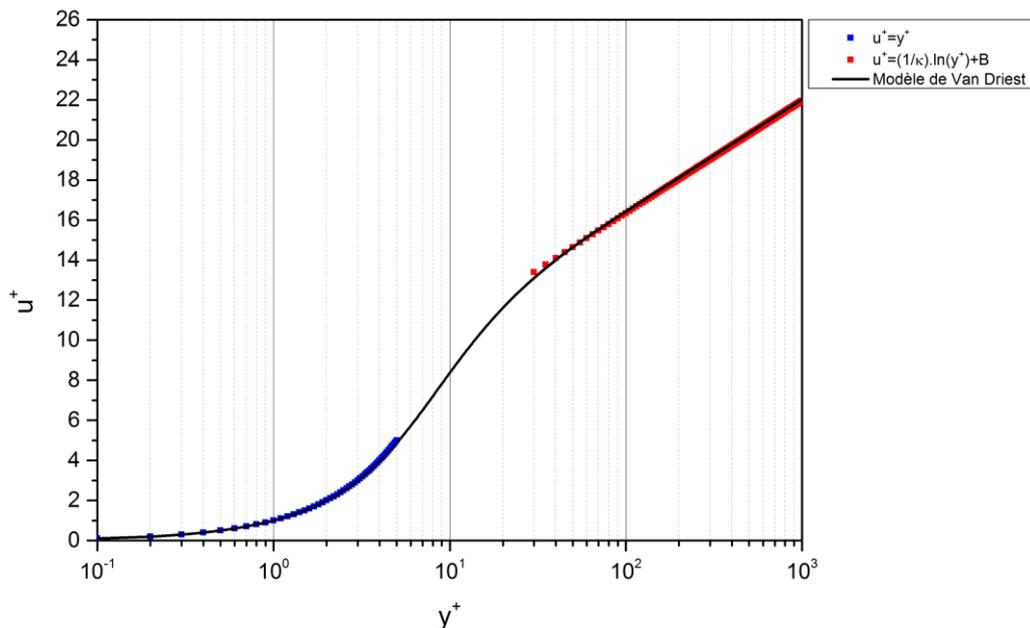


Figure III-7. Evolution de la vitesse de frottement adimensionnée u^+ en fonction de la distance à la paroi y^+ .

À la différence des simulations URANS, l'anisotropie du maillage de proche paroi doit être très limitée. Les tailles de mailles suivantes, en unité de paroi, sont habituellement recommandées et ont été adoptées (Piomelli & Balaras, 2002) : $\Delta x^+ \cong 100$ (dans la direction de l'écoulement) et $\Delta z^+ \cong 20$ (dans la direction transverse).

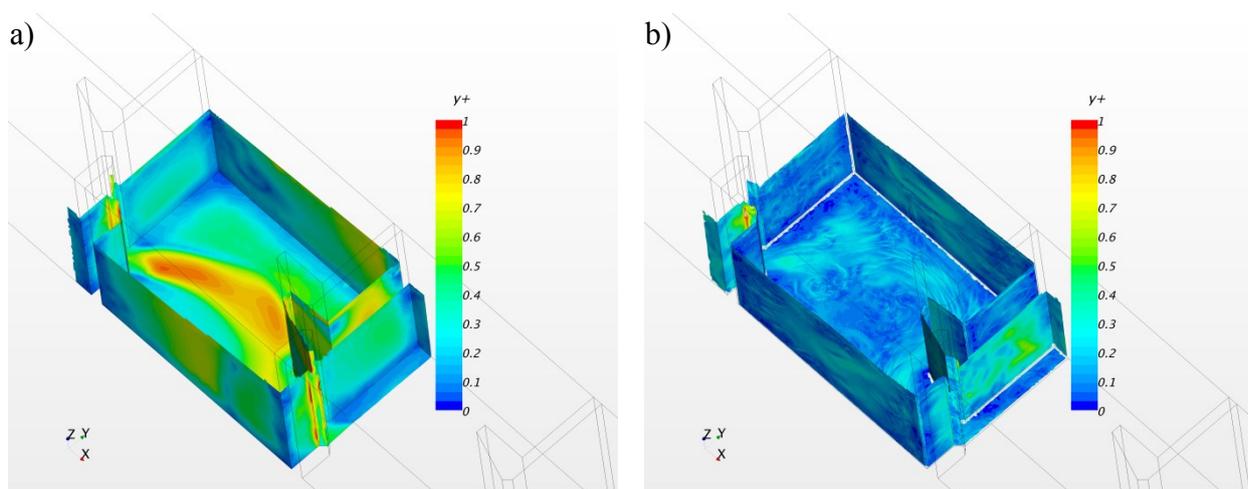


Figure III-8. Visualisation du critère y^+ sur la paroi : a) Simulation URANS ; b) Simulation LES.

L'épaisseur δ du maillage de couche limite a été estimée par l'équation qui donne l'évolution de l'épaississement d'une couche limite turbulente sur plaque plane (Chassaing, 2000) (eq.III-26). Dans les conditions d'écoulement simulées au cours de cette thèse (pente $s=7,5\%$), $\delta(x) = 0,03$ m pour $x = 0,75$ m (longueur d'un bassin).

$$\frac{\delta(x)}{x} \cong \frac{0,37}{Re(x)^{1/5}} \quad (\text{eq.III-26})$$

Le taux d'accroissement de la taille des mailles a été fixé à 10%. Pour que le centre de la première maille à la paroi atteigne $y^+=1$, le nombre de mailles du maillage de proche paroi a été fixé à 48 pour les simulations URANS et 60 pour la LES.

III.2.1.f Les conditions initiales

En URANS, un niveau d'eau est imposé à la sortie du domaine de simulation. Il en résulte un niveau d'eau résiduel dans la passe à poissons. Ce type d'état initial correspond à une configuration dans laquelle l'entrée de la passe à poissons serait fermée et la sortie laissée libre (Figure III-9).

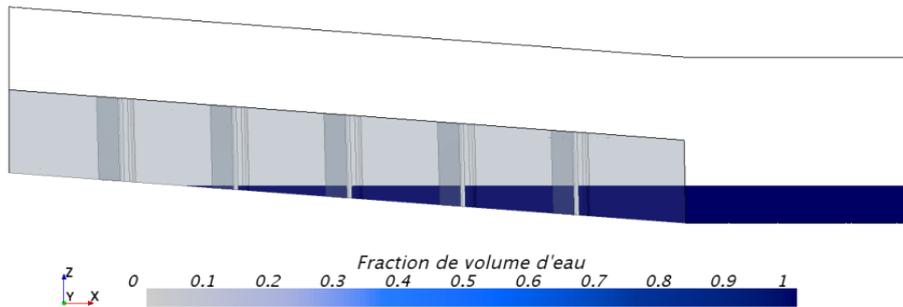


Figure III-9. Niveau d'eau aval imposé en condition initiale en URANS.

La pression hydrostatique correspondant à ce niveau d'eau est par voie de conséquence également imposée. Les valeurs par défaut pour l'échelle de vitesse turbulente et pour l'intensité turbulente ont été conservées et valent respectivement 1 m.s^{-1} et 1%.

En LES, les conditions initiales sont issues des calculs URANS (Figure III-10). Les champs de pression, de vitesses et les fractions de volume d'eau et d'air ont été exportés et interpolés sur le maillage de la LES. Des valeurs moyennes du taux de dissipation et d'énergie cinétique turbulente ont également été définies.

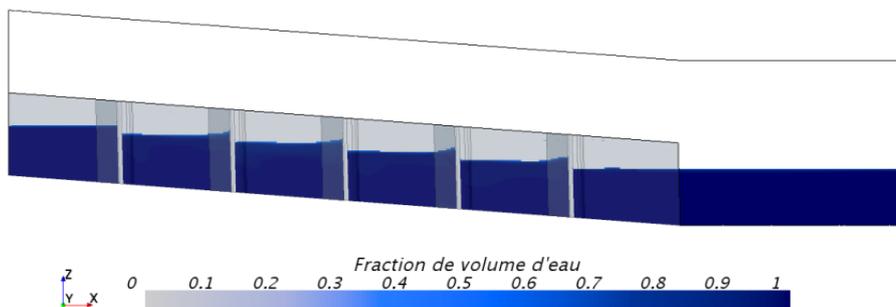


Figure III-10. Niveau d'eau imposé en condition initiale en LES.

III.2.2 Choix du pas de temps et convergence des calculs

III.2.2.a Choix du pas de temps

Le pas de temps doit être adapté à la taille des mailles discrétisant le domaine de calcul et à la cinématique de l'écoulement. Il est choisi de manière à respecter la condition CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) qui définit la limite de stabilité d'un schéma numérique en fonction des discrétisations spatiale et temporelle et des caractéristiques cinématiques de la solution à calculer. Le schéma implicite du second ordre (ici utilisé pour toutes les simulations) est inconditionnellement stable mais pour des questions de précision un $CFL=1$ est souvent utilisé. Le CFL est défini, dans un cas monodimensionnel, par (eq.III-27) :

$$CFL = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (\text{eq.III-27})$$

avec u la vitesse de l'écoulement, Δt le pas de discrétisation temporelle et Δx le pas de discrétisation spatiale. Un Δt de 10 ms a été défini, correspondant à un CFL égal à 1 pour $\Delta x = b/8$ et $u = V_d = 1,05$ m/s.

III.2.2.b Convergence des calculs

Pour rappel, une méthode de résolution implicite a été utilisée pour simuler l'écoulement instationnaire. La solution est calculée à partir de deux boucles imbriquées : une boucle en temps physique qui permet de décrire l'évolution instationnaire, à l'intérieur de laquelle tourne une boucle sous-itérative (en temps dual) qui cherche à atteindre un état stationnaire.

Pour sortir de la boucle sous-itérative et incrémenter d'un pas de temps la solution de la simulation, un critère basé sur l'évolution des vitesses dans chacun des bassins a été défini. Pour cela, des sondes ont été placées dans l'écoulement à $Z/b=2$ et au milieu des bassins (Figure III-11). La sortie de la boucle est effectuée lorsque la vitesse en chacun des points admet une variation inférieure à 0,5% de la vitesse débitante maximale théorique de l'écoulement sur au moins cinq itérations.

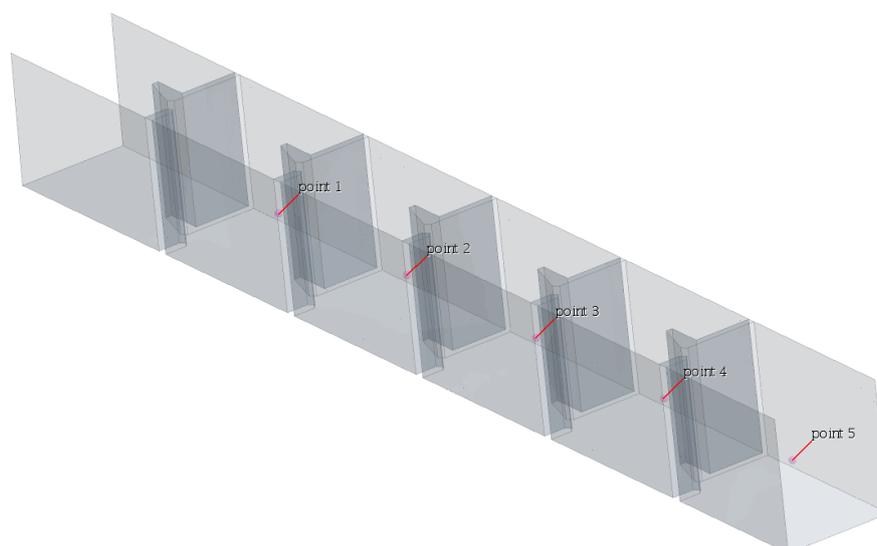


Figure III-11. Position des points de mesure de vitesses utilisés pour sortir de la boucle sous-itérative.

Dans le cas de la simulation URANS, l'équilibre des niveaux d'eau dans chacun des bassins est atteint au bout de 20 secondes de simulation, temps à partir duquel les grandeurs statistiques sont calculées. L'arrêt de la boucle en temps physique (sans prendre en compte les 20 premières secondes) a été fixé à 300 s pour correspondre au temps d'acquisition des mesures expérimentales. L'écoulement étant déjà complètement développé au début des simulations LES, le temps de simulation est basé sur la convergence de la vitesse moyenne et RMS calculées au point 3 (Figure III-11). Un exemple des taux de convergences des vitesses moyennes et RMS calculés au point 3 est donné sur la figure III-12.

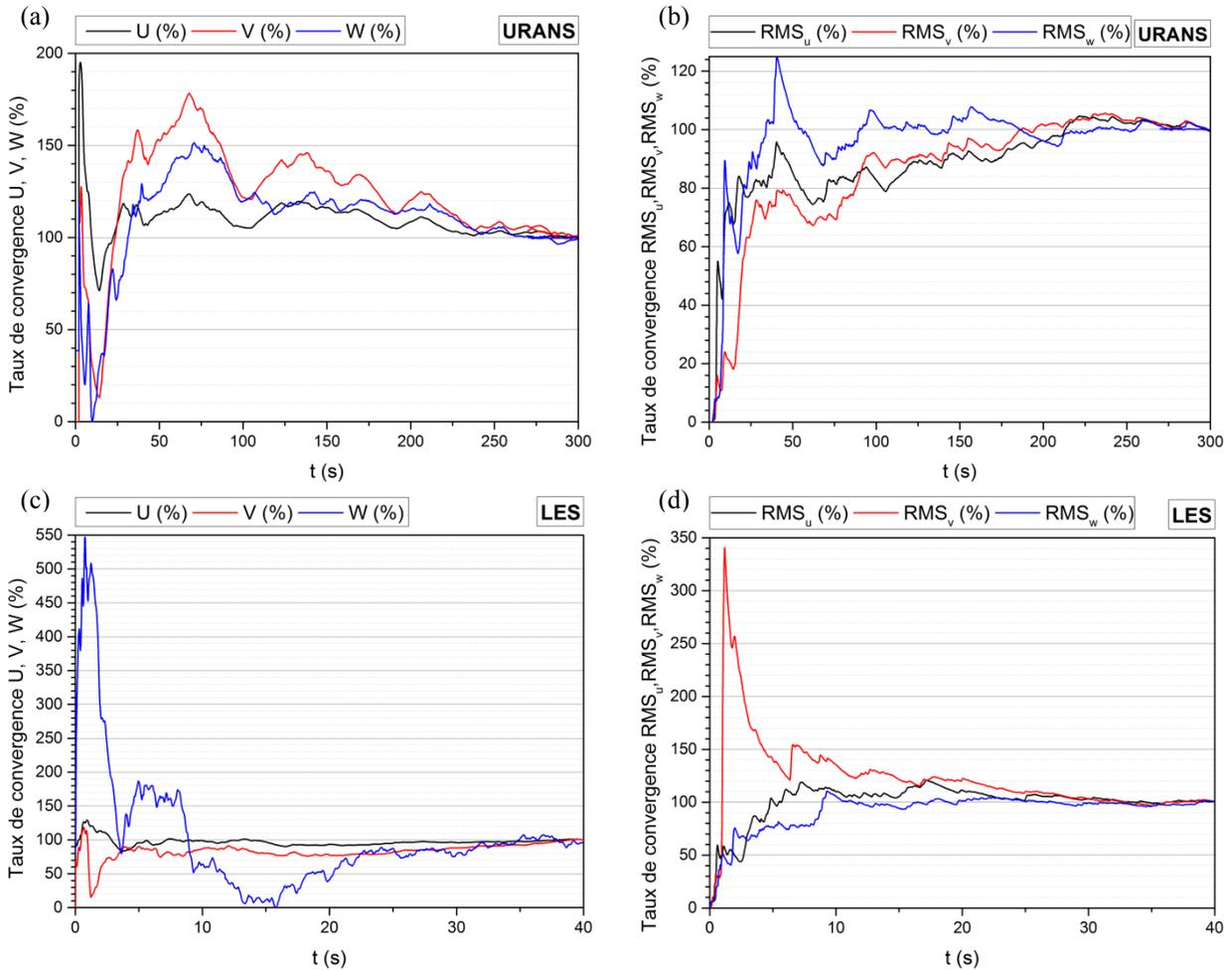


Figure III-12. Exemples de taux de convergence des vitesses moyennes et RMS calculés au point 3 dans le cas d'une simulation URANS (a) et (b) et d'une simulation LES (c) et (d).

III.2.2.c Convergence en maillage

Afin d'estimer les erreurs dues à la discrétisation spatiale (maillage), la méthode Grid Convergence Index (GCI) a été utilisée pour les simulations URANS (Celik *et al.*, 2008). C'est une méthode éprouvée et recommandée pour évaluer les incertitudes de mesures en CFD et qui est basée sur la méthode d'extrapolation de Richardson. Elle permet d'extrapoler une grandeur à partir du résultat de plusieurs simulations réalisées avec différents degrés de raffinement de maillage. Cette solution extrapolée correspond alors à une solution asymptotique pour laquelle la taille des mailles tendrait vers zéro. Dans le cadre de cette thèse, les simulations ont été réalisées pour 3 tailles de mailles différentes, du maillage le plus grossier au plus fin : $\frac{T^*}{b} = \frac{1}{2}; \frac{1}{4}$ et $\frac{1}{8}$.

La première étape consiste à déterminer le nombre de mailles de chacune des simulations puis de calculer les rapports de raffinement : $r_{12} = \sqrt{\frac{N_1}{N_2}}$; $r_{23} = \sqrt{\frac{N_2}{N_3}}$ avec N_1, N_2, N_3 respectivement le nombre de mailles de chacune des simulations $\frac{T^*}{b} = \frac{1}{8}, \frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ ($N_1 > N_2 > N_3$) et r_{12}, r_{23} les rapports de raffinement entre les différents maillages.

L'ordre apparent (p) de la méthode peut ensuite être déterminé par les équations III-28, III-29 et III-30 :

$$p = \frac{\left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{23}}{\varepsilon_{12}} \right| + q(p) \right|}{\ln r_{12}} \quad (\text{eq.III-28})$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{12}^p - s}{r_{23}^p - s} \right) \quad (\text{eq.III-29})$$

$$s = \text{sign} \left(\frac{\varepsilon_{23}}{\varepsilon_{12}} \right) \quad (\text{eq.III-30})$$

avec $\varepsilon_{12} = f_2 - f_1$, $\varepsilon_{23} = f_3 - f_2$ où f_1 , f_2 et f_3 correspondent aux solutions obtenues avec le nombre de mailles N_1 , N_2 et N_3 .

La résolution de l'équation transcendante pour p (eq.III-28) nécessite l'utilisation d'une méthode itérative. Une solution extrapolée (f_{ext}) est ensuite calculée à partir de r_{12} , f_1 , f_2 et p (eq.III-31) :

$$f_{ext} = \frac{(r_{12}^p \cdot f_1 - f_2)}{r_{12}^p - 1} \quad (\text{eq.III-31})$$

Le GCI est enfin donné par (eq.III-32) :

$$GCI_{21} = 1,25 \cdot \left(\frac{f_{ext} - f_1}{f_1} \right) \quad (\text{eq.III-32})$$

Il donne une mesure de l'écart relatif entre la solution extrapolée (f_{ext}) et la solution obtenue avec le maillage le plus fin, multiplié par un coefficient de sécurité (1,25).

III.2.3 Validation des résultats numériques en configuration radier lisse

Les simulations numériques 2D stationnaires de passes à poissons à fentes verticales effectuées jusqu'à présent au laboratoire (Tarrade, 2007; Bourtal, 2012) atteignent leurs limites, de fait, dès que la géométrie devient tridimensionnelle. Les simulations effectuées pour ce travail de thèse sont les premières, au sein du laboratoire, à être réalisées en 3D instationnaire sur les passes à poissons à fentes verticales. Elles ont donc fait l'objet d'une validation expérimentale, permettant de caractériser les erreurs de modélisation.

Dans cette section, les résultats obtenus par les simulations numériques 3D instationnaires de la passe à poissons en configuration « radier lisse » pour $B/b=6,67$ et 9 sont comparés aux résultats expérimentaux.

Pour donner un caractère objectif aux comparaisons, le coefficient de corrélation r^2 et l'écart-type relatif σ_m entre les courbes expérimentales et numériques, ont été calculés. Le coefficient r^2 permet d'évaluer l'intensité et le sens de la relation linéaire existante entre deux variables. Lorsque deux variables sont liées par une relation parfaitement linéaire et varient dans le même sens $r^2=1$, en revanche lorsque leurs variations sont de sens opposé $r^2=-1$. Le coefficient de corrélation a été utilisé ici pour évaluer le degré de ressemblance entre les courbes numériques et les courbes expérimentales.

Des profils de vitesses et d'énergie cinétique turbulente (définis dans le chapitre précédent) ont été extraits de chacune des simulations réalisées. Les grandeurs cinématiques moyennes et turbulentes ont été adimensionnées par la vitesse débitante maximale V_d . Les courbes de vitesses $\frac{\|V\|_{3D}}{V_d}$ et d'énergie cinétique turbulente $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$ ont été tracées pour le profil transversal B, vertical D et longitudinal E dans les configurations $B/b=6,67$ et $B/b=9$.

Les profils de vitesses et d'énergie cinétique turbulente, obtenus expérimentalement (ADV) et par les simulations (URANS et LES) pour une largeur de bassin $B/b=9$, ont été tracés sur la figure III-13. Les erreurs de discrétisations spatiales sont représentées sous la forme de barres d'erreurs sur les profils de vitesses issus des simulations URANS. En ce qui concerne les profils expérimentaux, les barres d'erreurs représentent les incertitudes de mesures (cf. paragraphe II.3.4).

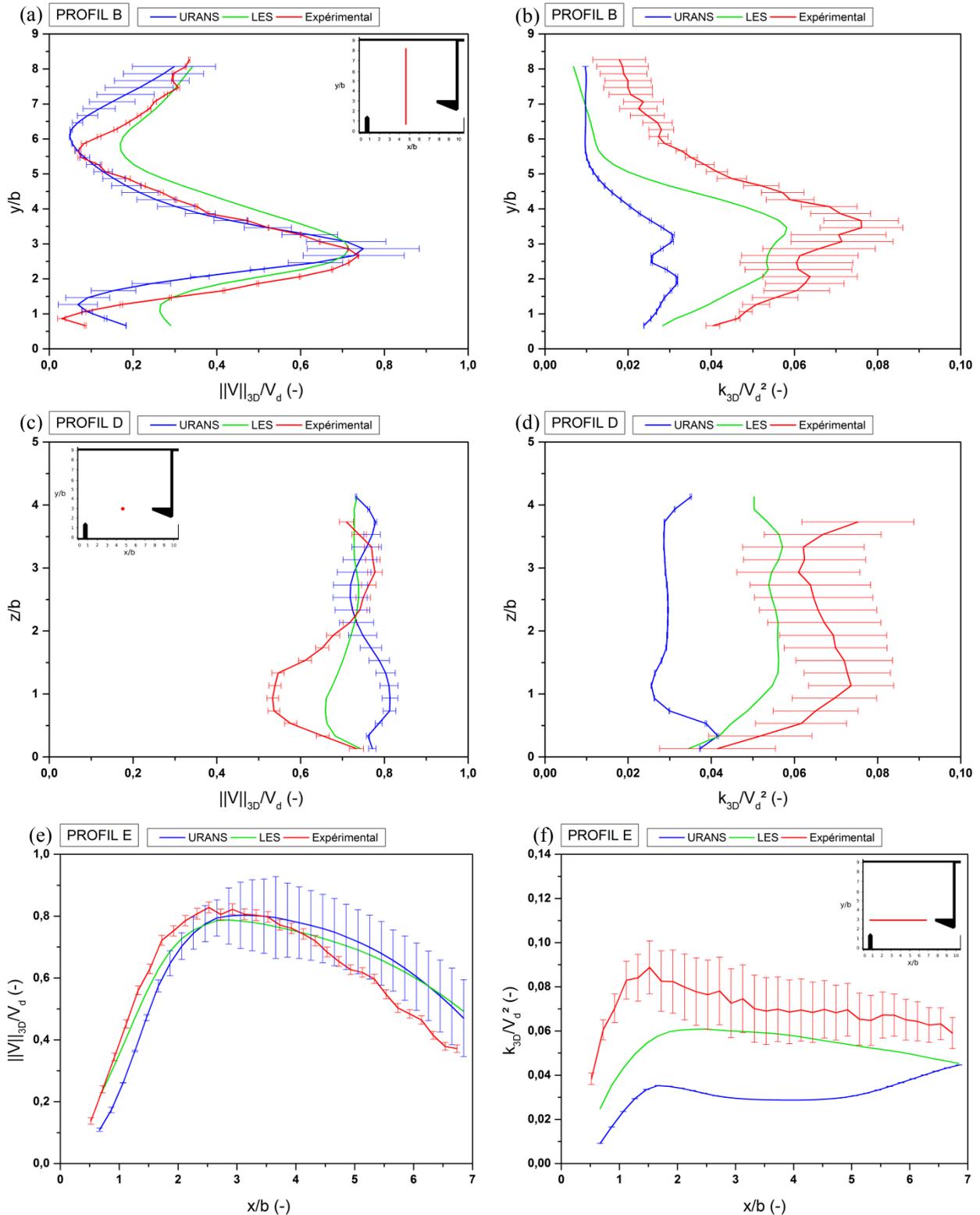


Figure III-13. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=9$. (a), (c) et (e) : norme de la vitesse 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E ; (b), (d) et (f) : énergie cinétique 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E.

Les courbes de vitesses moyennes $\frac{\|V\|_{3D}}{V_d}$ des profils B et E (plan XY) obtenues par les simulations URANS et LES en grande largeur ($B/b=9$) sont semblables à celles obtenues expérimentalement (Figure III-13). Le passage du jet induit une forte augmentation de la vitesse et de l'énergie cinétique turbulente de l'écoulement en $Y/b=3$ (Figure III-13 a et b). De part et d'autre du jet, deux zones de plus faible intensité avec des vitesses minimales locales traduisent l'existence de deux zones de recirculation indiquant une topologie de type 1 (Wu *et al.*, 1999). L'emplacement de ces minimums locaux indique les positions approximatives des centres tourbillonnaires des deux cellules : en $X/b=4,67$, $Y/b=1$ et $X/b=4,67$, $Y/b=6$. Ces positions

correspondent à celles mesurées par Tarrade (2007). Cette topologie de type 1 est aussi visible sur le profil E (Figure III-13 e), où la courbure du jet engendre une vitesse maximale en $X/b=3$. Les simulations URANS et LES reproduisent bien cette topologie d'écoulement. Ce constat visuel est confirmé par des coefficients de corrélation élevés, que ce soit pour la simulation URANS ou pour la simulation LES (Tableau 10). D'autre part, les erreurs sur les vitesses moyennes, quasi-équivalentes en URANS et en LES, sont raisonnables pour ces deux profils (B et E). Pour le profil vertical (profil D), la simulation LES sous-estime le déficit de vitesse existant dans une zone comprise entre $X/b=0,5$ et $1,5$. La méthode URANS prédit une augmentation de la vitesse dans cette zone. Le profil qui se rapproche le plus du profil expérimental est celui calculé en LES avec $\sigma_m=8\%$ et $r^2=0,93$.

Les énergies cinétiques turbulentes $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$ sont sous-estimées par les deux méthodes avec en moyenne sur les trois profils $\sigma_m=25\%$ pour la LES et $\sigma_m=55\%$ pour l'URANS. Il est à noter cependant que les coefficients de corrélation calculés entre la simulation LES et les profils expérimentaux sont élevés pour les profils B, D et E avec respectivement $r^2=0,98$; $0,80$ et $0,77$. Cette caractéristique est intéressante dans le sens où elle indique que la simulation numérique LES permet de donner une répartition correcte de l'énergie cinétique turbulente dans un bassin de passe à poissons. Les écarts-types relatifs moyens σ_m et les coefficients de corrélations r^2 sont donnés dans le tableau 10.

		Profil B		Profil D		Profil E	
		σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)
$\frac{\ V\ _{3D}}{V_d}$	URANS	24,1	0,92	8,7	-0,87	10,1	0,92
	LES	23,6	0,93	8,3	0,93	8,3	0,97
$\frac{k_{3D}}{V_d^2}$	URANS	59,2	0,85	53,5	-0,76	55,2	38,3
	LES	32,7	0,98	19,3	0,80	24,5	0,77

Tableau 10 : Ecarts-types relatifs moyens et coefficients de corrélations calculés entre les profils de vitesses et de l'énergie cinétique turbulente issus des simulations numériques et ceux issus des mesures expérimentales.
Configuration : radier lisse et $B/b=9$.

Pour la plus petite largeur ($B/b=6,67$), l'écoulement est transitoire (Wang *et al.*, 2010). Dans cette configuration, la topologie de l'écoulement n'est pas clairement définie. Elle oscille entre la topologie de type 1 et celle de type 2. En topologie de type 2, le jet sortant de la fente amont est dirigé vers la paroi opposée à celle-ci (Wu *et al.*, 1999). Les profils de vitesses B et E (Figure III-14 a et b) permettent de montrer le passage du jet avec une vitesse maximale atteinte en $Y/b=4$ pour $X/b=4,67$ (Figure III-14 a) et en $Y/b=2$ pour $X/b=2,95$ (Figure III-14 b). Il est également possible de repérer la position du centre tourbillonnaire de la cellule située sur la droite du jet, par l'analyse des minimums locaux. Ainsi, à partir des profils B et E, les coordonnées approximatives de ce centre tourbillonnaire sont estimables ($X/b=4$ et $Y/b=2$) et correspondent sensiblement à celles mesurées par Tarrade (2007). La décroissance rapide du profil de vitesse moyenne à partir de $X/b=1,8$ (Figure III-14 a) indique que la topologie mesurée ici n'est plus une topologie de type 1.

En petite largeur, la simulation URANS ne reproduit pas tout à fait la topologie transitoire attendue. La vitesse maximale engendrée par le passage du jet est atteinte en $Y/b=3$, ce qui dénote plutôt une topologie de type 1. En revanche, les résultats obtenus en LES sont caractéristiques d'une topologie transitoire, avec un jet qui atteint une vitesse maximale en $Y/b=4$ (Profil B, Figure III-14 a).

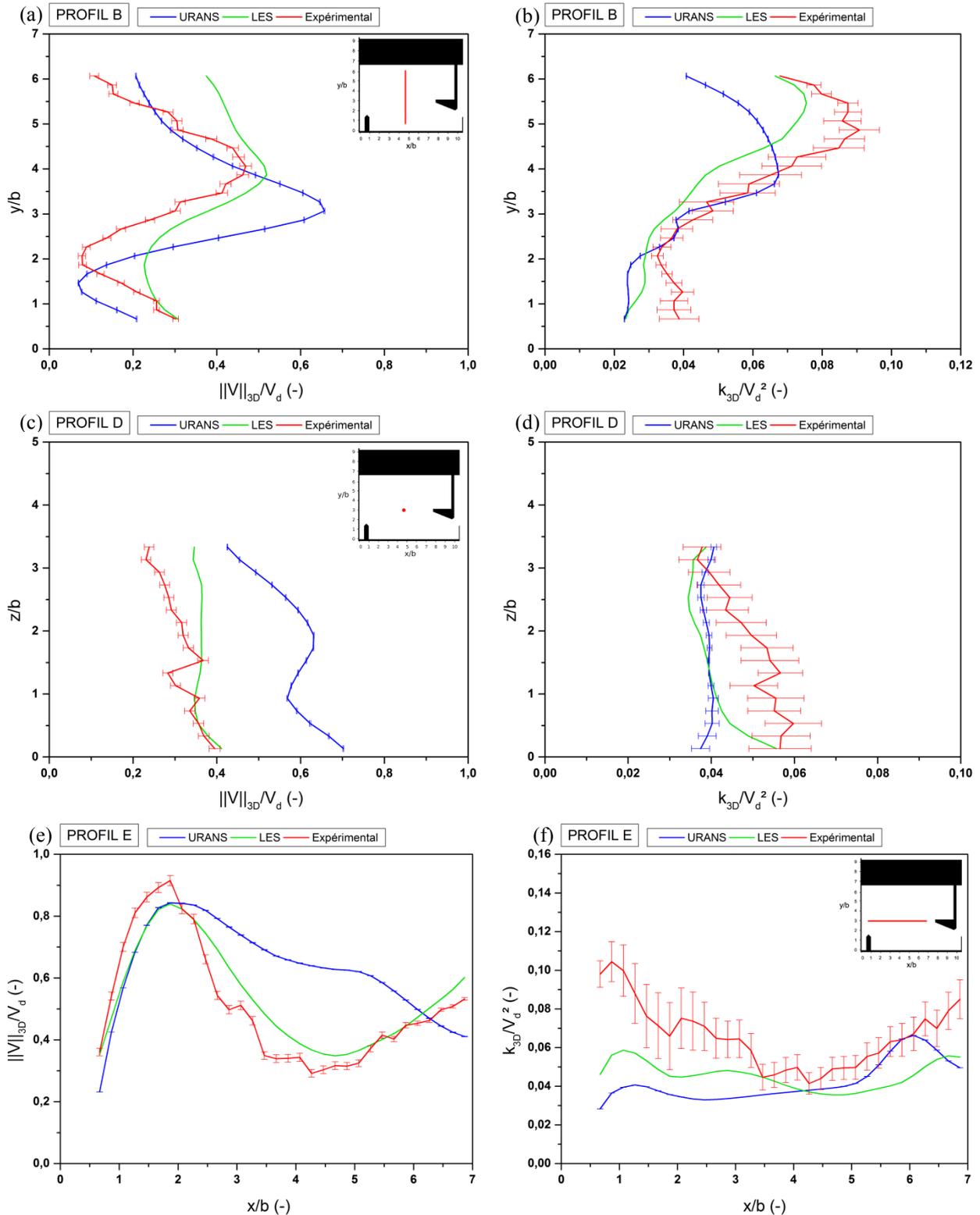


Figure III-14. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=6,67$. (a), (c) et (e) : norme de la vitesse 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E ; (b), (d) et (f) : énergie cinétique 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E.

Au niveau du profil B, les vitesses moyennes sont surestimées par les deux méthodes avec un écart-type relatif moyen $\sigma_m=50\%$ pour la simulation URANS et $\sigma_m=41\%$ pour la LES. Les corrélations montrent, par ailleurs, que la forme de la courbe de vitesse de ce profil obtenue par la méthode LES est plus proche de la courbe expérimentale ($r^2=0,82$) que celle calculée en LES ($r^2=0,51$). Pour les profils D et E (Figure III-14 c et e), la simulation LES estime de façon plus juste les vitesses moyennes avec respectivement $\sigma_m=16\%$ et 12% contre $\sigma_m=86\%$ et 35% pour la simulation URANS.

En petite largeur également ($B/b=6,67$) les deux méthodes sous-estiment l'énergie cinétique turbulente mais dans une moindre mesure. En moyenne sur les trois profils, $\sigma_m=22\%$ avec la simulation LES et $\sigma_m=25\%$ avec l'URANS. Les coefficients de corrélation donnent toutefois l'avantage à la méthode LES sur chacun des profils.

Les écarts-types relatifs moyens σ_m et les coefficients de corrélations r^2 sont donnés dans le tableau 11.

		Profil B		Profil D		Profil E	
		σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)
$\frac{\ V\ _{3D}}{V_d}$	URANS	49,6	0,51	85,8	0,87	35,4	0,48
	LES	41,2	0,82	16,1	0,58	11,7	0,93
$\frac{k_{3D}}{V_d^2}$	URANS	17,3	0,83	22,0	0,19	36,3	0,03
	LES	14,4	0,97	19,4	0,67	31,0	0,82

Tableau 11 : Ecarts-types relatifs moyens et coefficients de corrélations calculés entre les profils de vitesses et d'énergies cinétiques turbulentes issus des simulations numériques et ceux issus des mesures expérimentales. Configuration : radier lisse et $B/b=6,67$.

La simulation LES sera utilisée pour étudier l'écoulement dans la configuration *radier lisse* pour les deux largeurs de bassin car elle présente des résultats plus proches des résultats expérimentaux que ceux obtenus par la méthode URANS.

III.3 Conclusion

Tout d'abord, les concepts des différentes méthodes numériques utilisées pour simuler l'écoulement dans les diverses configurations étudiées ont été détaillés. Après avoir montré les configurations pour lesquelles l'écoulement a été simulé, les caractéristiques de chacune des simulations ont été définies (maillage, conditions aux limites, conditions initiales...). Dans un second temps, les choix du pas de temps et du temps de simulation, basés respectivement sur le respect du critère CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) et sur un critère de convergence des grandeurs statistiques moyennes et turbulentes ont été expliqués. Dans le but d'évaluer les erreurs dues à la discrétisation spatiale, la méthode GCI (Grid Convergence Index) a été utilisée et décrite dans ce chapitre. Enfin, sur la base d'une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, la méthode LES s'est avérée plus performante que la méthode URANS pour simuler l'écoulement dans la passe à poissons en configuration *radier lisse*. La modélisation LES sera donc utilisée dans le prochain chapitre pour simuler l'écoulement dans cette configuration.

Chapitre 4

ETUDE DE L'INFLUENCE DES SEUILS

Sommaire

IV.	ETUDE DE L'INFLUENCE DES SEUILS	105
IV.1	Topologie de l'écoulement.....	106
IV.2	Coefficient de débit.....	108
IV.3	Influence de la hauteur des seuils sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement	110
	IV.3.1 Influence de la hauteur des seuils en petite largeur ($B/b=6,67$).....	111
	IV.3.2 Influence de la hauteur des seuils en grande largeur ($B/b=9$).....	112
IV.4	Analyse de l'écoulement avec un seuil de hauteur $h_s/b=1$	116
	IV.4.1 Validation des modèles numériques	116
	IV.4.2 Etude de l'écoulement.....	119
	IV.4.2.a Influence des seuils sur l'écoulement en grande largeur ($B/b=9$)	120
	IV.4.2.b Influence des seuils sur l'écoulement en petite largeur ($B/b=6,67$).....	123
	IV.4.3 Influence de la présence d'un seuil sur les paramètres clés de l'écoulement.....	125
IV.5	Influence des seuils sur le comportement des poissons	128
	IV.5.1 Identification des zones de stabulation (repos).....	128
	IV.5.2 Indices généraux.....	129
	IV.5.2.a Efficacité totale.....	129
	IV.5.2.b Franchissement total	130
	IV.5.2.c Indice d'activité	132
	IV.5.2.d Indice de dévalaison	134
	IV.5.2.e Bilan des indices	135
	IV.5.3 Temps de séjour.....	135
	IV.5.4 Stabulation.....	137
	IV.5.5 Trajectoires.....	138
IV.6	Conclusion	140

Dans le but de créer des conditions hydrauliques optimales pour la montaison de la plus grande variété possible d'espèces de poissons migrateurs, des éléments (obstacles) peuvent être insérés dans les passes à poissons à fentes verticales. Parmi ces éléments, les seuils, insérés en pied de fente, permettent de limiter le débit de la passe, d'équilibrer les hauteurs de chutes entre les bassins ou encore de diminuer la puissance volumique dissipée dans chaque bassin, en augmentant artificiellement le niveau d'eau. Si l'utilisation des seuils est courante, leur influence sur l'écoulement et sur l'efficacité biologique de l'ouvrage reste jusqu'à présent peu étudiée.

L'ajout de seuils dans la passe à poissons du laboratoire, est dans un premier temps étudié d'un point de vue hydraulique par une analyse de la topologie de l'écoulement et des coefficients de débit. Dans un second temps, les grandeurs cinématiques de l'écoulement sont examinées à partir de données expérimentales et numériques. Pour caractériser l'influence de leur présence dans une passe à poissons, une étude du comportement de différentes espèces de poissons est ensuite menée.

IV.1 Topologie de l'écoulement

La topologie de l'écoulement a été étudiée en fonction de la largeur des bassins, de l'inclinaison de la passe, du débit et de la hauteur du seuil inséré dans les fentes. Pour mettre en évidence l'influence des seuils, les résultats sont présentés sous une forme cartographique similaire à celle proposée par Wang *et al.* (2010). De plus, pour faciliter les comparaisons, les résultats topologiques de Wang *et al.* (2010) en configuration *radier lisse* sont rappelés (Figure IV-1 a).

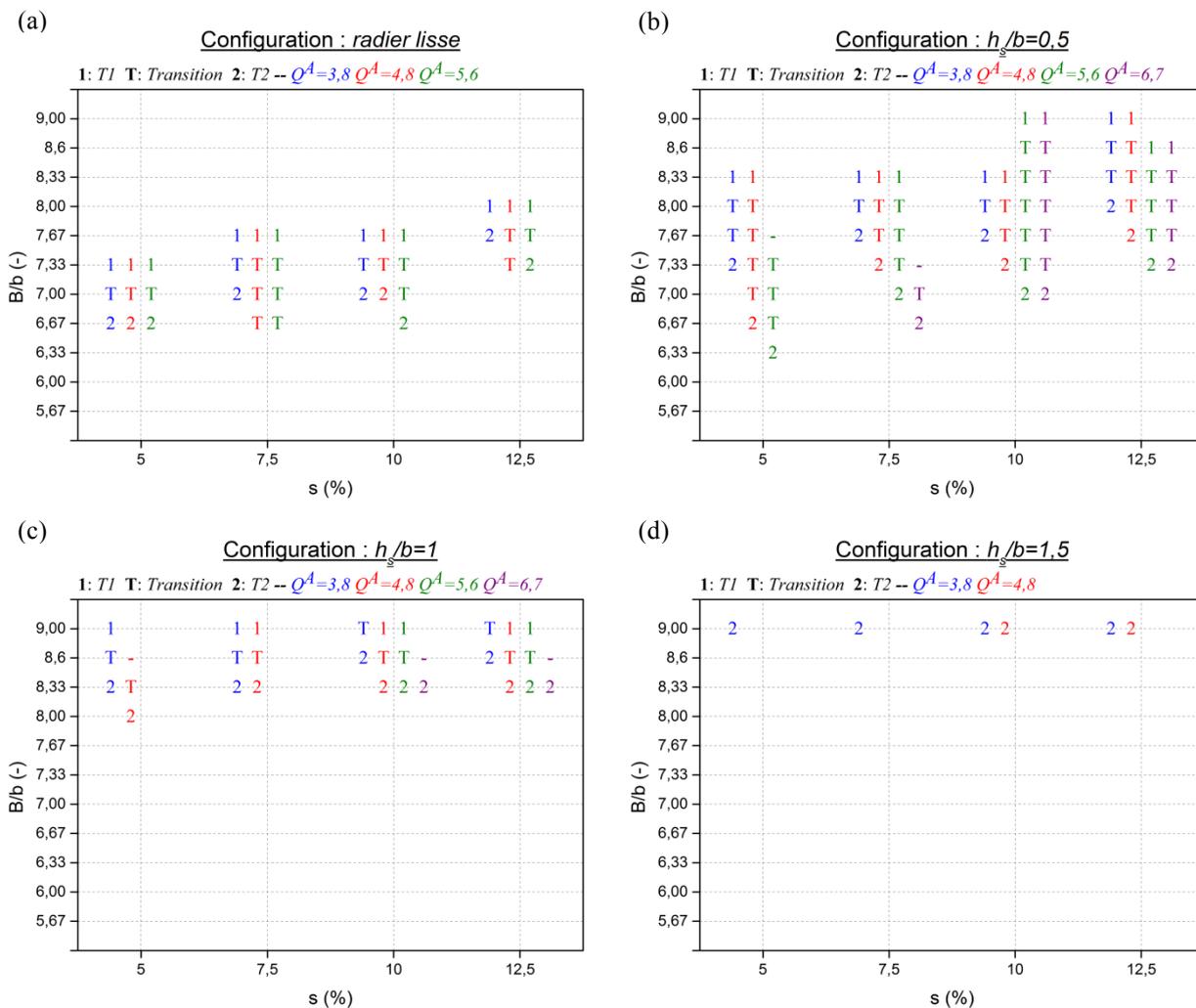


Figure IV-1. Cartographies de la topologie de l'écoulement en fonction de la pente, de la largeur des bassins, du débit et de la hauteur des seuils. (a) configuration radier lisse (Wang *et al.*, 2010), (b) configuration seuil $h_s/b=0,5$, (c) configuration seuil $h_s/b=1$, (d) configuration seuil $h_s/b=1,5$.

L'ensemble des points de mesures qui ont été réalisés, a permis de vérifier que lorsqu'une topologie de type 1 est observée, l'augmentation de la largeur des bassins ne l'influence plus (elle reste en type 1). Il en va de même pour la diminution de la largeur associée à la topologie de type 2. Pour plus de clarté, les points de mesures ne sont pas tous notés sur les graphiques (Figure IV-1), seuls les points permettant de montrer les transitions entre les topologies (Type 1, Transitoire et Type 2) sont présentés. Dans certaines configurations (faibles pentes, forts débits) les topologies n'ont pas pu être mesurées, la capacité limite de la passe à poissons étant atteinte.

L'influence de la pente et de la largeur des bassins sur la topologie d'écoulement a été décrite par Wang *et al.* (2010) dans la configuration *radier lisse* (Figure IV-1 a). La même tendance est retrouvée lorsque des seuils sont insérés aux pieds des fentes (Figure IV-1 b et c). La diminution de la largeur des bassins tend à forcer l'écoulement à adopter une topologie de type 2. En ce qui concerne la configuration avec la hauteur de $h_s/b=1,5$ (Figure IV-1 d), la topologie de type 2 est atteinte dès la plus grande largeur de bassin ($B/b=9$), les modifications topologiques induites par la pente et par la largeur de bassin ne peuvent donc pas être analysées. Pour une hauteur de seuil $h_s/b=0,5$, la zone de transition entre le type 1 et le type 2 (en termes de largeurs de bassins) augmente significativement. À titre d'exemple, la largeur de bassin doit varier de $\Delta B/b=1$ pour qu'un changement de topologie s'opère dans la configuration *radier lisse* avec $s=10\%$ et $Q^A=5,6$ (Figure IV-1 a) contre $\Delta B/b=2$ dans la configuration $h_s/b=0,5$ (Figure IV-1 b). Pour cette hauteur particulière de seuil, le débit a une influence significative sur la topologie, par rapport à la configuration *radier lisse* (Wang *et al.*, 2010).

Quelle que soit la pente, l'augmentation du débit entraîne un agrandissement de la zone de transition, particulièrement entre $Q^A=3,8$ et $Q^A=4,8$ où elle est en moyenne doublée. Cet effet est cependant moins marqué pour les valeurs plus grandes de débit. Pour la hauteur de seuil $h_s/b=1$ (Figure IV-1 c), la taille des zones de transition est équivalente voire même diminuée par rapport à la configuration *radier lisse*.

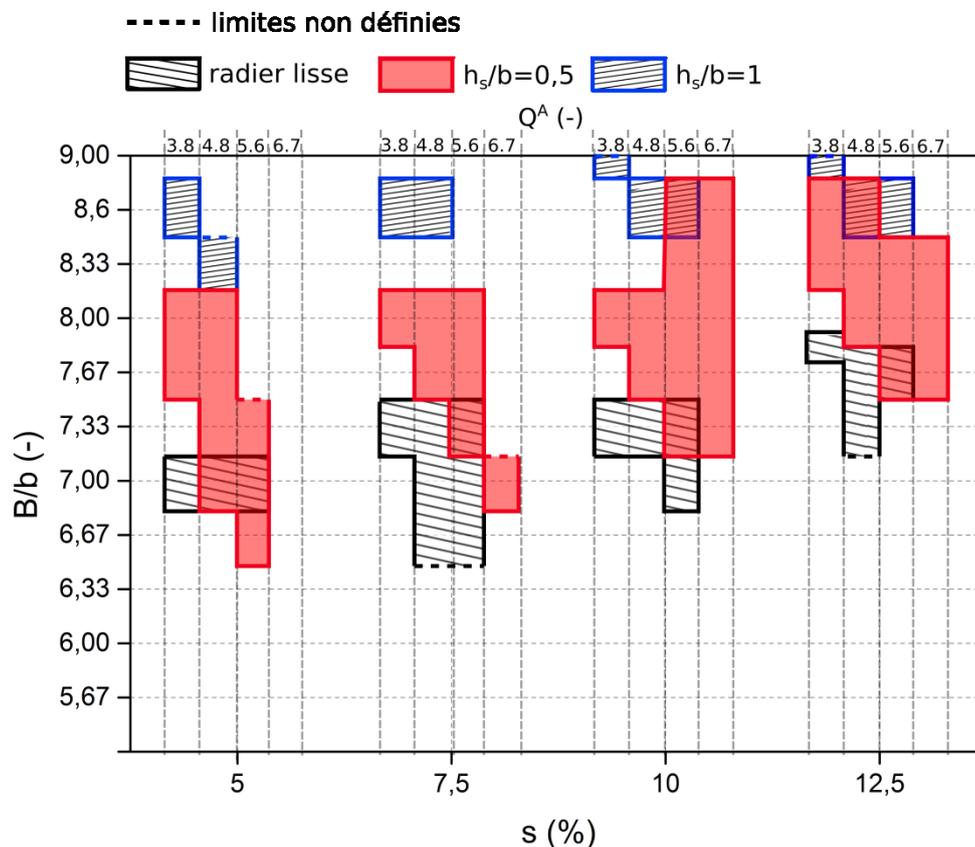


Figure IV-2. Cartographies des zones de transition entre la topologie de type 1 et la topologie de type 2 en fonction des seuils.

D'autre part, une variation du débit n'entraîne pas de changement significatif sur la topologie. L'augmentation de la pente décale le schéma topologique (Type 1 – T – Type 2) vers de plus grandes largeurs. Ce décalage est approximativement du même ordre de grandeur pour les configurations *radier lisse* et $h_s/b=0,5$ avec $\Delta B/b=+1$ entre $s=5\%$ et $12,5\%$. Dans la configuration $h_s/b=1$, l'influence de la pente est présente mais dans une moindre mesure.

La figure IV-2 représente les zones de transition entre la topologie de type 1 et la topologie de type 2 sous forme de blocs. Lorsque les limites sont définies (traits pleins), les zones situées en dessus et en dessous des blocs correspondent respectivement à des topologies de type 1 et de type 2. L'insertion d'un seuil modifie la trajectoire du jet sortant de la fente amont en l'orientant vers la paroi opposée à la fente. Cette caractéristique a déjà été observée (Rajaratnam *et al.*, 1986) et est ainsi confirmée par les mesures.

Les résultats présentés ici, permettent d'évaluer l'influence de la hauteur des seuils sur la structure topologique de l'écoulement. Plus cette hauteur est importante et plus la trajectoire du jet s'en trouve modifiée, générant ainsi un écoulement de type 2. La hauteur de seuil $h_s/b=0,5$ entraîne un décalage de la topologie de type 2 d'en moyenne $\Delta B/b=+0,6$ vers les plus grandes largeurs pour $Q^4=3,8$ tandis que pour $h_s/b=1$ il est de 1,4. Ce décalage n'est pas significativement différent pour les débits plus importants, à part pour la pente la plus faible ($s=5\%$) où l'augmentation du débit peut repousser l'apparition du type 2 vers des largeurs plus faibles que dans la configuration *radier lisse*. L'insertion d'un seuil favorise également le passage d'une structure de type 1 à une structure de transition. En présence du seuil $h_s/b=0,5$, l'écoulement quitte la topologie de type 1 avec un décalage $\Delta B/b=+0,84$ vers les grandes largeurs, tous débits et toutes pentes confondus. De la même façon, le seuil $h_s/b=1$ entraîne un décalage $\Delta B/b=+1,3$.

L'insertion des seuils a un impact non négligeable sur la topologie de l'écoulement, en favorisant l'apparition de la topologie de type 2 au détriment de la topologie de type 1.

IV.2 Coefficient de débit

Le coefficient de débit est un paramètre utilisé lors du dimensionnement des passes à poissons à fentes verticales. Il quantifie la perte de charge générée par le passage de l'écoulement dans les bassins et permet de donner une estimation du débit transitant dans l'ouvrage.

Le coefficient de débit C_d a été tracé en fonction du débit, de la pente et de la largeur des bassins pour les 3 hauteurs de seuils ($h_s/b=0,5$ – 1 et 1,5) et pour la configuration *radier lisse* (Figure IV-3). La topologie de l'écoulement est également notée pour chacun des points mesurés. Les incertitudes, calculées pour chaque coefficient, sont données sous la forme de barre d'erreurs. Toutes configurations confondues, le C_d varie de $0,62 \pm 0,03$ à $0,89 \pm 0,02$ avec $k=2$.

La valeur du coefficient de débit est reportée en fonction du débit pour la configuration $B/b=9$ et $s=10\%$ (Figure IV-3 a). En prenant en compte toutes les hauteurs de seuils, la variation moyenne du C_d en fonction du débit est de $1,8\% \pm 4,8\%$ avec $k=2$. Cette variation est du même ordre de grandeur, quelle que soit la largeur des bassins et quelle que soit la pente. Le débit n'a donc pas une influence significative sur le C_d . La décroissance du coefficient de débit en fonction de la pente a déjà été observée et quantifiée (Wang *et al.*, 2010). La même tendance se retrouve ici (Figure IV-3 b) avec une diminution moyenne de $10\% \pm 2\%$ avec $k=2$ entre les pentes $s=5\%$ et 15% .

L'effet de la pente observée pour $B/b=9$ et $Q^4=3,8$ est représentative de la tendance observée pour les autres débits et les autres largeurs de bassins. La diminution du C_d avec l'augmentation de la largeur des bassins est vérifiée (Figure IV-3 c), et est en accord avec les résultats de Wang *et al.* (2010). La variation moyenne (calculée sur tous les cas) du C_d entre $B/b=5,67$ et 9 est d'environ -15% pour les configurations *radier lisse*, $h_s/b=0,5$ et $h_s/b=1$. Elle est cependant négligeable pour la plus grande hauteur de seuil ($h_s/b=1,5$) avec une diminution de $2\% \pm 5\%$.

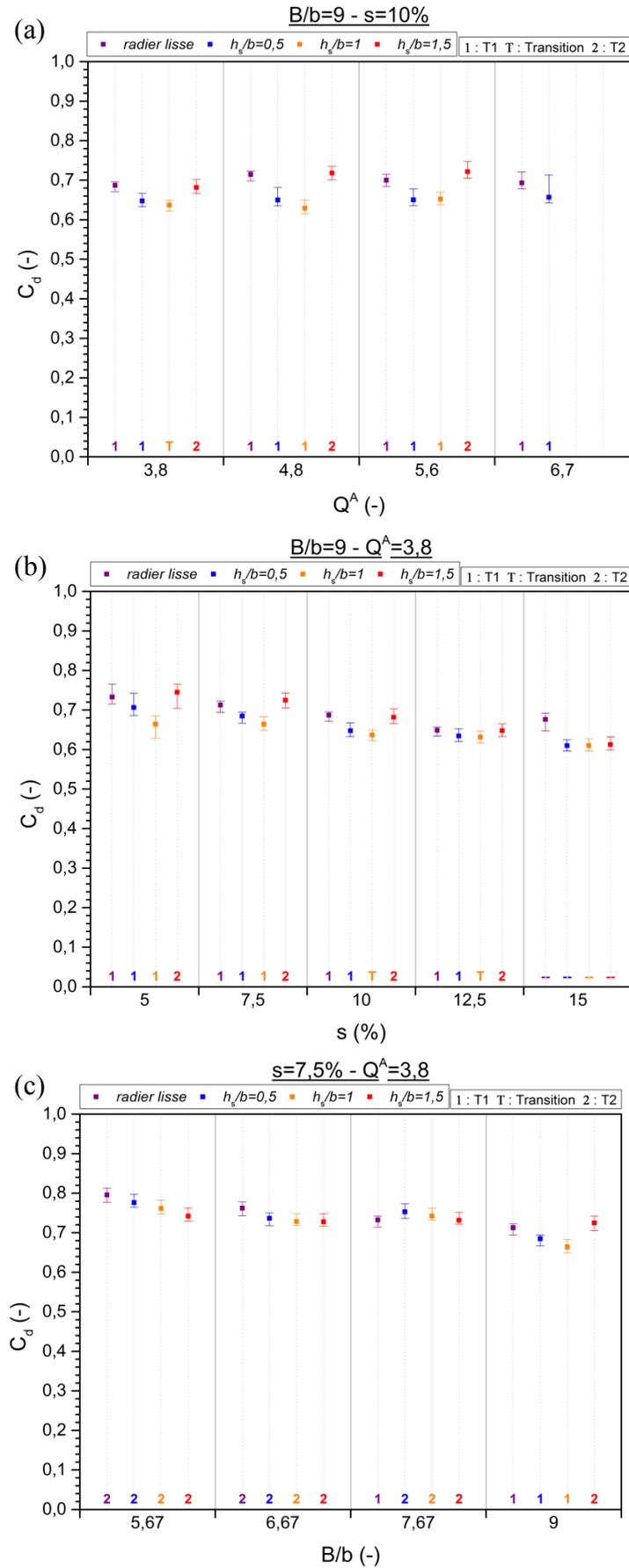


Figure IV-3. Evolution du coefficient de débit pour les différentes hauteurs de seuils en fonction : (a) du débit, (b) de la pente et (c) de la largeur de bassin.

Après avoir étudié l'influence de la pente, du débit et de la largeur des bassins sur le coefficient de débit calculé pour chaque hauteur de seuil, il convient de quantifier l'influence de la hauteur des seuils sur le coefficient de débit.

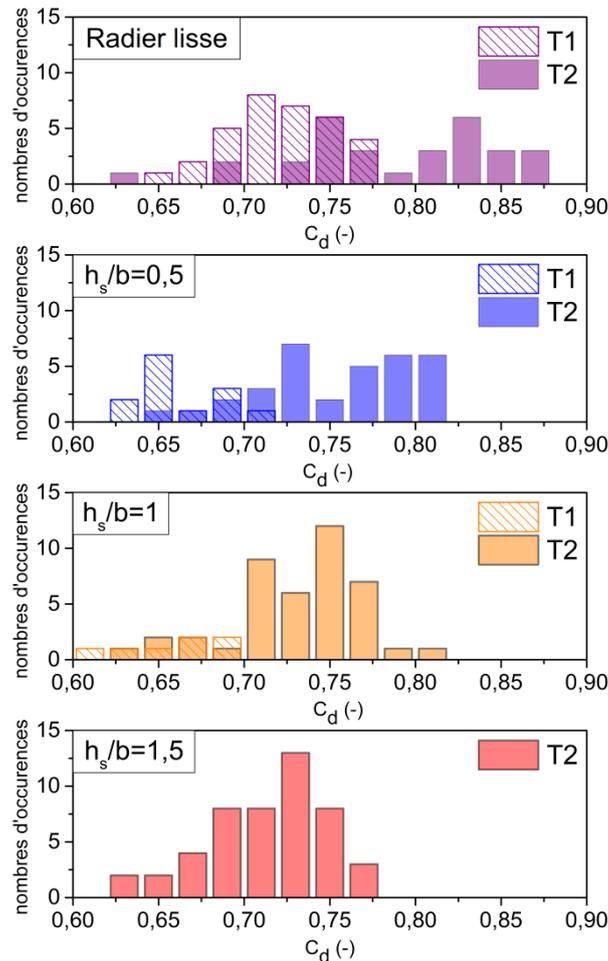


Figure IV-4. Histogrammes du coefficient de débit en fonction de la topologie T1 ou T2 pour les différentes hauteurs de seuils.

À topologie identique, plus la hauteur des seuils est grande, plus le coefficient de débit est faible. Lorsque la topologie est de type 1, le coefficient de débit diminue d'en moyenne 11% \pm 4% avec $k=2$ entre la configuration radier lisse et $h_s/b=1$. Elle est en moyenne légèrement moins importante lorsque la topologie est de type 2 avec $\Delta C_d = -7\% \pm 3,5\%$. En revanche, lorsque la structure de l'écoulement passe d'une topologie de type 1 vers une topologie de type 2, le coefficient de débit tend à augmenter, même si la hauteur des seuils augmente. Ce phénomène est flagrant sur les graphiques *a* et *b* de la figure IV-3 avec une variation moyenne $\Delta C_d = +14\% \pm 5,5\%$ entre $h_s/b=1$ (en type 1) et $h_s/b=2$ (en type 2). Les histogrammes du coefficient de débit de la figure IV-4 mettent en évidence l'influence de la topologie sur le C_d . Toutes configurations confondues, le C_d est globalement plus élevé quand la structure de l'écoulement est de type 2. Finalement, la diminution du C_d due à l'augmentation de la hauteur des seuils peut être compensée par un changement de topologie de type 1 vers type 2. À topologie égale, la variation du coefficient de débit due à la variation de h_s/b n'est pas influencée de manière significative par l'augmentation de la pente, du débit et de la largeur des bassins.

IV.3 Influence de la hauteur des seuils sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement

L'insertion de seuils dans les fentes d'une passe à poissons modifie les caractéristiques hydrauliques de cette dernière. Pour quantifier l'influence de la hauteur des seuils sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement, les vitesses moyennes et les énergies cinétiques turbulentes ont été mesurées avec la sonde ADV dans le bassin 3 de la passe à poissons du laboratoire pour une pente $s=7,5\%$ et un débit $Q^A=4,8$.

IV.3.1 Influence de la hauteur des seuils en petite largeur ($B/b=6,67$)

Dans la configuration $B/b=6,67$, l'étude de la topologie a montré que l'écoulement est de type 2 pour les hauteurs de seuils $h_s/b=0,5$ - 1 et 1,5 et de type transitionnel sans seuil.

En petite largeur ($B/b=6,67$), le changement le plus important s'opère pour tous les profils dès qu'un seuil est inséré dans une fente (passage de $h_s/b=0$ à $h_s/b=0,5$) traduisant le passage de la topologie de type transitionnel à la topologie de type 2. Pour mettre en évidence ce changement, les profils A, B, E et F ont été tracés sur la figure IV-5 pour $h_s/b=0$ et $h_s/b=0,5$.

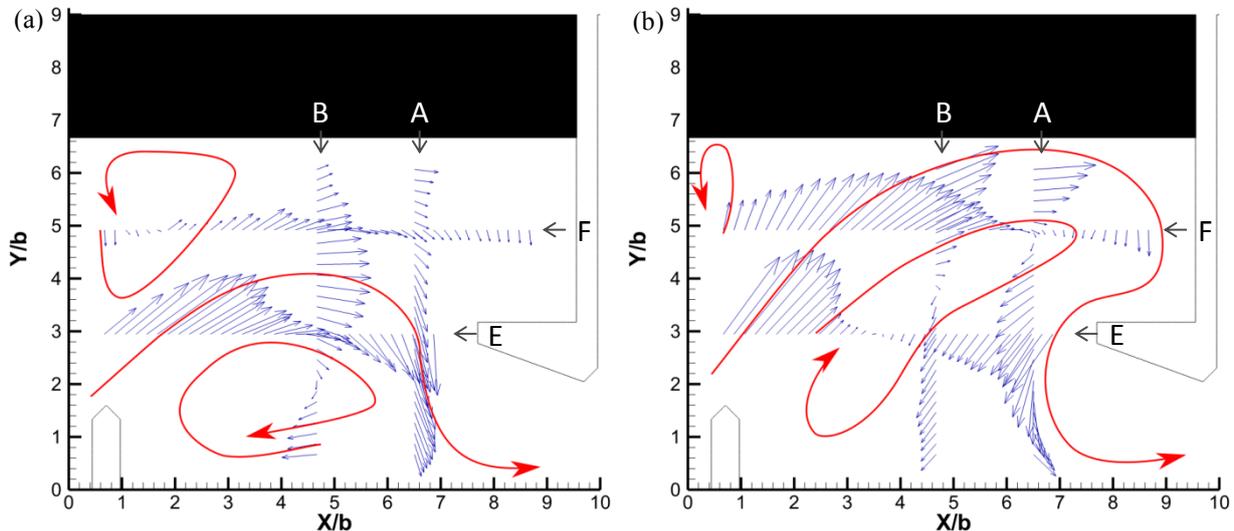


Figure IV-5. Visualisation de la topologie de l'écoulement en 2D à partir des composantes de vitesses U/V_d et V/V_d pour $B/b=6,67$. (a) Profils A, B, E et F configuration *radier lisse* ; (b) Profils A, B, E et F avec seuil $h_s/b=0,5$.

Les profils A et B montrent bien l'influence de l'insertion d'un seuil puisqu'une inversion du sens de l'écoulement se produit entre $h_s/b=0$ et $h_s/b=0,5$. En visualisant également les profils E et F (Figure IV-5 b), cette caractéristique permet de déceler la création d'une zone de recirculation importante de forme *a priori* oblongue pour $h_s/b=0,5$. Dans cette configuration ($B/b=6,67$), dès qu'un seuil est inséré dans les fentes de la passe à poissons, la topologie est de type 2. Les profils de vitesses C et D (Figure IV-6 a et b) permettent de mettre en évidence l'augmentation de la tridimensionnalité de l'écoulement lors de l'insertion d'un seuil. En effet, dans la configuration *radier lisse*, la vitesse longitudinale le long du profil C subit une inversion de sens près du radier ($Z/b=0,7$) puis reste approximativement constante et positive sur le reste de la colonne d'eau. En revanche, en présence de seuils, l'écoulement subit des variations de vitesses significatives. Elle est négative et admet un maximum (en valeur absolue) au milieu de la colonne d'eau.

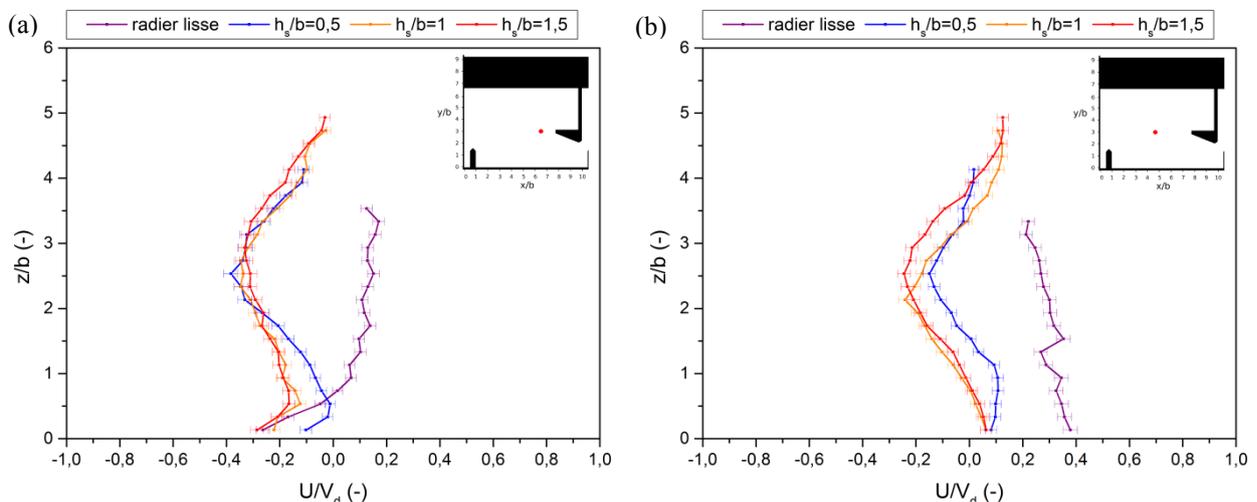


Figure IV-6. Profils verticaux de vitesses moyennes en fonction de la hauteur des seuils. (a) Profil C ; (b) Profil D.

Sur le profil D, sans présence de seuil la vitesse longitudinale est positive sur toute la colonne d'eau et son intensité diminue du radier jusqu'aux abords de la surface libre. En présence de seuils, une première zone de cisaillement se crée à $Z/b=0,5$ pour $h_s/b=0,5$ et $Z/b=1$ pour $h_s/b=1$ et $1,5$. La vitesse longitudinale passe ensuite par un maximum (en valeur absolue) à $Z/b=2,5$ pour toutes les hauteurs de seuils puis une nouvelle zone de cisaillement se crée à $Z/b \approx 3,5$.

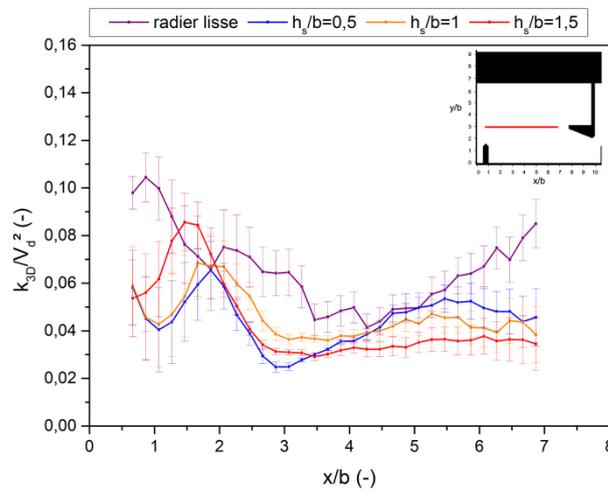


Figure IV-7. Profils d'énergie cinétique turbulente le long du profil E.

Dans cette configuration, le fait d'augmenter la hauteur des seuils a tendance à concentrer l'énergie cinétique turbulente tridimensionnelle du jet vers des X/b plus faibles (Figure IV-7). Pour un radier lisse, l'écoulement est de type transitoire, les fluctuations de vitesses induites par le battement du jet sont donc importantes. Lorsqu'un seuil est inséré dans les fentes, l'écoulement passe en topologie de type 2 pour laquelle l'amplitude du battement du jet est réduite.

IV.3.2 Influence de la hauteur des seuils en grande largeur ($B/b=9$)

Concernant la plus grande largeur ($B/b=9$), le changement le plus important s'opère pour tous les profils lors du passage $h_s/b=1$ à $h_s/b=1,5$ traduisant le passage de la topologie de type 1 à la topologie de type 2. Pour mettre en évidence ce changement, les profils A, B, E et F ont été tracés sur la figure IV-8 pour $h_s/b=1$ et $h_s/b=1,5$.

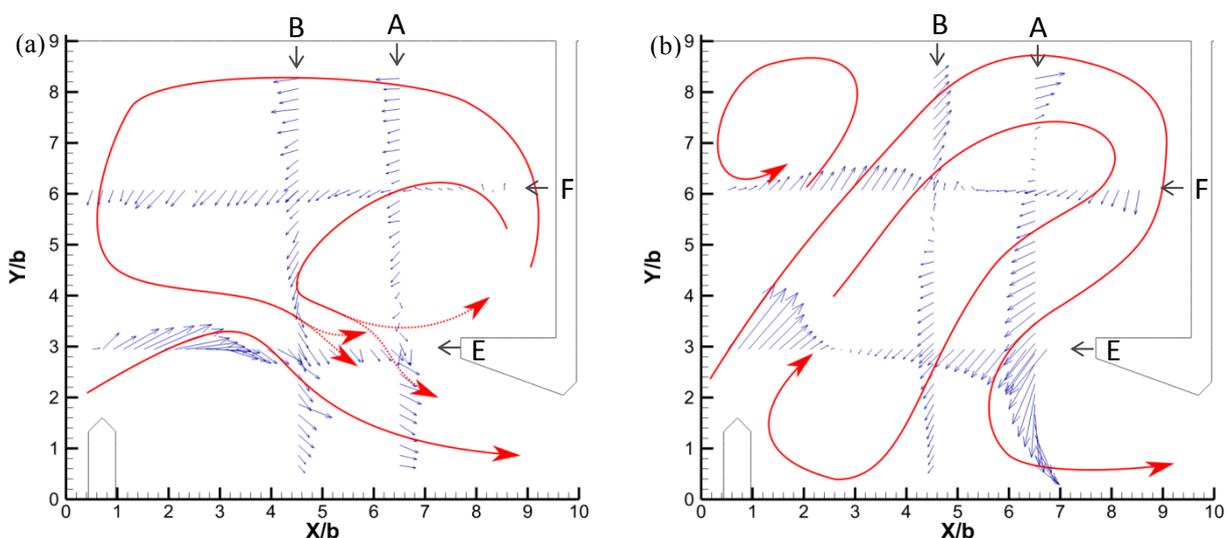


Figure IV-8. Visualisation de la topologie de l'écoulement en 2D pour la plus grande largeur de bassin ($B/b=9$), à partir des composantes de vitesses U/V_d et V/V_d des profils A, B, E et F. (a) Configuration $h_s/b=1$; (b) Configuration $h_s/b=1,5$.

Sur les profils A, B, E et F, il est à noter une évolution de la composante longitudinale de la vitesse en fonction de la hauteur des seuils. En effet, les courbes mettent en évidence une transition progressive de cette composante de vitesse de $h_s/b=0$ à $h_s/b=1,5$.

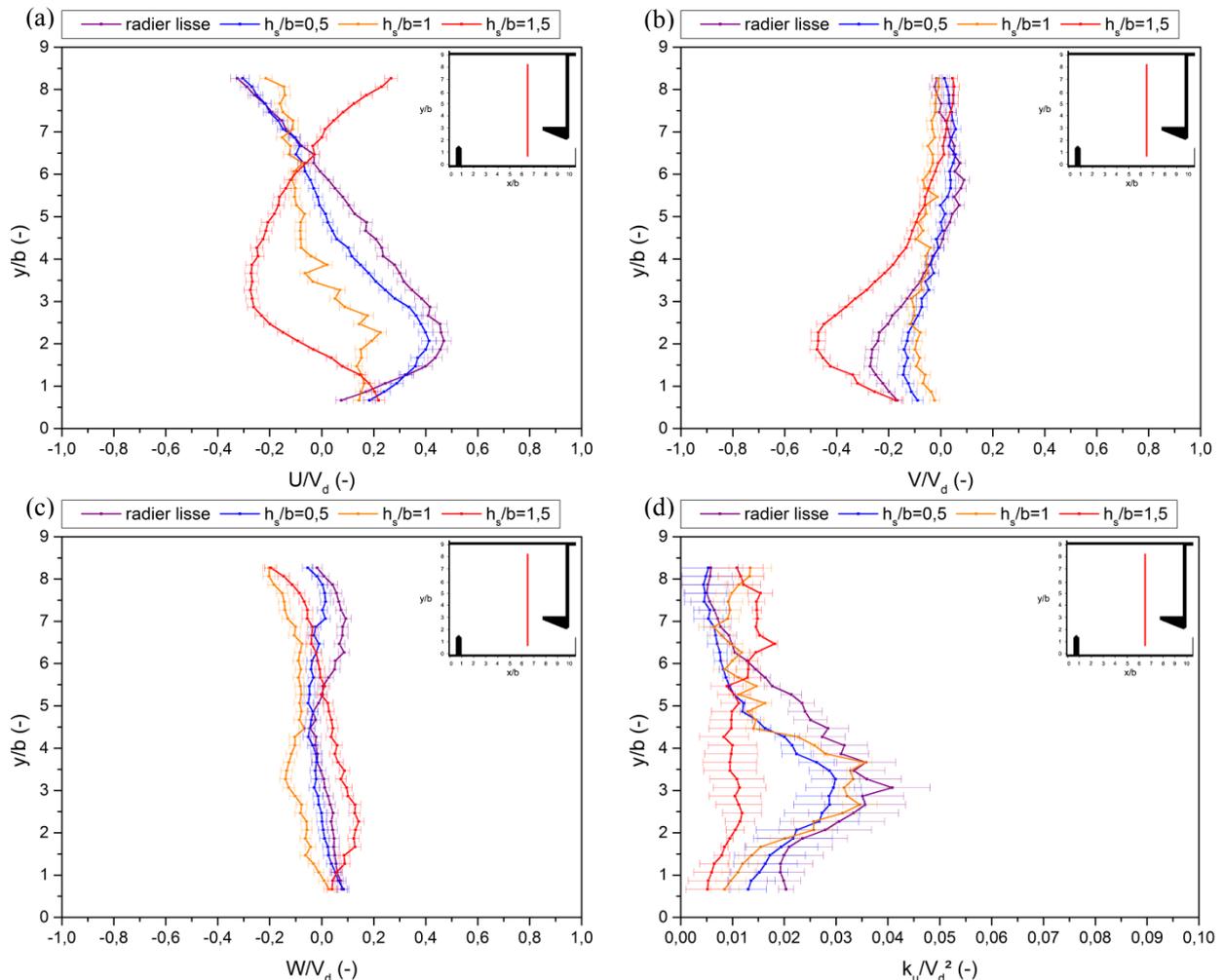


Figure IV-9. Courbes de vitesse moyenne et d'énergie cinétique turbulente le long du profil A en configuration $B/b=9$ pour les différentes hauteurs de seuils. a) U/V_d ; b) V/V_d , c) W/V_d , d) k_u/V_d^2 .

Pour le profil A (Figure IV-9), la composante longitudinale est maximale et positive à $Y/b=2$ pour $h_s/b=0$ à 1 avec une diminution progressive d'intensité. Elle est par ailleurs négative près de la paroi, mettant en évidence la présence d'une zone de recirculation (type 1). Pour $h_s/b=1,5$, elle est maximale et négative à $Y/b=3$ et positive près de la paroi opposée à la fente indiquant le passage du jet (type 2). La composante transversale est amplifiée à $Y/b=2$ pour $h_s/b=1,5$ par rapport aux autres hauteurs de seuils, en raison du jet qui vient de la zone située derrière le déflecteur ($Y/b>3$). Il existe des variations d'intensité au niveau de la composante verticale de vitesse. En configuration radier lisse, cette dernière est proche de zéro jusqu'à $Y/b=5$. Elle devient positive pour $Y/b>5$, correspondant à la zone où U/V_d est négative (écoulement de retour dans le tourbillon supérieur). Pour les hauteurs de seuils $h_s/b=1$ et $h_s/b=1,5$, la tridimensionnalité de l'écoulement au niveau du profil A est plus importante. La vitesse W/V_d est négative sur tout le profil pour $h_s/b=1$. En revanche elle est positive pour $h_s/b=1,5$ jusqu'à $Y/b=5$ puis négative pour $Y/b>5$, indiquant le passage du jet. La composante longitudinale de l'énergie cinétique turbulente est équivalente pour les configurations radier lisse, $h_s/b=0,5$ et 1 avec des profils de formes semblables. Il existe une zone de forte fluctuation entre $Y/b=2$ et $Y/b=4$, correspondant à la zone où une partie du jet vient impacter le plus grand déflecteur (écoulement de type 1). Cette zone n'existe pas pour $h_s/b=1,5$ et la fluctuation de la composante longitudinale le long du profil reste faible.

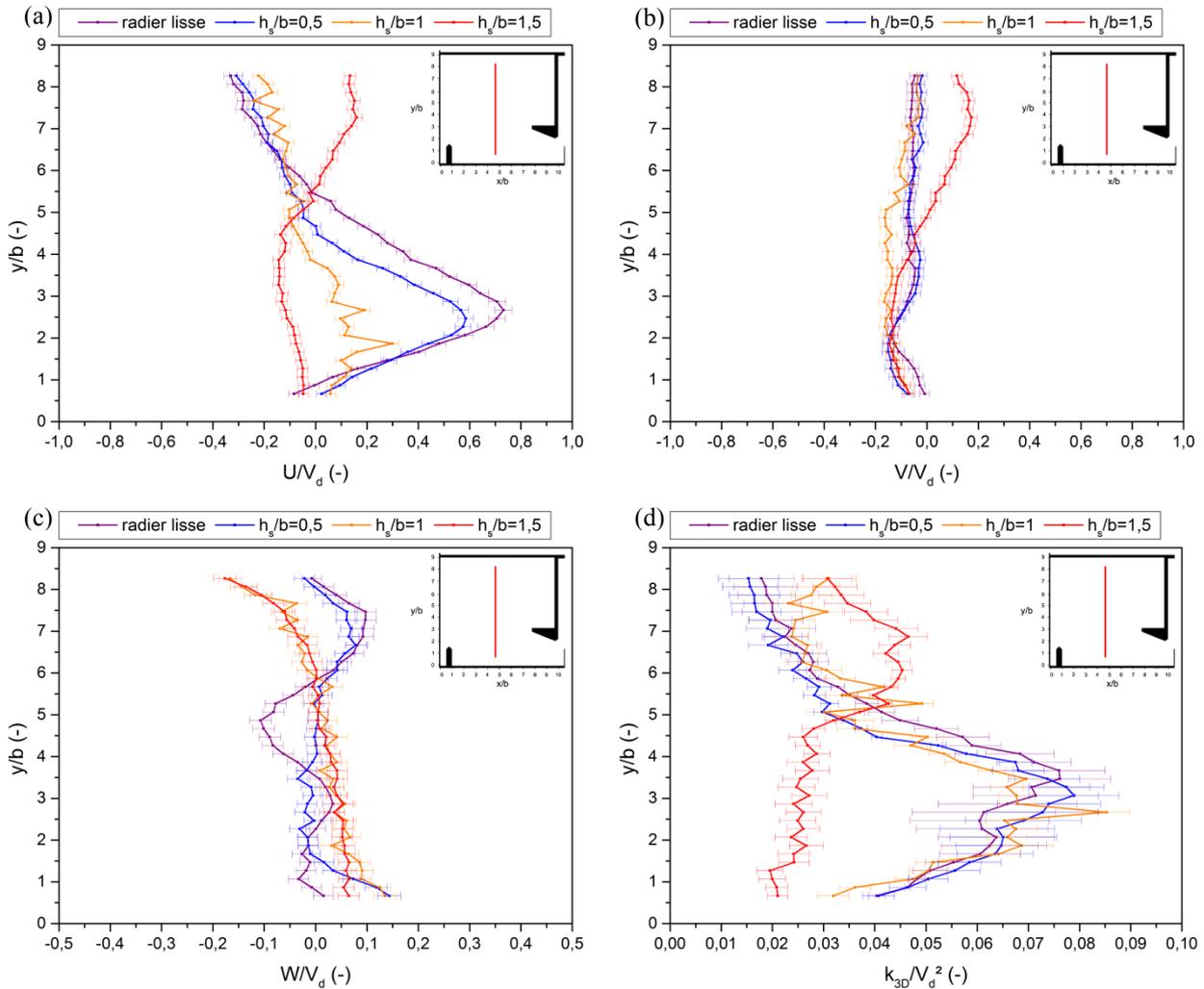


Figure IV-10. Courbes de vitesse moyenne et d'énergie cinétique turbulente le long du profil B en configuration $B/b=9$ pour les différentes hauteurs de seuils. a) U/V_d ; b) V/V_d , c) W/V_d , d) k_{3D}/V_d^2 .

En ce qui concerne le profil B (Figure IV-10), les courbes de vitesses moyennes longitudinales mettent en évidence le passage du jet avec une vitesse maximale en $Y/b=2,5$. Cette vitesse diminue en fonction de la hauteur des seuils, jusqu'à devenir négative pour $h_s/b=1,5$. La position des vitesses longitudinales maximales des profils B et A varie respectivement de $Y/b=2,5$ à $Y/b=2$, mettant en évidence la courbure du jet. L'analyse conjointe de la composante verticale W/V_d et de U/V_d dans la configuration *radier lisse* met en évidence que la zone de recirculation principale est animée d'une vitesse W/V_d négative quand U/V_d est positive. L'écoulement de retour de cette zone de recirculation est quant à lui animé d'une vitesse verticale positive. En revanche, les courbes de vitesses verticales mesurées pour $h_s/b=1$ et $1,5$ sont très différentes de celles mesurées dans la configuration *radier lisse*. W/V_d est positive jusqu'à $Y/b=5$ puis négative ensuite. Concernant l'énergie cinétique turbulente, elle augmente à partir de $Y/b=5$ pour $h_s/b=1,5$, indiquant le passage du jet. Le battement du jet dans le cas de l'écoulement de type 1 ($h_s/b=0$ à 1) se retrouve également sur la composante tridimensionnelle de l'énergie cinétique turbulente jusqu'à $Y/b=4$.

Les profils verticaux de vitesses longitudinales C et D (Figure IV-11) laissent apparaître des différences importantes entre les différentes hauteurs de seuils. Pour ces deux profils, la vitesse longitudinale est positive et globalement plus importante sur toute la colonne d'eau pour $h_s/b=0$ puis diminue progressivement lorsque la hauteur des seuils augmente jusqu'à devenir complètement négative pour $h_s/b=1,5$. Il est à noter qu'il existe une zone de cisaillement sur le profil C pour $h_s/b=0,5$ et 1 à respectivement $Z/b=0,6$ et 2. L'inversion du sens de U/V_d se produit également sur le profil D pour $h_s/b=1$ à $Z/b=1,5$. Concernant l'énergie cinétique turbulente sur

les profils C et D, la composante longitudinale est fortement diminuée lors du passage de $h_s/b=1$ à $h_s/b=1,5$ (changement de topologie).

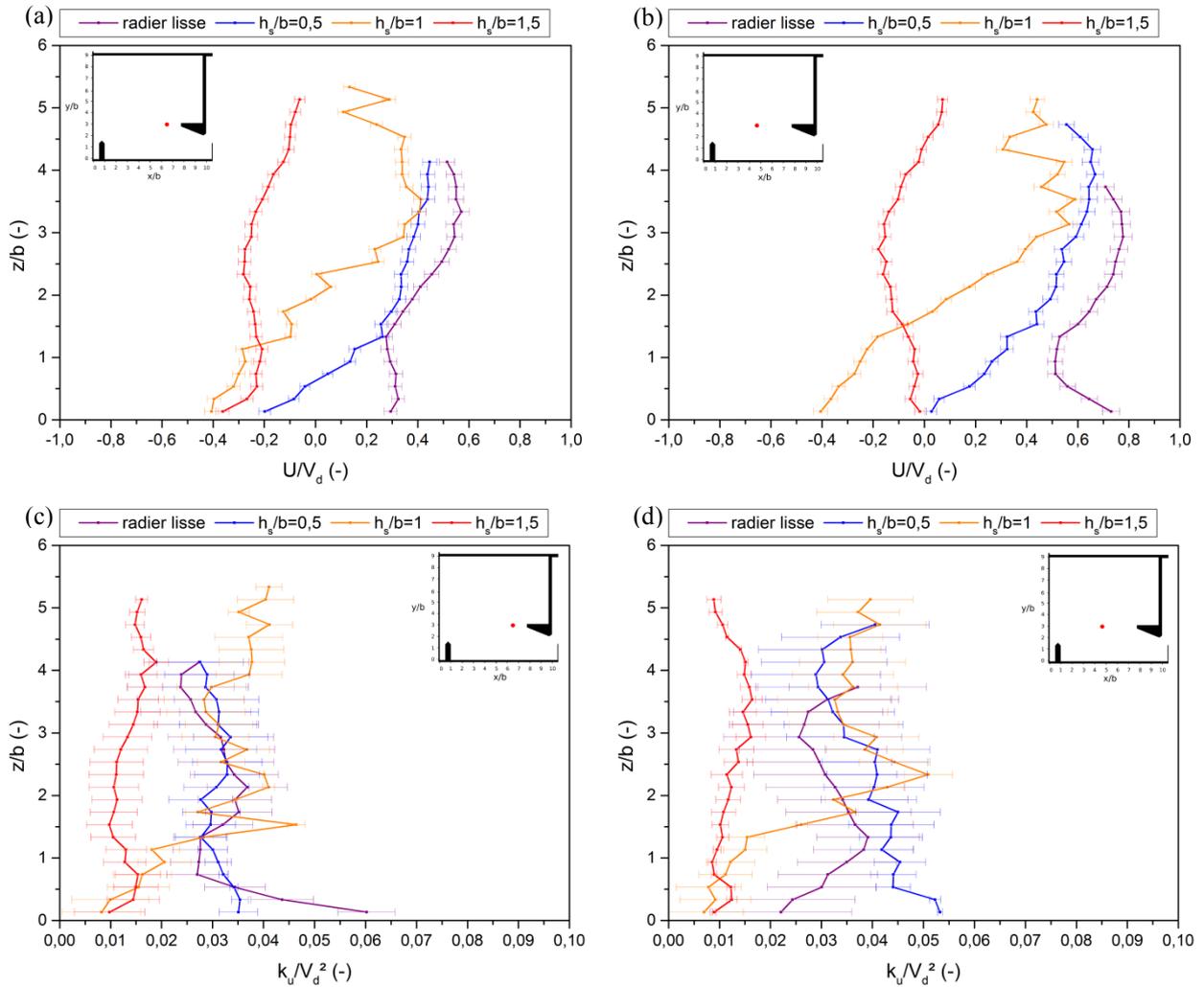


Figure IV-11. Courbes de vitesse moyenne le long des profils C et D en configuration $B/b=9$ pour les différentes hauteurs de seuils. a) U/V_d profil C; b) U/V_d profil D c) k_u/V_d^2 profil C, d) k_u/V_d^2 profil D.

Le profil D' (Figure IV-12) met en évidence une zone de cisaillement en $Z/b=3$ pour les hauteurs de seuils $h_s/b=0$ à 1 avec le changement de signe de la vitesse longitudinale.

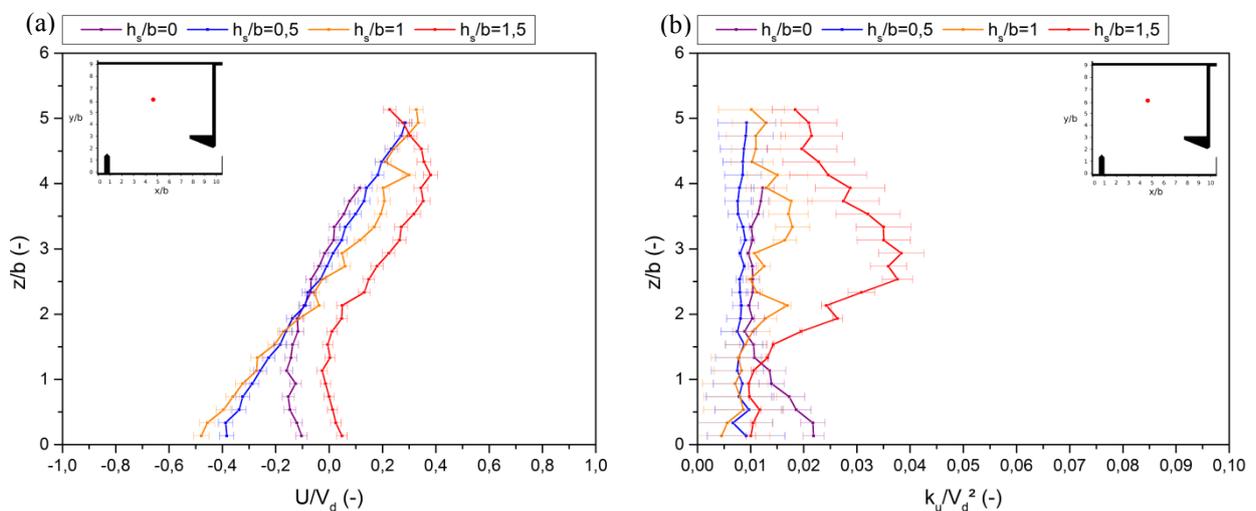


Figure IV-12. Courbes de vitesse moyenne et d'énergie cinétique turbulente le long du profil D' en configuration $B/b=9$ pour les différentes hauteurs de seuils. a) U/V_d ; b) k_u/V_d^2 .

Cela indique que l'axe du tourbillon (zone de recirculation) est incliné par rapport à l'axe Z et que son centre de rotation se situe environ à $Z/b=3$. Les fluctuations de vitesses longitudinales sont plus importantes pour $h_s/b=1,5$ notamment en $Z/b=3$ soit environ à mi-hauteur d'eau.

IV.4 Analyse de l'écoulement avec un seuil de hauteur $h_s/b=1$

L'analyse des profils de vitesses expérimentaux a révélé que l'écoulement était fortement perturbé par la présence d'un seuil et notamment à partir d'une hauteur $h_s/b=1$. La tridimensionnalité de l'écoulement s'en retrouve alors accentuée. La simulation numérique constitue alors un bon moyen pour analyser les grandeurs cinématiques tridimensionnelles. L'étude numérique qui suit a été réalisée pour deux largeurs de bassin ($B/b=6,67$ et 9), avec un seuil d'une hauteur $h_s/b=1$, une pente $s=7,5\%$ et un débit $Q^4=4,8$.

IV.4.1 Validation des modèles numériques

La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux effectuée au paragraphe III.2.3 a mis en évidence que la méthode LES était plus adaptée pour simuler l'écoulement dans la passe à poissons en configuration *radier lisse* que la méthode URANS. La même analyse est menée dans la configuration de passe à poissons munies de seuils d'une hauteur $h_s/b=1$.

Les profils de vitesses et d'énergie cinétique turbulente, obtenus expérimentalement (ADV) et par les simulations (URANS et LES) pour une largeur de bassin $B/b=9$, ont été tracés sur la figure IV-13.

Dans la configuration grande largeur $B/b=9$ avec un seuil d'une hauteur $h_s/b=1$, la topologie mesurée est de type 1. Cependant cette topologie n'est pas clairement perceptible sur les profils de vitesses expérimentaux. La topologie transitoire étant atteinte entre $B/b=9$ et $B/b=8,6$, l'écoulement mesuré doit tendre vers la topologie transitoire.

Les simulations URANS et LES donnent des résultats totalement différents au regard des vitesses moyennes obtenues sur les profils B, E et D (Figure IV-13 a, c et e). La simulation LES prédit une topologie de type 1, avec un jet qui passe en $Y/b=3$ (Figure IV-13 a) et dont la trajectoire suit le profil E (Figure IV-13 e). En revanche, la simulation URANS modélise une topologie transitoire, entre type 1 et type 2, qui ressemble davantage à celle mesurée expérimentalement. En URANS, le passage du jet est moins marqué sur le profil B (Figure IV-13 a). L'écart-type relatif moyen entre les profils expérimentaux de vitesses moyennes B, D et E et ceux de l'URANS sont respectivement de $\sigma_m=33\%$, 21% et 36% contre de $\sigma_m=90\%$, 48% et 85% en LES. Les corrélations sont également meilleures pour la simulation URANS avec $r^2=0,56$ et $0,72$ pour $\frac{\|V\|_{3D}}{v_d}$ des profils D et E contre $r^2=0,22$ et $0,27$ pour la LES. Les corrélations sur les vitesses sont peu significatives pour le profil B.

Les énergies cinétiques turbulentes $\frac{k_{3D}}{v_d^2}$ sont mieux estimées par la méthode LES avec des écarts plus faibles par rapport aux profils expérimentaux (Figure IV-13 b, d et f). Cependant, même si les écarts sont plus importants, les profils calculés en URANS donnent une répartition correcte de $\frac{k_{3D}}{v_d^2}$ ($r^2=0,73$ pour le profil B, $0,78$ pour le profil D et $0,49$ pour le profil E).

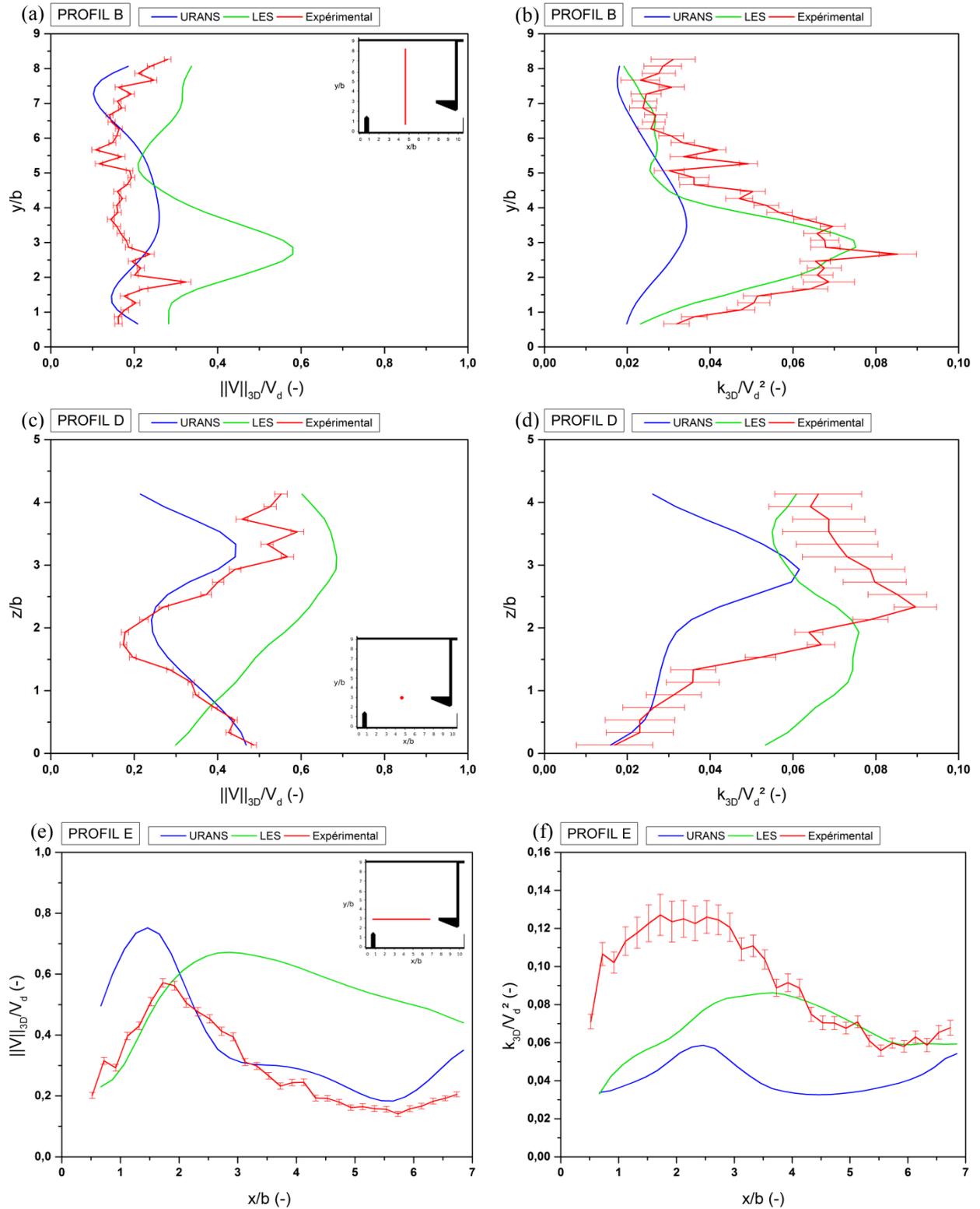


Figure IV-13. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=9$ avec $h_s/b=1$. (a), (c) et (e) : norme de la vitesse 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E ; (b), (d) et (f) : énergie cinétique 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E.

Les écarts-types relatifs moyens σ_m et les coefficients de corrélations r^2 sont donnés dans le tableau 12.

L'analyse des résultats obtenus sur les profils B, D et E permet de conclure que la simulation URANS représente fidèlement l'écoulement qui s'établit dans la passe à poissons en grande largeur ($B/b=9$). En revanche, globalement, la simulation LES, s'avère moins efficace dans cette situation.

		Profil B		Profil D		Profil E	
		σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)
$\frac{\ V\ _{3D}}{V_d}$	URANS	33,5	-0,22	20,7	0,56	36,2	0,72
	LES	90,3	0,35	49	0,22	85,0	0,27
$\frac{k_{3D}}{V_d^2}$	URANS	43,0	0,73	36,5	0,78	54,3	0,49
	LES	17,6	0,92	38,2	0,0	27,9	0,26

Tableau 12 : Ecarts-type relatifs moyens et coefficients de corrélations calculés entre les profils de vitesses et d'énergies cinétiques turbulentes issus des simulations numériques et ceux issus des mesures expérimentales.
Configuration : $h_s/b=1$ et $B/b=9$.

Pour la plus petite largeur ($B/b=6,67$), l'écoulement est de type 2. Le passage du jet est visible sur le profil B pour $Y/b > 5$ et sur le profil E pour X/b compris entre 0,5 et 2 (Figure IV-14 a et e). La topologie est correctement représentée par les deux méthodes URANS et LES. Les vitesses moyennes en simulation URANS sont plus proches de celles mesurées expérimentalement avec des écarts-types relatifs moyens plus faibles qu'en LES (sur les profils B, D et E). En revanche, l'énergie cinétique turbulente est mieux modélisée en simulation LES, même si les formes des profils obtenus en URANS sont proches de celles obtenues expérimentalement.

		Profil B		Profil D		Profil E	
		σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)
$\frac{\ V\ _{3D}}{V_d}$	URANS	32,5	0,89	27,7	0,70	11,4	0,96
	LES	62,1	0,93	69,7	0,61	15,0	0,98
$\frac{k_{3D}}{V_d^2}$	URANS	29,4	0,51	44,2	0,64	44,5	0,0
	LES	15,7	0,89	12,0	0,83	36,9	0,86

Tableau 13 : Ecarts-types relatifs moyens et coefficients de corrélations calculés entre les profils de vitesses et d'énergies cinétiques turbulentes issus des simulations numériques et ceux issus des mesures expérimentales.
Configuration : $h_s/b=1$ et $B/b=6,67$.

Le tableau 13 récapitule les écarts-type relatifs moyens σ_m et les coefficients de corrélations r^2 obtenus entre les résultats fournis par les simulations (URANS et LES) et les résultats expérimentaux.

Les résultats contenus dans le tableau 13 permettent, sur la base de l'analyse des profils de vitesses et d'énergie cinétique turbulente B, D et E de conclure que la simulation LES est plus adaptée que la simulation URANS pour modéliser l'écoulement dans une passe à poissons munie d'un seuil $h_s/b=1$ en petite largeur ($B/b=6,67$).

Pour conclure sur cette validation numérique, la simulation URANS sera utilisée pour étudier l'écoulement en configuration grande largeur ($B/b=9$) et la simulation LES pour la petite largeur ($B/b=6,67$).

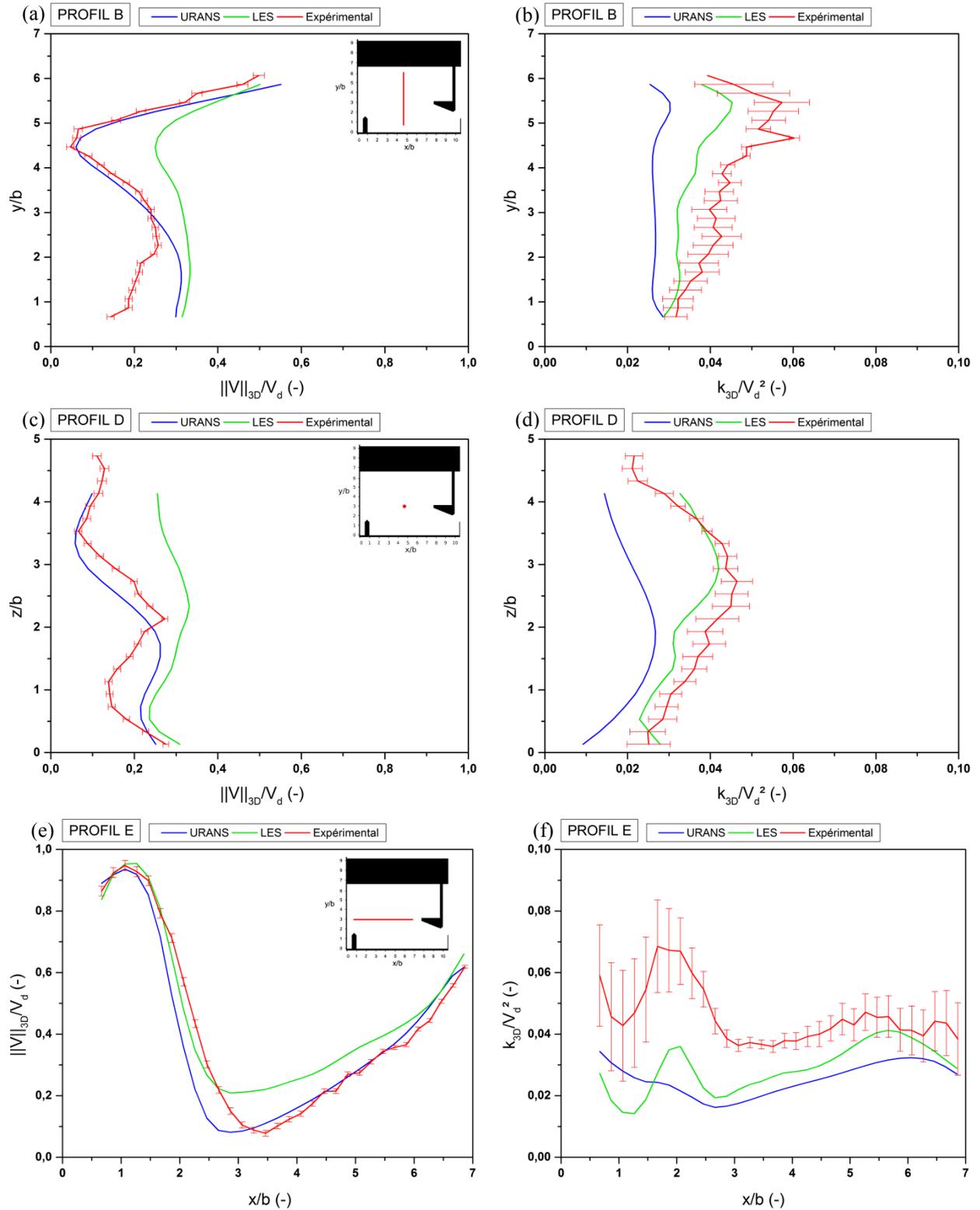


Figure IV-14. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=6,67$ avec $h_s/b=1$. (a), (c) et (e) : norme de la vitesse 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E ; (b), (d) et (f) : énergie cinétique 3D adimensionnée respectivement pour les profils B, D et E.

IV.4.2 Etude de l'écoulement

Dans cette partie, les simulations numériques ont été utilisées pour analyser l'influence de l'ajout d'un seuil sur l'écoulement dans la passe à poissons en configuration grande largeur ($B/b=9$) et petite largeur ($B/b=6,67$). Des plans parallèles au radier ont été réalisés ainsi que des plans perpendiculaires passant par les milieux des fentes en amont des bassins 2 et 3. Le plan passant par la fente est défini par le système de coordonnées $\{X_f/b, Z_f/b\}$, ayant pour origine le

centre de la fente amont du bassin 3, avec X_f/b dans la direction longitudinale du plan et Z_f/b perpendiculaire au radier.

IV.4.2.a Influence des seuils sur l'écoulement en grande largeur ($B/b=9$)

En grande largeur, l'écoulement est de type 1 en présence d'un seuil $h_s/b=1$ ainsi qu'en configuration *radier lisse*.

Dans la configuration *radier lisse*, la structure de l'écoulement moyen est similaire dans chacun des bassins (Figure IV-15). Le jet sortant de la fente amont rejoint la fente aval en suivant une trajectoire courbe. Il crée deux zones de recirculation contrarotatives dont les formes et les positions varient très peu d'un bassin à l'autre. La topologie observée sur les différents plans altitudinaux confirme le caractère essentiellement bidimensionnel de l'écoulement (Wu *et al.*, 1999 ; Puertas *et al.*, 2004 ; Tarrade, 2007).

Les variations sur les champs de vitesses sont très faibles entre $Z/b=0,5$ et $Z/b=2$. Cependant, il est à noter un léger élargissement du jet sur le plan $Z/b=4$ mais la topologie de l'écoulement ne s'en trouve pas affectée. Les vues en coupe à travers les fentes révèlent que, le long de la colonne d'eau, la répartition de la vitesse de l'écoulement rentrant dans chacun des bassins est identique. À partir de ces plans, des différences de courbures du jet sont perceptibles. Le jet est davantage dirigé vers la paroi opposée à la fente (le long du plan de coupe) au niveau de la surface libre ($4 \leq Z_f/b \leq 4,5$) et au niveau du radier ($0 \leq Z_f/b \leq 0,6$). Le champ moyen de vitesse est uniforme sur la partie centrale de l'écoulement ($0,6 \leq Z_f/b \leq 4$), aussi bien dans le jet ($X_f/b \leq 0,5$) que dans la zone de recirculation supérieure ($X_f/b > 0,5$).

Contrairement à la configuration précédente, dans la configuration avec un seuil $h_s/b=1$, le champ moyen de vitesse n'est pas identique dans tous les bassins (Figure IV-16). Il existe cependant des similitudes fortes entre la structure de l'écoulement généré dans les bassins 1 et 3 ainsi que dans les bassins 2 et 4. Cette caractéristique est présente sur les 3 plans altitudinaux. Dans les bassins 1 et 3 à $Z/b=0,5$ (Figure IV-16), les lignes de courant et le champ moyen de vitesse montrent que la présence du seuil génère un écoulement de retour, provenant d'une zone située au-dessus du plan et animé d'une vitesse conséquente le long de la diagonale des bassins. À $Z/b=4$, le jet est dirigé suivant cette même diagonale puis contourne le déflecteur central avant de sortir par la fente aval. Il génère ainsi une zone de recirculation sur sa gauche. À $Z/b=2$, le jet sort du plan de bas en haut vers $X/b=1,5$ puis retransverse le plan de haut en bas dans l'angle du bassin opposé à la fente à partir de $X/b=7$. Il se divise alors en deux. Une partie de l'écoulement est orienté dans le sens des X/b décroissants et longe la paroi opposée à la fente tandis que l'autre est dirigée transversalement vers le grand déflecteur.

La figure IV-17 montre la trajectoire moyenne du jet dans chacun des bassins. Dans les bassins impairs, le jet apparaît comme étant fortement tridimensionnel en plongeant vers le fond dans la diagonale des bassins, au-dessus de la recirculation créée derrière le seuil. Il revient ensuite par le fond vers la paroi latérale des bassins située du côté de la fente, puis se dirige vers le haut avant de plonger à travers la fente suivante.

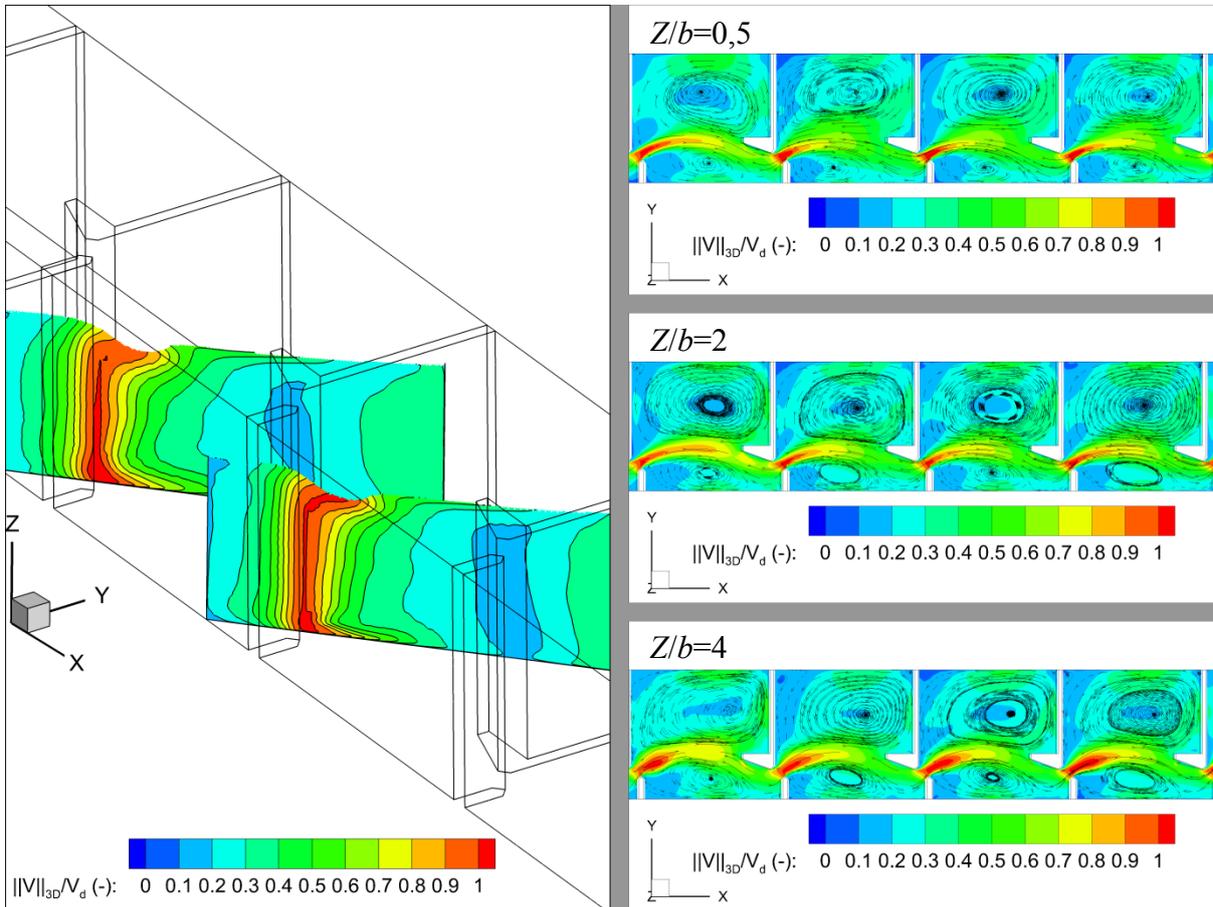


Figure IV-15. Champs de vitesse moyens en configuration *radier lisse* pour $B/b=9$. À gauche : plans de coupe dans les fentes 2 et 3 ; à droite : plans de coupe horizontaux à $Z/b=0,5$; 2 et 4.

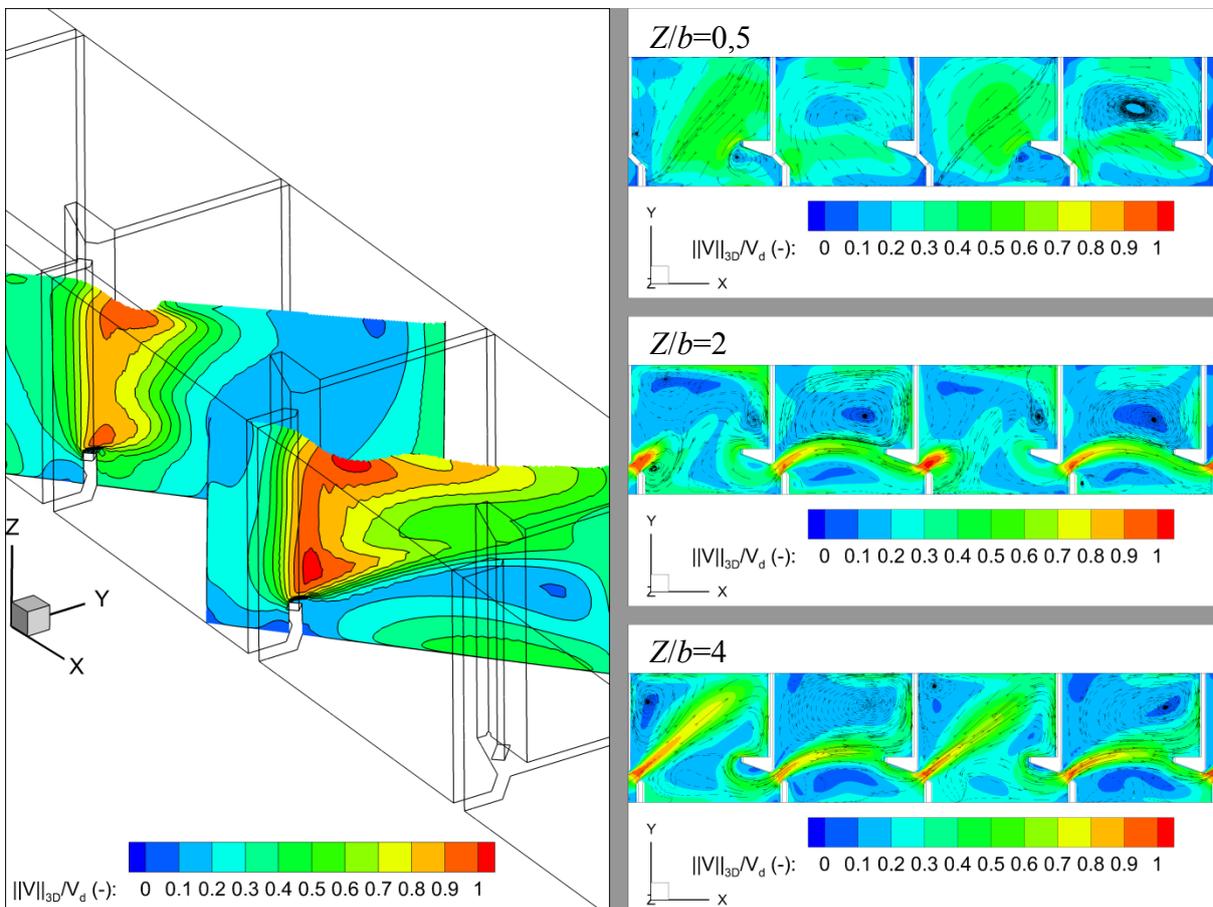


Figure IV-16. Champs de vitesse moyens en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour $B/b=9$. À gauche : plans de coupe dans les fentes 2 et 3 ; à droite : plans de coupe horizontaux à $Z/b=0,5$; 2 et 4.

La condition d'écoulement à l'entrée des bassins pairs est donc particulière, notamment en raison du fait que le jet est orienté vers le bas, ce qui réduit la taille de la zone de recirculation derrière le seuil permettant ainsi la génération d'un écoulement de type 1. Dans ces bassins (2 et 4), la tridimensionnalité du jet est réduite et le profil de vitesse dans les fentes avales est quasi-horizontale, générant ainsi les conditions adéquates à la formation de la grande zone de recirculation derrière le seuil, décrites par Rajaratnam *et al.* (1969), dans les bassins impairs.

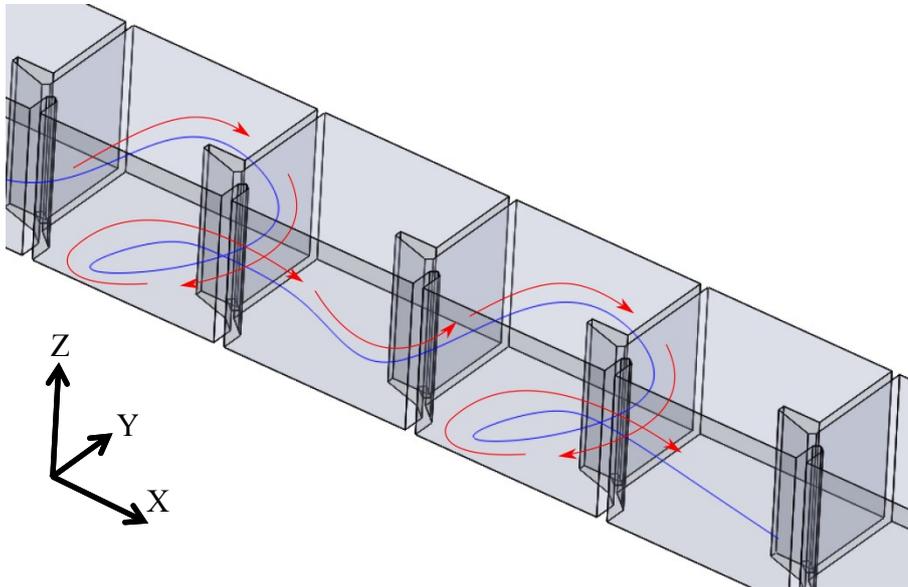


Figure IV-17. Trajectoire moyenne du jet traversant chacun des bassins dans la configuration $h_s/b=1$ pour $B/b=9$.

Les champs de vitesse de l'écoulement qui traverse les fentes des bassins 2 et 3 sont significativement différents de ceux obtenus dans la configuration *radier lisse*. La présence du seuil génère un décollement de l'écoulement, clairement visible dans la fente 3 où le jet est orienté à 45° , suivant le plan de coupe (Figure IV-18). Ce décollement, associé au confinement dû à la surface libre et à la présence de la paroi opposée à la fente, induit une réduction de vitesse importante derrière le seuil.

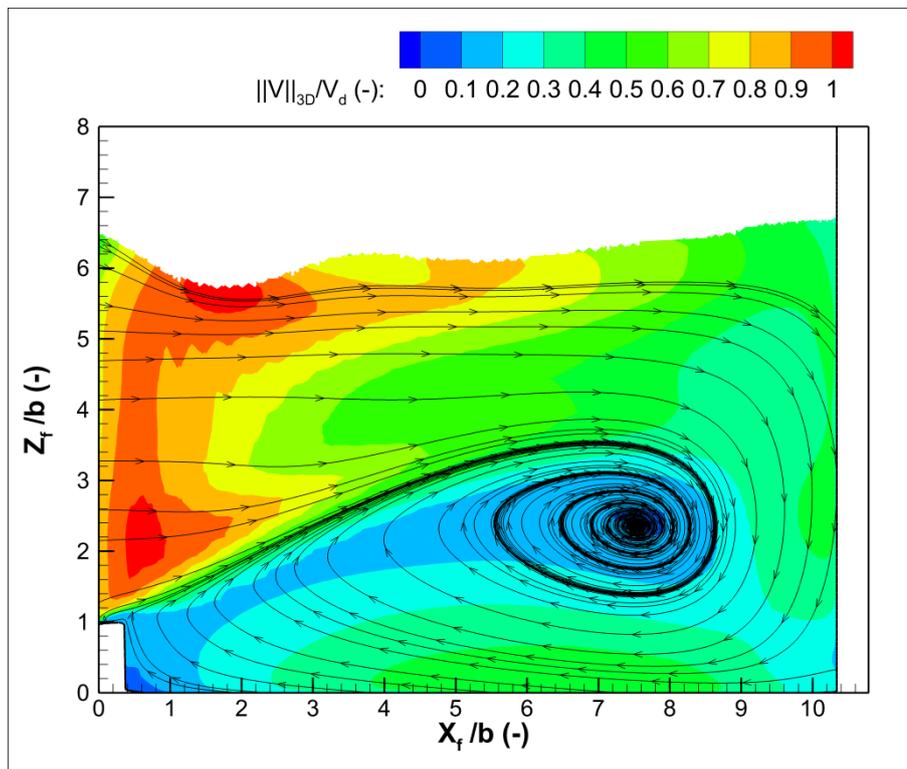


Figure IV-18. Champs de vitesse moyens et lignes de courant sur le plan orienté à 45° et passant par le milieu de la fente amont du bassin 3 en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour $B/b=9$.

Le cisaillement généré crée un tourbillon d'axe horizontal, mis en évidence par les lignes de courants sur la figure IV-18, dont le centre est situé en $X_f/b=7,6$ et $Z_f/b=2,4$. En configuration *radier lisse*, les lignes de courant du champ moyen sont parfaitement parallèles.

IV.4.2.b Influence des seuils sur l'écoulement en petite largeur ($B/b=6,67$)

En petite largeur, la topologie de l'écoulement est transitoire en configuration radier lisse et de type 2 avec un seuil $h_s/b=1$.

Dans la configuration radier lisse, la structure de l'écoulement est similaire dans les trois derniers bassins (Figure IV-19), avec un jet dirigé tout droit vers la paroi opposée à la fente créant ainsi une grande zone de recirculation sur sa droite et une petite confinée dans le coin gauche des bassins. La différence de courbure du jet rentrant dans les bassins 2 et 3 est visible sur les plans de coupe réalisés dans les fentes avec un jet orienté à 45° à l'entrée du bassin 3 et un peu moins incliné dans le bassin 2. Il est également plus large dans le troisième bassin. Le premier bassin possède une topologie d'écoulement proche du type 1 avec deux grandes zones de recirculation de part et d'autre du jet.

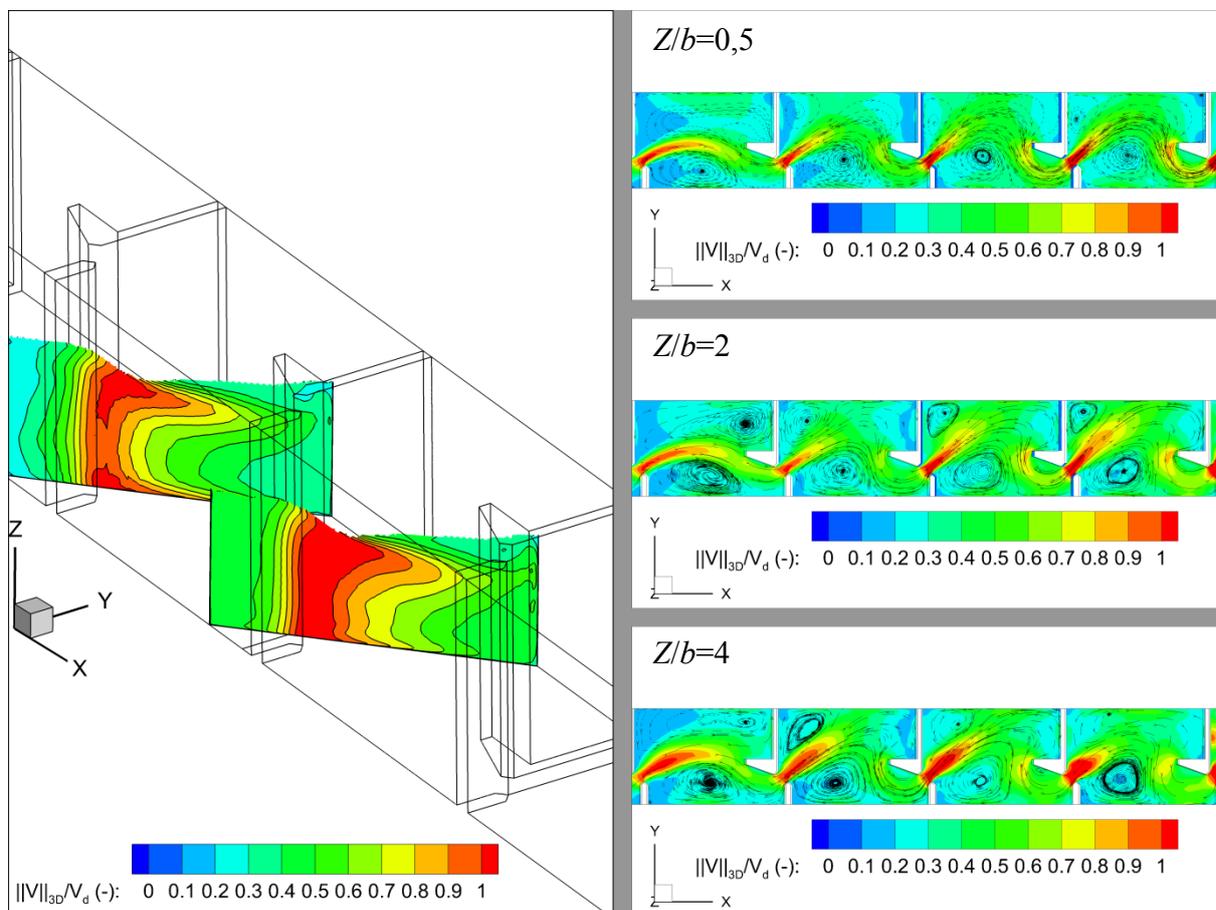


Figure IV-19. Champs de vitesse moyens en configuration *radier lisse* pour $B/b=6,67$. À gauche : plans de coupe dans les fentes 2 et 3 ; à droite : plans de coupe horizontaux à $Z/b=0,5$; 2 et 4.

En présence des seuils, la topologie diffère peu d'un bassin à un autre (Figure IV-20). En revanche, contrairement à la configuration *radier lisse* où seul un élargissement du jet est noté sur le plan $Z/b=3$, elle est dépendante de la position altitudinale d'observation. À $Z/b=0,5$, il existe une zone plutôt calme entre $X/b=0$ et $X/b=5$. L'écoulement issu du jet arrive par le haut près de la paroi opposée à la fente, tourne autour du déflecteur et ressort par la fente aval à la manière du jet dans le cas d'une topologie de type 2. À $Z/b=2$ et 3, les topologies sont similaires mais l'écoulement perd de l'intensité sur le plan le plus haut. Il est à noter que le jet sort de la fente amont avec un angle plus important que dans la configuration *radier lisse*. Il génère ainsi une zone de recirculation plus grande sur la droite du jet, avec une forme oblongue s'étalant sur presque toute la diagonale du bassin en partant du petit déflecteur.

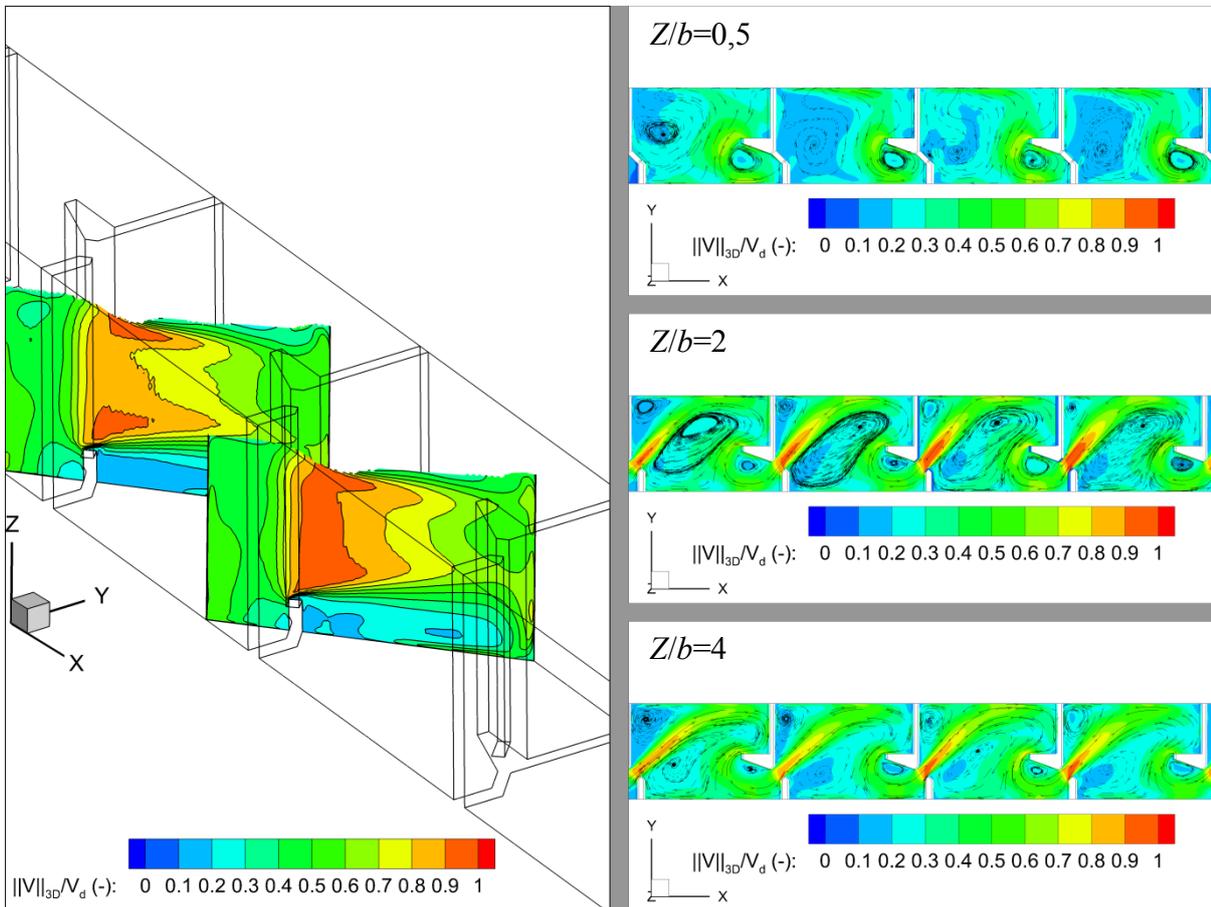


Figure IV-20. Champs de vitesse moyens en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour $B/b=6,67$. À gauche : plans de coupe dans les fentes 2 et 3 ; à droite : plans de coupe horizontaux à $Z/b=0,5$; 2 et 4.

Un élargissement du jet est observable au fur et à mesure que l'écoulement franchit les bassins. Ce phénomène est visible sur la vue en coupe dans les fentes 2 et 3.

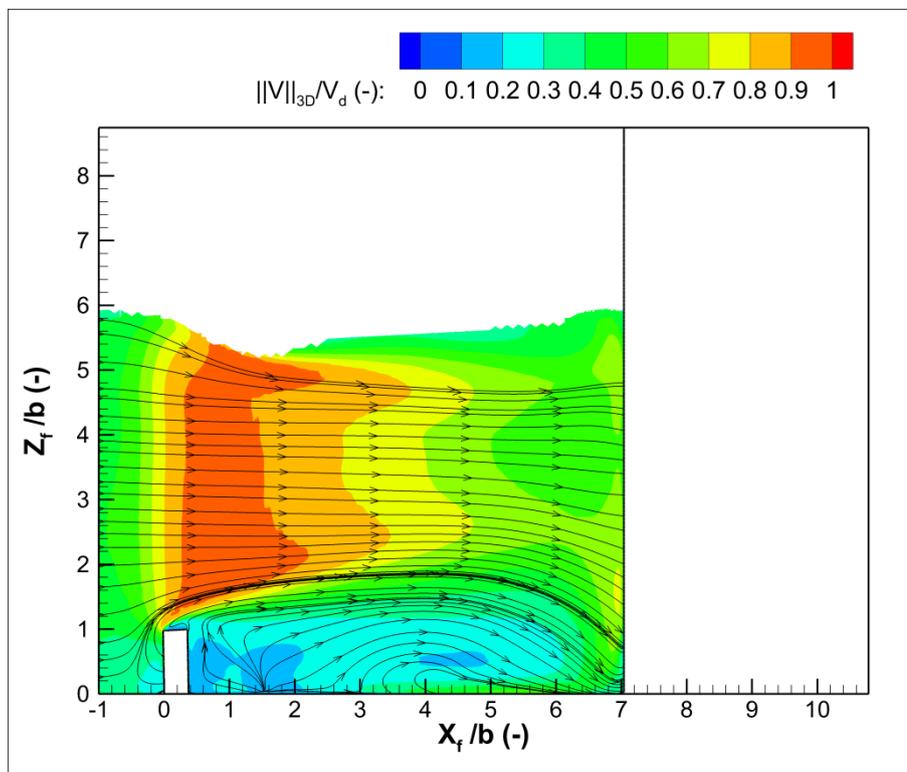


Figure IV-21. Champs de vitesse moyens et lignes de courant sur le plan orienté à 45° et passant par le milieu de la fente amont du bassin 3 en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour $B/b=6,67$.

Derrière le seuil, une large zone se crée où la vitesse est réduite sur une hauteur $Z/b \approx 1$ (Figure IV-21). Les cisaillements générés par la courbure complexe du jet associés aux cisaillements induits par la présence du seuil entraînent la création de deux tourbillons en $Z/b < 1$. Un tourbillon d'axe vertical est créé en $X/b=2,5$ et $Y/b=2$ ainsi qu'un tourbillon d'axe horizontal en $X/b=2,4$.

IV.4.3 Influence de la présence d'un seuil sur les paramètres clés de l'écoulement

Les régions des bassins offrant les conditions les plus favorables aux poissons ont été définies sur la base des critères mentionnés par Lacey *et al.* (2012), qui sont fonction de la répartition spatiale de l'énergie cinétique turbulente, de la vitesse et de la vorticité. Les valeurs seuils de ces grandeurs ont été choisies comme étant égales à leurs valeurs moyennes spatiales calculées dans chacun des bassins et pour chaque configuration (contrairement à Callaud *et al.* (2014) qui prennent les valeurs seuils obtenues en configuration *radier lisse* en référence pour étudier la configuration avec un cylindre). De cette manière, la détermination des zones dans lesquelles ces grandeurs sont supérieures à leurs valeurs seuils permet de représenter les régions les moins favorables pour les poissons.

Les contours de ces régions ont été définis séparément pour les critères de vorticité, d'énergie cinétique turbulente et de vitesse, les régions non colorées étant des zones où ces critères ne sont pas atteints. Les figures IV-22 et IV-23 permettent de comparer la taille et la répartition des régions les plus propices (non colorées) pour les poissons en fonction de la présence ou non d'un seuil, respectivement dans les configurations en grande largeur ($B/b=9$) et en petite largeur ($B/b=6,67$).

En grande largeur (Figure IV-22) et en configuration *radier lisse*, les caractéristiques de l'écoulement sont peu dépendantes du plan altitudinal d'observation. En conséquence, les zones où les valeurs seuils des composantes cinématiques de l'écoulement sont dépassées sont identiques de $Z/b=0,5$ à $Z/b=4$. En revanche, l'introduction d'un seuil modifie la répartition de ces zones. Le taux de surface disponible (en blanc) pour le poisson est du même ordre de grandeur que dans la configuration *radier lisse* ($\approx 40\%$) pour $Z/b=0,5$ et 2. Ce taux est cependant supérieur pour $Z/b=1$ ($\approx 50\%$) et fortement réduit pour $Z/b=4$ ($\approx 18\%$). Sans les seuils, deux grandes régions blanches sont visibles de part et d'autre du jet. La plus grande, située sur la gauche du jet (zone 2), représente 35% de la surface totale du bassin tandis que les zones 1 et 3, plus petites, représentent respectivement environ 5% et 1%. L'intégration sur le volume d'eau moyen de la surface disponible totale à chaque niveau d'eau pour chaque configuration, a été réalisée. Le taux de volume disponible dans la configuration *radier lisse* est de 42% alors qu'il n'atteint que 27,5% dans la configuration munie de seuils.

En petite largeur (Figure IV-23), dans la configuration *radier lisse* le taux de surface disponible est d'environ 40%. Elle se divise en quatre zones distinctes dont les dimensions et les positions varient peu le long de la colonne d'eau. La plus grande zone (zone 1) représente 18% de la surface totale du bassin tandis que les zones 2 et 3 représentent respectivement 8% et 14%. La zone 4 est très petite (0,4% de la surface totale). Dans la configuration avec seuils, la surface disponible est plus importante lorsque $Z/b \leq 1$ (environ 60% pour $Z/b=0,5$ et 54% pour $Z/b=1$), avec l'existence d'une grande région englobant quasiment la moitié du bassin. Pour les plans $Z/b=2$ et 3, le découpage des régions est similaire à la configuration *radier lisse*. En revanche, le taux global de surface disponible chute à près de 25% avec une réduction significative de la taille des zones 2 et 3. Le taux de volume disponible dans la configuration *radier lisse* est de 40% et chute à 30% dans la configuration munie de seuils.

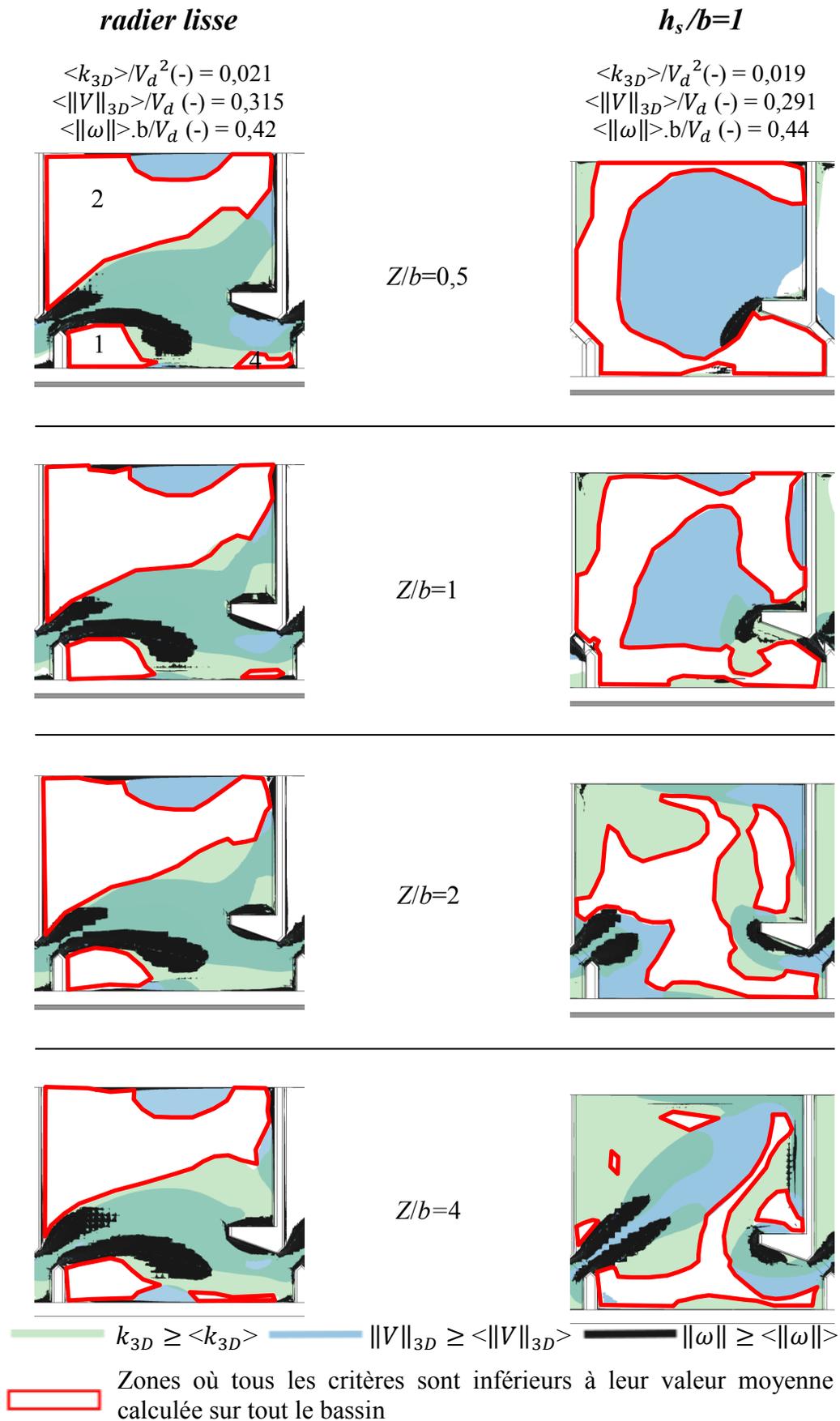


Figure IV-22. Régions où les critères de vorticité (en noir), d'énergie cinétique turbulente (en vert) et de vitesse (en bleu) sont supérieurs aux valeurs seuils dans la configuration *radier lisse* (à gauche) et en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour $B/b=9$. Les régions où les valeurs seuils ne sont pas atteintes sont délimitées en rouge et sont numérotées dans la configuration *radier lisse*.

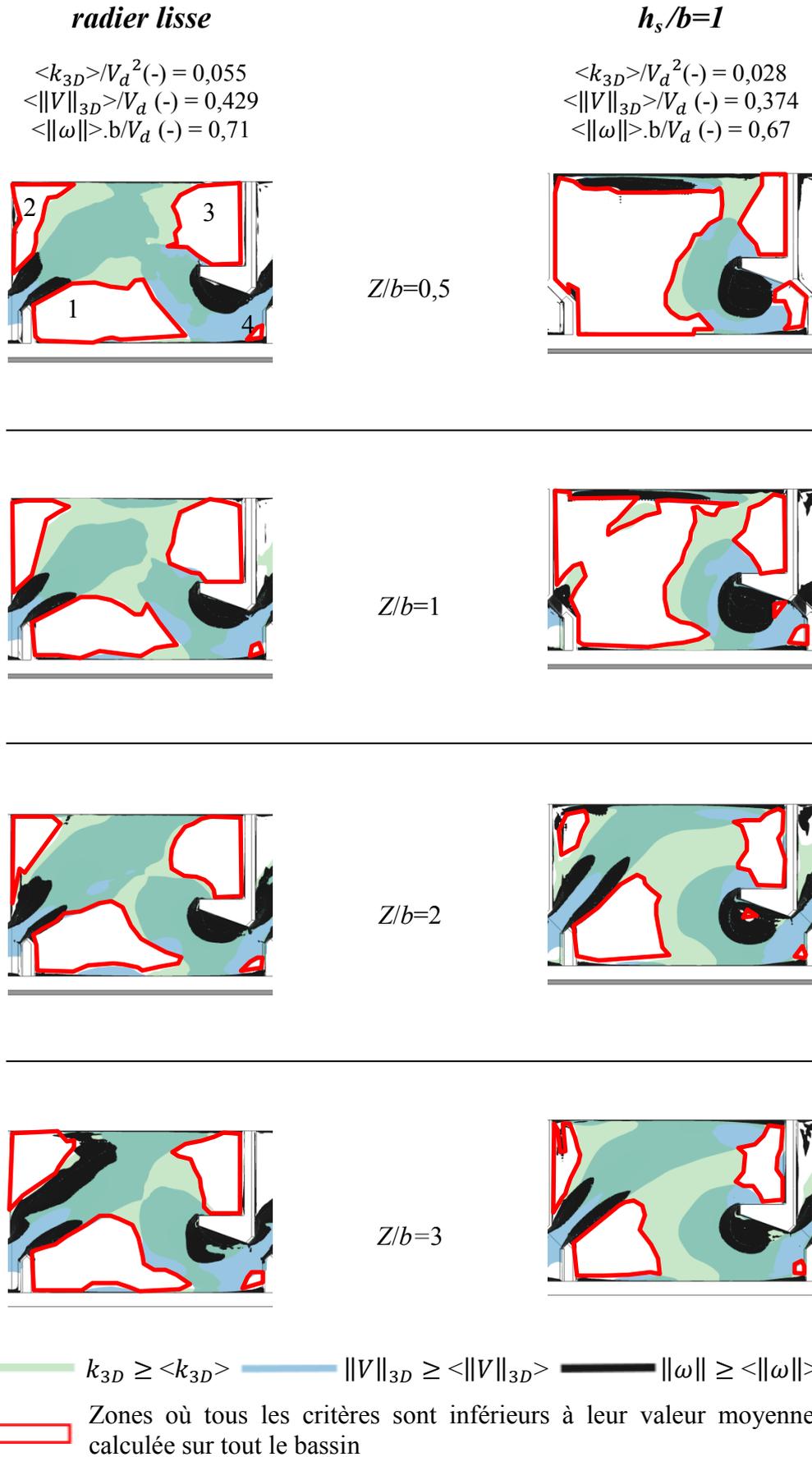


Figure IV-23. Régions où les critères de vorticité (en noir), d'énergie cinétique turbulente (en vert) et de vitesse (en bleu) sont supérieurs aux valeurs seuils dans la configuration *radier lisse* (à gauche) et en configuration avec une hauteur de seuil $h_s/b=1$ pour $B/b=6,67$. Les régions où les valeurs seuils ne sont pas atteintes sont délimitées en rouge et sont numérotées dans la configuration *radier lisse*.

IV.5 Influence des seuils sur le comportement des poissons

L'objectif de ces essais est de déterminer l'influence de l'insertion de seuils dans les fentes de la passe sur le comportement des poissons ainsi que sur l'efficacité globale d'une passe à poissons. Pour cela, des tests biologiques ont été conduits par l'insertion de différents lots de truites dans l'écoulement de la passe à poissons du laboratoire P' (échelle 1/4). Deux configurations ont été testées pour une largeur de bassin $B/b=6,67$, une avec les seuils disposés dans les fentes et une sans (qui constitue le cas de référence). Des analyses statistiques ont ensuite été menées pour exploiter les résultats et comparer le comportement des truites vis-à-vis des deux configurations. Les deux lots de truites de grande taille (TRF1 et TRF2) ont été divisés en deux sous-lots (1A, 1B et 2A, 2B) et ont travaillé 45min au lieu de 90min chacun. Les plus grandes truites ayant moins de difficultés à franchir les bassins, diviser par deux leur nombre lors des acquisitions a permis de créer deux lots supplémentaires tout en préservant un nombre suffisant d'individus passant dans le bassin d'acquisition. Les deux lots de truites de petite taille ont été dénommés TRF3 et TRF4. Les définitions des zones de stabulation et des différents indices utilisés dans ce chapitre ont été explicitées dans le paragraphe II.4.3. Il convient par ailleurs de préciser que les résultats, significatifs ou non, issus de ces manipulations ont été obtenus dans des conditions expérimentales de laboratoire qui peuvent influencer le comportement des poissons.

IV.5.1 Identification des zones de stabulation (repos)

Il existe des zones, identifiées dans les travaux précédents (Tarrade, 2007 ; Wang *et al.*, 2010 ; Cornu *et al.*, 2012), dans lesquelles les truites sont susceptibles d'adopter une nage stationnaire. Ces zones sont appelées zones de stabulations (Figure IV-24).



Figure IV-24. Zones de stabulation identifiées pour les truites dans le bassin de la passe à poissons (Cornu *et al.*, 2012).

Elles sont situées aux mêmes endroits dans les configurations sans seuil et avec seuils. Leurs tailles doivent légèrement différer en fonction de la configuration, cependant étant donné le faible degré de précision associé aux délimitations de ces zones, elles seront considérées identiques pour les deux configurations. Il existe une forte concordance entre les zones définies ici à partir du visionnage des vidéos et les zones délimitées grâce à l'analyse des grandeurs cinématiques (Figure IV-23).

Pour l'analyse de l'utilisation de ces zones et du temps passé dans chacune d'elles, il a été nécessaire de définir le moment à partir duquel un poisson est considéré en situation de nage stationnaire dans une zone de stabulation. En l'occurrence, dès qu'un poisson restait plus de 5s dans une zone de stabulation, il était considéré comme étant en situation de repos. La zone 0 n'est pas une zone de stabulation, elle correspond à une zone où les grandeurs cinématiques de

l'écoulement sont les plus importantes (Tarrade, 2007). Elle a été prise en compte dans l'étude des trajectoires seulement lorsqu'un poisson ne passait par aucune des autres zones lors de son passage dans le bassin 3.

IV.5.2 Indices généraux

IV.5.2.a Efficacité totale

L'efficacité totale varie en fonction du nombre de tests effectués, de la configuration et du lot de truites considéré (Figure IV-25). Elle varie entre 0% et 40%. Chaque configuration a été testée deux fois.

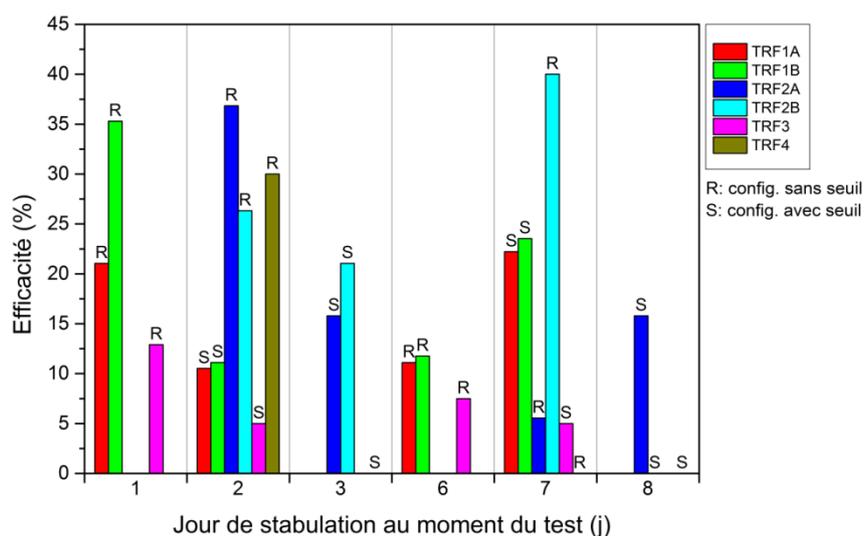


Figure IV-25. Evolution de l'efficacité totale en fonction du nombre de tests et de la configuration.

Effet de lot

Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé car les échantillons du lot TRF4 ne suivaient pas une loi normale. Les diagrammes en boîtes réalisés pour chaque lot de truites (Figure IV-26) montrent que les lots 3 et 4 ont tendance à avoir des efficacités plus faibles que les autres lots. Cependant les valeurs moyennes ne varient pas significativement entre les lots (Kruskal-Wallis, $\chi^2=6,2$ et $p=0,29$).

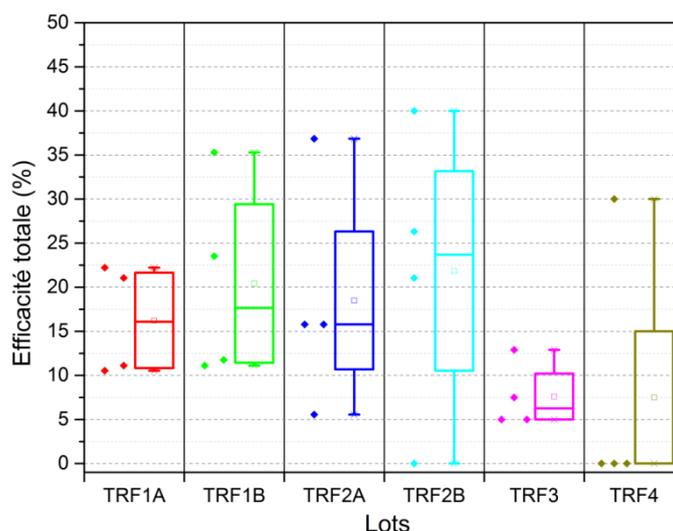


Figure IV-26. Efficacité totale en fonction des lots.

L'analyse de l'efficacité totale met en relief que l'effet de lot n'est pas dominant. Il est ainsi possible de mettre en évidence un éventuel effet de configuration.

Effet de configuration

Les conditions de normalité et d'homoscédasticité étant vérifiées, le test t à deux échantillons de Student a été utilisé. Il indique qu'il existe une différence significative entre les deux configurations (Two sample t test, $t=2,1$, $p=0,049$). L'ajout des seuils fait baisser l'efficacité totale moyenne car elle passe de 20,8% sans seuil à 10,8% avec les seuils (Figure IV-27). Il est à noter, que la dispersion autour de la moyenne est plus faible et que l'efficacité atteint des valeurs moins importantes dans la configuration avec les seuils.

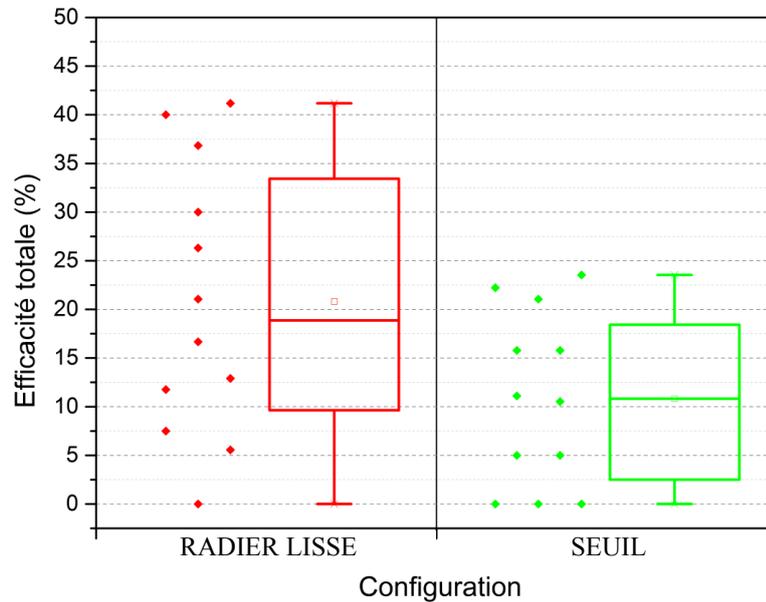


Figure IV-27. Efficacité totale en fonction de la configuration.

IV.5.2.b Franchissement total

Effet de lot

Les tests de normalité et d'homoscédasticité se sont révélés concluants, l'ANOVA a donc été réalisée. Il existe des différences significatives entre les lots (ANOVA, $F=4,6$, $p=0,006$). Pour déterminer les lots qui se différencient significativement des autres, une analyse par paire a été exécutée.

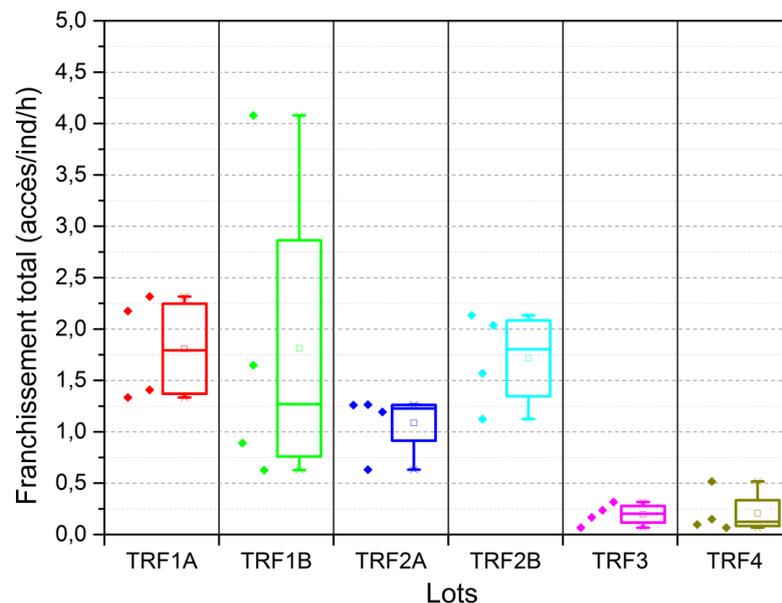


Figure IV-28. Franchissement total en fonction des lots.

Elle montre que les lots 3 et 4 (lots de truites de petite taille) diffèrent des autres lots mais ne sont pas significativement différents entre eux. Ce résultat est conforté par l'analyse des diagrammes en boîtes (Figure IV-28).

L'analyse du franchissement total met en relief que deux lots ont un franchissement total différent des autres. Les lots 3-4 et 1A-1B-2A-2B seront donc analysés séparément.

Effet de configuration - lots 1A-1B-2A-2B

Le résultat des tests de normalité et d'homoscédasticité s'est révélé concluant, le test t à deux échantillons de Student a été utilisé. Il indique qu'il n'existe pas de différences significatives entre les moyennes des franchissements totaux (Two sample t test, $t=1,32$, $p=0,18$). Les valeurs moyennes sont de 1,9 accès par individu par heure dans la configuration sans seuil et 1,3 avec les seuils (Figure IV-29).

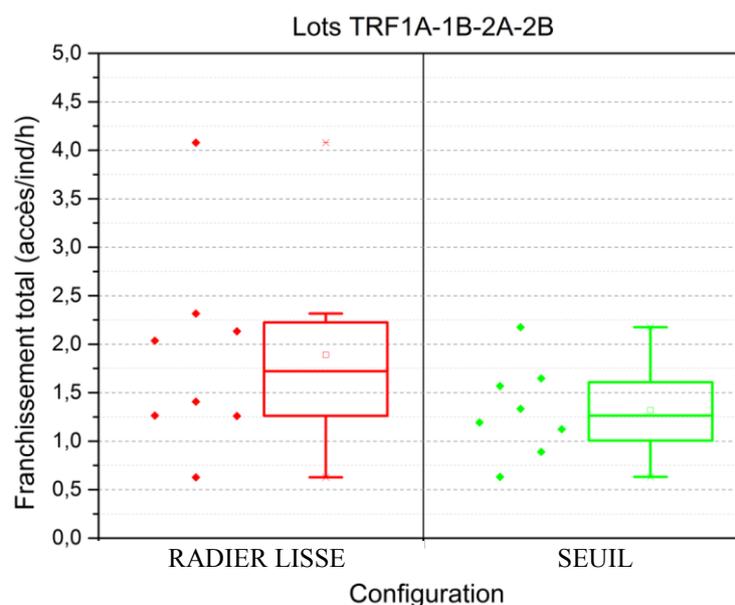


Figure IV-29. Franchissement total en fonction de la configuration pour les lots 1A-1B-2A-2B.

Effet de configuration - lots 3-4

Le test de normalité révèle que l'échantillon dans la configuration avec seuil n'est pas normalement distribué, en revanche les échantillons des deux configurations possèdent des

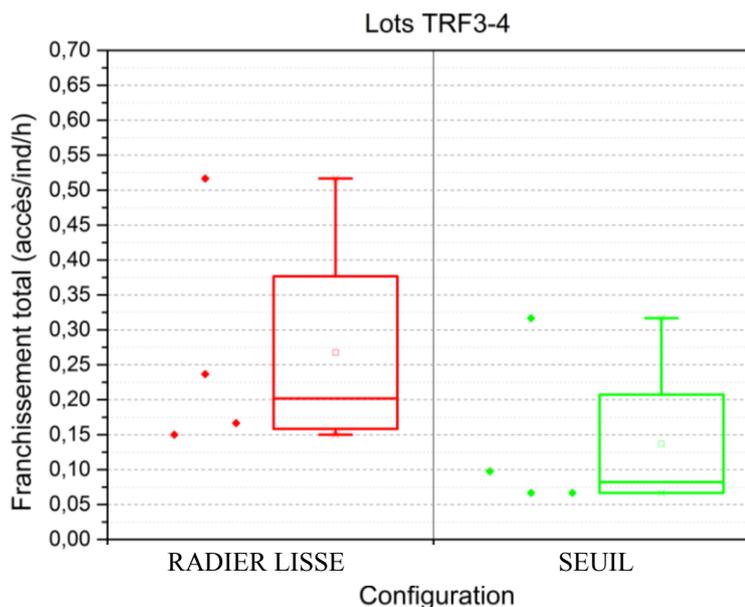


Figure IV-30. Franchissement total en fonction de la configuration pour les lots 3 et 4.

variances similaires. Le test non paramétrique de Mann-Whitney a donc été utilisé et ne révèle pas de différence significative entre les configurations (Mann-Whitney, $U=13$, $p=0,19$).

La figure IV-30 représente les diagrammes en boîtes du franchissement total en fonction de la configuration pour les lots 3 et 4. Elle montre que les valeurs de franchissement ont tendance à être plus faibles pour la configuration avec les seuils (0,14 accès/ind/h avec les seuils contre 0,27 sans les seuils).

L'analyse du franchissement total a permis de déceler des différences significatives entre les lots. La comparaison des configurations a donc été effectuée en regroupant les lots qui obtenaient des résultats similaires. Il en résulte que l'insertion de seuils dans la passe à poissons ne modifie pas significativement le franchissement total des truites.

IV.5.2.c Indice d'activité

Effet de lot

Les tests de normalité et d'homoscédasticité se sont révélés positifs, l'ANOVA a donc été réalisée. Elle indique qu'il existe des différences significatives entre les moyennes des indices d'activité de chacun des lots (ANOVA, $F=4,5$ $p=0,007$). L'analyse par paires a été exécutée et donne des différences significatives entre les lots de petites truites (lots 3 et 4) et les lots de truites de plus grande taille (lots 1A-1B-2A-2B). Ces différences sont nettement visibles (Figure IV-31), où les diagrammes en boîtes des lots 3 et 4 sont plus petits et décalés vers des valeurs d'indices d'activités plus faibles que ceux des lots 1A-1B-2A-2B.

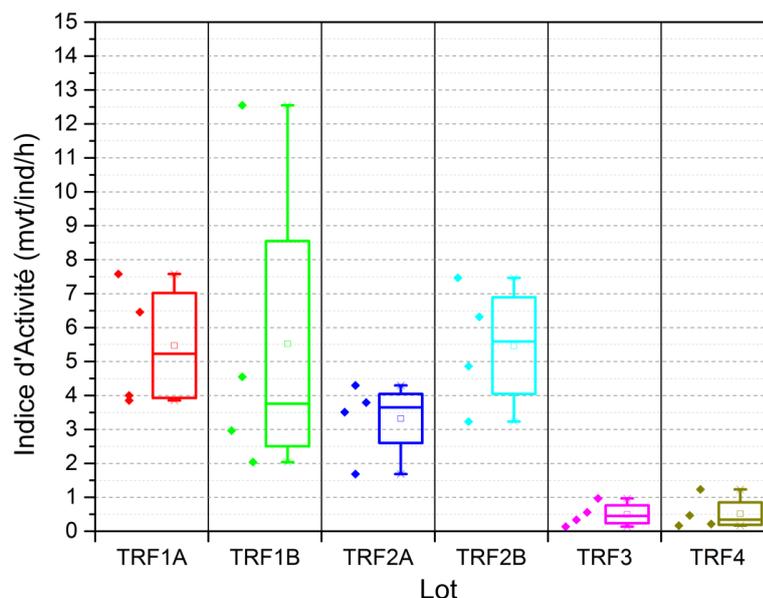


Figure IV-31. Indice d'activité en fonction du lot.

Pour étudier l'influence de la configuration sur l'activité des truites, les lots 3-4 et 1A-1B-2A-2B seront traités séparément.

Effet de configuration - lots 1A-1B-2A-2B

Un test t à deux échantillons de Student a été réalisé, les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité ayant été préalablement vérifiées. Le test indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux configurations (Two sample t test, $t=1,4$, $p=0,19$).

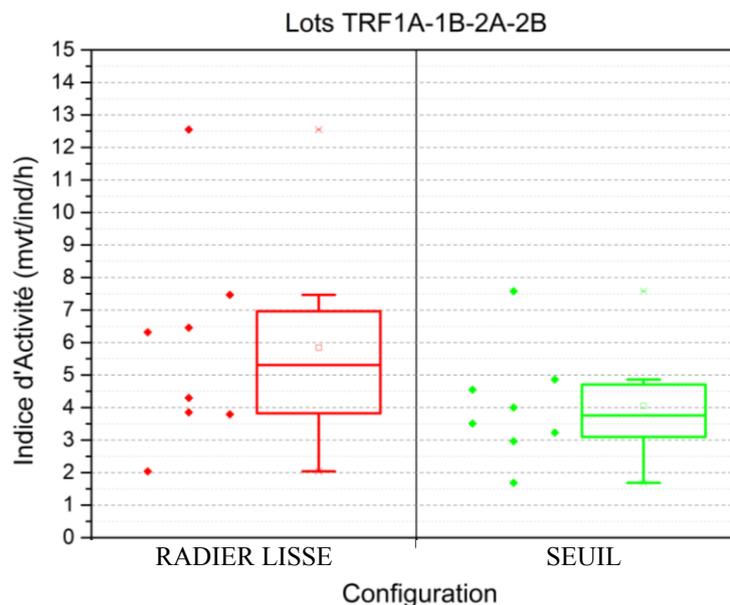


Figure IV-32. Indice d'activité en fonction de la configuration pour les lots 1A-1B-2A-2B.

Les diagrammes en boîtes (Figure IV-32) montrent que l'insertion de seuil a tendance à diminuer l'activité des poissons. La valeur moyenne de l'indice d'activité est de 5,85 mouvements par individu par heure dans la configuration sans seuil et de 4,05 dans la configuration avec seuils (avec une dispersion moins importante).

Effet configuration - lots 3-4

Les échantillons dans la configuration $h_s/b=1$ ne suivent pas une distribution normale. Cependant, l'hypothèse de l'égalité des variances entre les groupes étant respectée, un test de Mann-Whitney a été exécuté. Il indique qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux configurations pour les lots 3 et 4 (Mann-Whitney, $U=13$, $p=0.19$).

Il est à noter que les diagrammes (Figure IV-33) ont tendance à se différencier suivant la configuration. Dans la configuration avec seuils, 3 des 4 tests effectués révèlent un indice d'activité en dessous de 0,25 mvt/ind/h alors que dans la configuration sans seuil sur l'ensemble des tests l'indice ne descend pas en dessous de 0,3 mvt/ind/h. L'analyse des diagrammes permet de laisser supposer que les seuils ont tendance à diminuer l'activité des truites de petite taille.

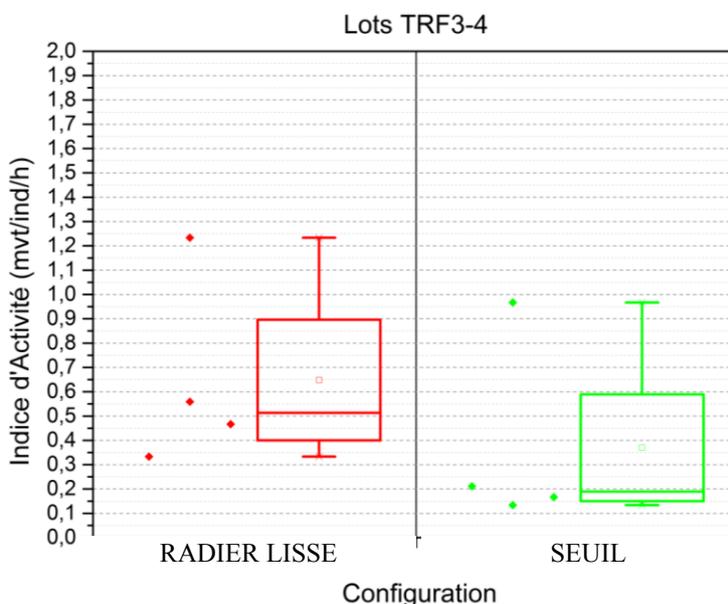


Figure IV-33. Indice d'activité en fonction de la configuration pour les lots 3-4.

Le visionnage des vidéos a permis de confirmer cette tendance en remarquant que les truites de petite taille (lots 3 et 4) se retrouvaient souvent piégées dans la zone (moins énergétique) située derrière le seuil. Elles étaient ensuite la plupart du temps éjectées par le jet dès lors qu'elles tentaient de franchir une fente (Figure IV-34).

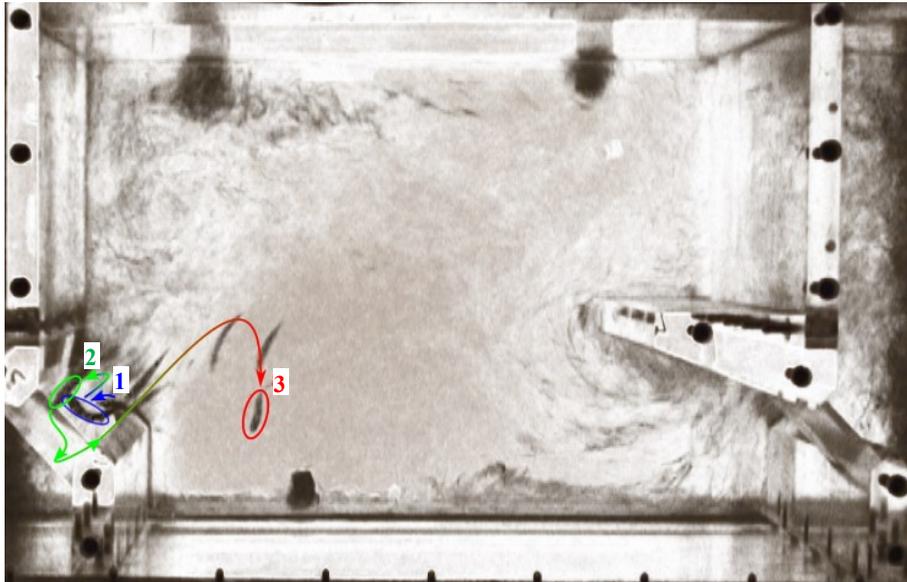


Figure IV-34. Tentative échouée de montaison d'une truite de petite taille suite à un arrêt derrière le seuil. L'image représente la position de la truite à différents instants.

Il existe des différences d'indice d'activité entre les différents lots étudiés. Les lots des truites de plus grande taille (1A-1B-2A et 2B) présentent des résultats similaires. Il en va de même pour les lots de truites de plus petite taille (3 et 4). Ils ont donc été regroupés pour étudier l'influence des configurations testées. Il s'avère que pour tous les lots, aucune différence significative n'a été décelée par les tests statistiques. Cependant, une tendance à la baisse de l'indice d'activité est perceptible dans la configuration avec seuil comparé à celle sans seuil.

IV.5.2.d Indice de dévalaison

Effet de lot

Les résultats des tests d'homoscédasticité et de normalité ont permis de réaliser un test ANOVA. Il en résulte qu'il n'existe aucune différence significative entre les différents lots

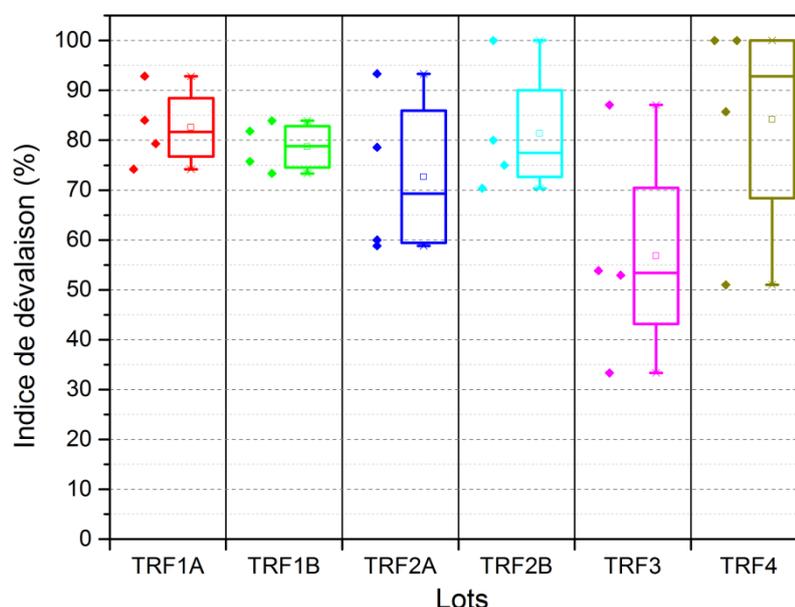


Figure IV-35. Indice de dévalaison en fonction des lots.

(ANOVA, $F=1,6$; $p=0,2$). L'analyse de la configuration sera donc effectuée sur l'ensemble des lots. La figure IV-35 montre les diagrammes en boîtes associés aux indices de dévalaison pour chacun des lots.

Effet de configuration

Un test t à deux échantillons de Student a été réalisé après avoir vérifié les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité. Il révèle qu'aucune différence significative n'est décelable entre les deux configurations (Two sample t test, $t=-0,64$, $p=0,53$). Les diagrammes (Figure IV-36) corroborent le résultat du test. Les valeurs moyennes sont proches avec 73% dans la configuration sans seuil et 78% dans la configuration avec seuil. Les écarts types le sont également (16% dans le premier cas contre 18% dans le second) indiquant que la dispersion autour de la valeur moyenne est comparable dans les deux cas.

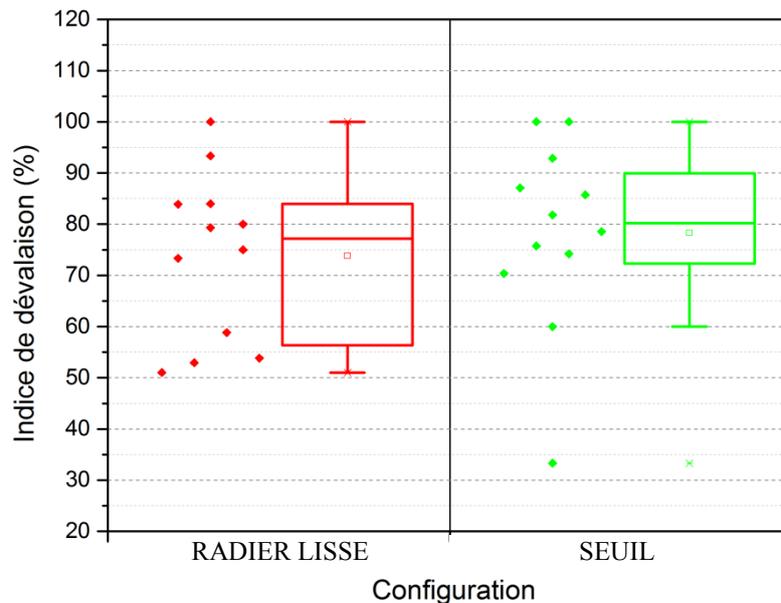


Figure IV-36. Indice de dévalaison en fonction de la configuration.

IV.5.2.e Bilan des indices

Les tests statistiques ont permis de montrer que l'ajout de seuils dans les fentes diminue l'efficacité totale de la passe. Cela indique qu'à la fin des séances de travail, la proportion de poissons qui restaient en amont du bassin 3 par rapport à l'effectif total, était en moyenne plus importante quand la passe n'était pas munie de seuils. Il n'y a pas de différence significative sur les autres indices mais des tendances ont été remarquées avec des indices globalement toujours plus faibles lorsque les seuils sont présents.

IV.5.3 Temps de séjour

Les temps de séjour varient de 1,28 s à plus de 11 min dans la configuration avec les seuils sur un total de 265 passages dans le bassin 3. Dans la configuration *radier lisse*, ils varient de 1,04 s à plus de 9 min sur 396 passages.

Effet de lot

Les temps de séjour de chaque individu en fonction des lots, ont été reportés sur la figure IV-37. Sur ce graphique, l'échelle de temps a été adaptée (réduite à 100 s) pour permettre de visualiser correctement les diagrammes en boîtes. Pour comparer les temps de séjour, une conversion logarithmique a été appliquée de manière à ce que les échantillons suivent une répartition normale. Un test t de Welch a été appliqué en raison de l'hétérogénéité des variances des échantillons. Ce test montre qu'il existe des différences significatives entre les lots des truites

les plus petites (TRF3 et 4) et les plus grosses (TRF1A-1B-2A-2B) sur les temps de séjour. Les truites les plus petites ont passé en moyenne plus de temps dans le bassin 3 que les autres.

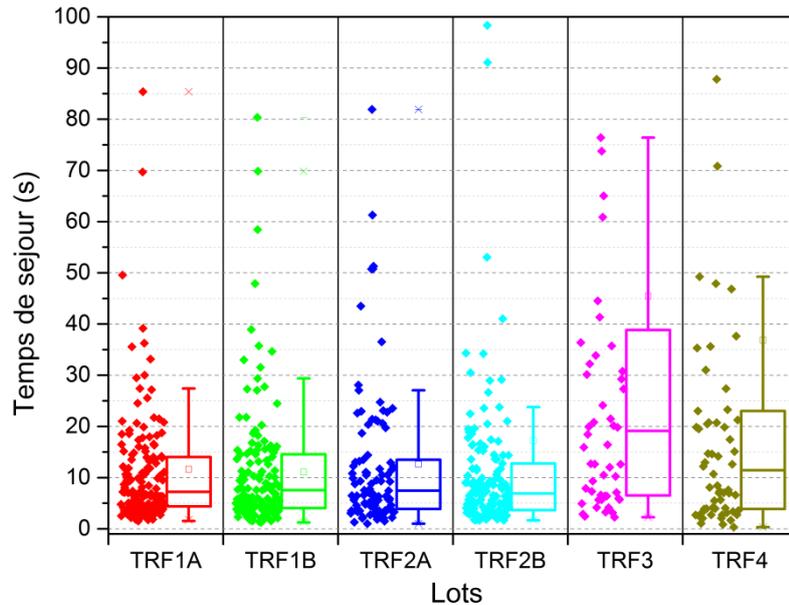


Figure IV-37. Temps de séjour dans le bassin 3 en fonction des lots.

En conséquence pour analyser l'effet de la configuration sur le temps de séjour des poissons dans le bassin 3, les lots TRF3-4 et TRF1A-1B-2A-2B seront traités séparément.

Effet de configuration

Les tests t à deux échantillons de Student ont été réalisés sur les deux groupes TRF3-4 et TRF1A-1B-2A-2B. Ils ne décèlent aucune différence significative entre les deux configurations, ni pour le groupe TRF3-4 (Two sample t test, $t=1,29$, $p=0,2$), ni pour l'autre groupe (Two sample t test, $t=1,88$, $p=0,06$).

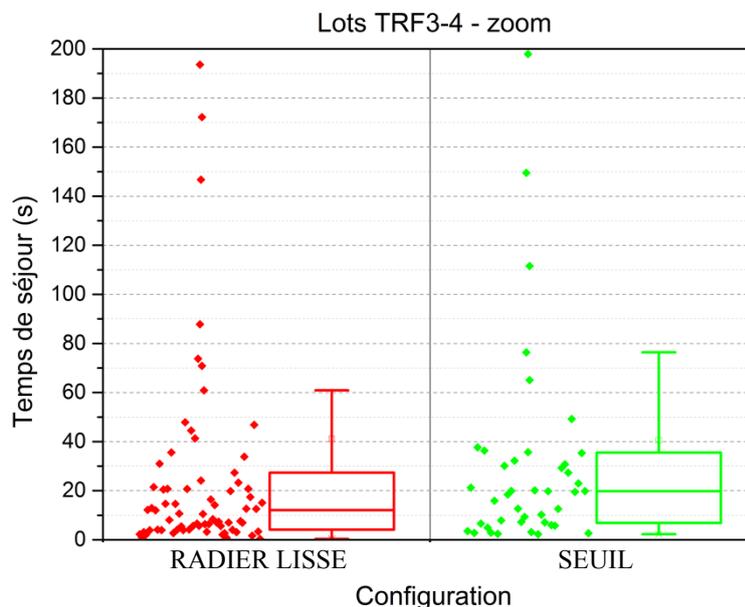


Figure IV-38. Temps de séjour dans le bassin 3 en fonction de la configuration pour les lots 3 et 4.

Les figures IV-38 et IV-39 permettent de mettre en évidence cette absence de différence entre les deux configurations, avec des diagrammes en boîte très similaires.

Les tests statistiques effectués permettent de conclure que la présence de seuils dans les fentes de la passe à poissons n'a pas d'influence sur le temps de passage des truites dans le bassin de mesure.

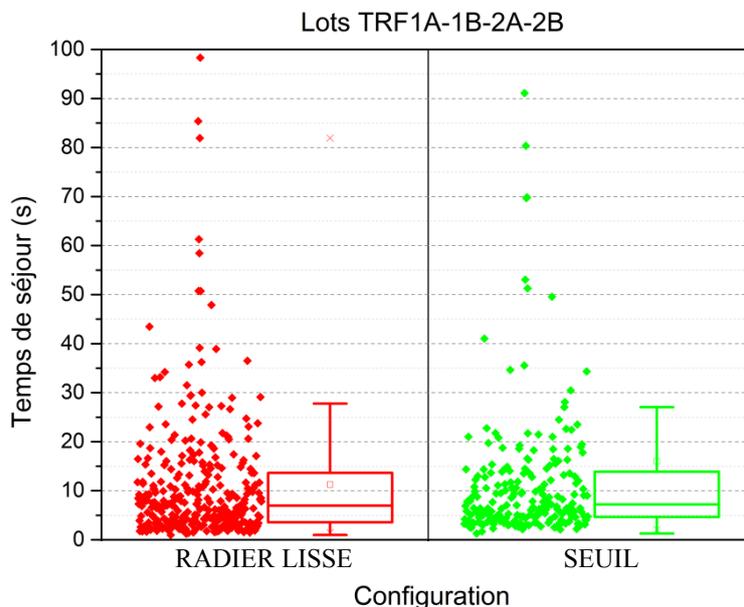


Figure IV-39. Temps de séjour dans le bassin 3 en fonction de la configuration pour les lots 1A, 1B, 2A et 2B.

IV.5.4 Stabulation

Le pourcentage d'individus ayant utilisé au moins une zone de repos durant son passage dans le bassin 3 est équivalent entre les deux configurations (35% pour le radier lisse et 37% en présence d'un seuil). Les seuils n'ont donc pas une influence significative sur la stabulation des poissons à l'intérieur du bassin 3.

La figure IV-40 donne le pourcentage d'utilisation de chacune des zones pour chaque configuration. Ce pourcentage correspond au rapport du nombre d'utilisations d'une zone⁶ sur le nombre d'utilisations de toutes les zones. Le nombre de poissons et le temps de stabulation n'interviennent pas dans ce calcul. Il est à noter que la zone 1 et la zone 2 sont utilisées dans 90% des cas pour les deux configurations. Les zones 3 et 4 sont très peu utilisées par les poissons pour se reposer, qu'il y ait présence de seuils ou non. Les analyses effectuées dans la partie précédente à partir des différents critères (vorticité, énergie cinétique turbulente, vitesse) ont montré que la zone 2 était significativement réduite lorsqu'un seuil était présent. Les résultats

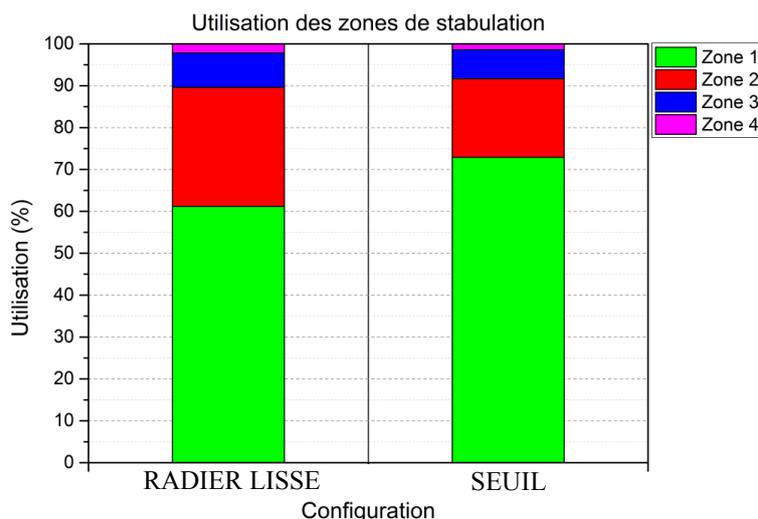


Figure IV-40. Répartition de l'utilisation de chacune des zones pour chaque configuration.

présentés ici confirment cette analyse. La zone 1 est plus utilisée dans la configuration avec seuils (73% contre 61% sans seuil) au détriment de la zone 2 (19% contre 28% sans seuil).

⁶ Calculé sur l'ensemble des essais dans une configuration donnée.

IV.5.5 Trajectoires

Pour analyser les trajectoires, chaque passage d'un poisson dans une zone de repos a été noté dans l'ordre chronologique. Des statistiques ont ensuite été faites sur la destination des poissons en fonction de leur provenance pour les configurations *radier lisse* et avec seuils. Les résultats sont donnés sous forme de flèches indiquant la destination des poissons. Elles sont associées à un pourcentage indiquant la proportion d'individus ayant réalisé la trajectoire en question.

Lorsqu'il franchit la fente, le poisson est orienté dans la direction du jet. Quand il en ressort, l'élan donné par l'effort qu'il a fourni, le conduit quasi-inévitablement dans la zone 1 (Figure IV-41). Plus de 90% des individus passent par cette zone dès leur entrée dans le bassin que ce soit dans la configuration avec seuils ou sans seuil. La majorité du reste de la population (environ 7%) qui arrive à rentrer dans le bassin en ressort directement, éjectée par le jet.

Après un passage dans la zone 1, 28% des individus franchissent la fente amont dans la configuration avec des seuils contre 36,9% dans la configuration *radier lisse* (Figure IV-42). D'autre part, les individus se dirigent vers la zone 2 dans des proportions identiques pour les deux configurations (environ 40%). Le pourcentage de la population qui sort de la zone 1 par la fente aval est très similaire dans les deux configurations (en moyenne 15,5%). En revanche, les individus ont tendance à se diriger un peu plus souvent vers la zone 4 dans la configuration avec seuils (7% contre 0,6% sans seuil).

Après un passage dans la zone 2 (Figure IV-43), les individus privilégient plus largement la zone 1 dans la configuration avec seuils (56,4% contre 35,1% sans seuil). En compensation, la proportion d'individus franchissant la fente amont et celle passant par la zone 3 après la zone 2 est plus importante dans la configuration sans seuil que dans la configuration avec seuils.

Lorsque les individus sortent de la zone 3 dans la configuration *radier lisse*, leur destination est équitablement répartie entre la fente aval (fente D), la zone 2 et la zone 1 (Figure IV-44). Elle est plus déséquilibrée dans la configuration avec seuils avec un pourcentage plus important d'individus passant en zone 1 au détriment de la zone 2.

Avant de sortir du bassin par la fente amont en montaison (fente B), une grande majorité des individus se trouvait en zone 1 (environ 70%), le reste provenant de la zone 2 (Figure IV-45). Aucune différence n'est décelable entre les deux configurations.

La zone 1 est majoritairement la dernière zone de passage des individus avant le franchissement de la fente aval dans les deux configurations. En revanche, un pourcentage d'individus plus important provient de la zone 1 au détriment de la zone 2 dans la configuration avec seuils (Figure IV-46).

La majorité des individus passe par la zone 1 avant de sortir du bassin 3, que ce soit dans la configuration *radier lisse* (63,4%) ou dans la configuration avec seuils (68,3%) (Figure IV-47). Le franchissement de la fente amont (montaison) est largement privilégié par rapport à la fente aval (dévalaison) dans les deux cas. En revanche, aucun individu n'est sorti du bassin par la fente amont depuis la zone 3.

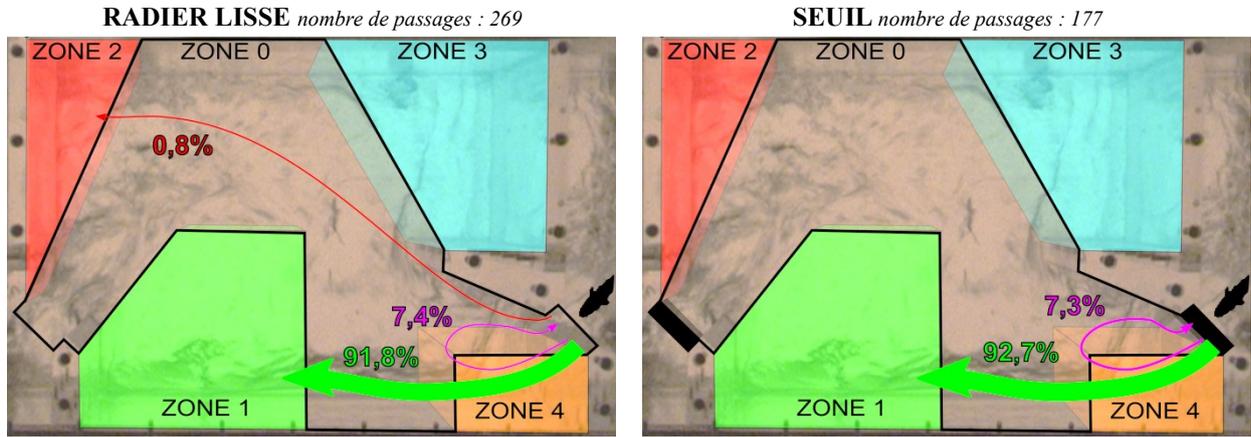


Figure IV-41. Destination après franchissement de la fente aval (entrée dans le bassin) -- montaison.

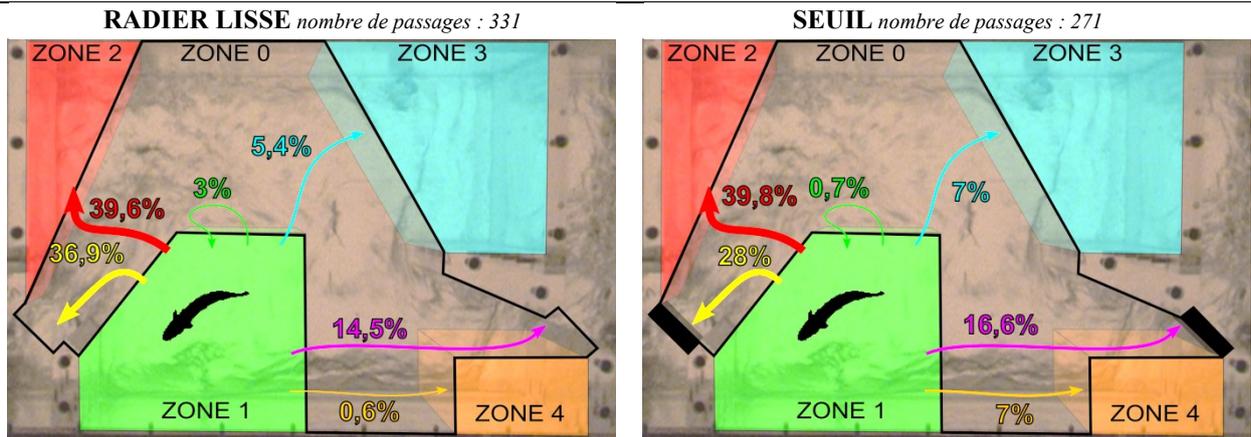


Figure IV-42. Destination après un passage en zone 1 -- montaison.

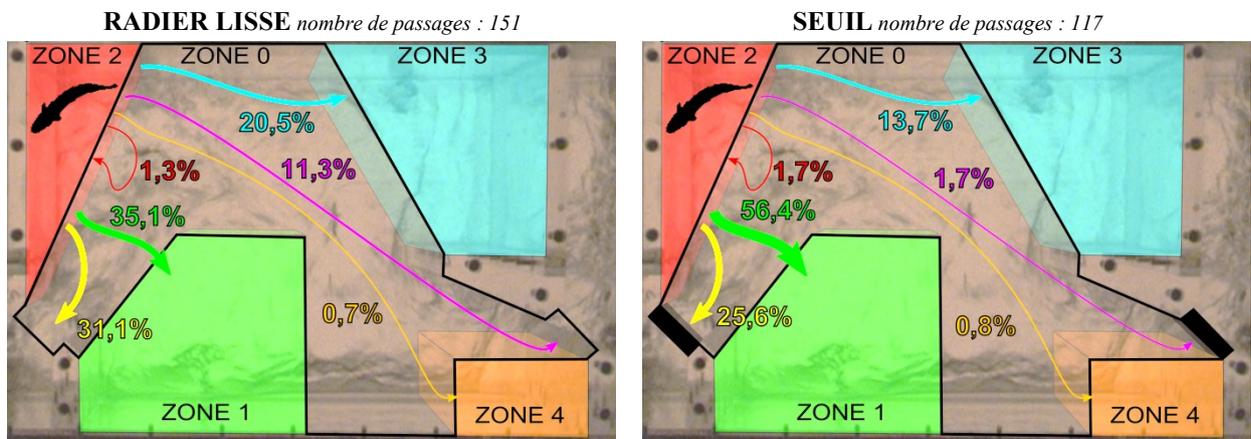


Figure IV-43. Destination après un passage en zone 2 -- montaison

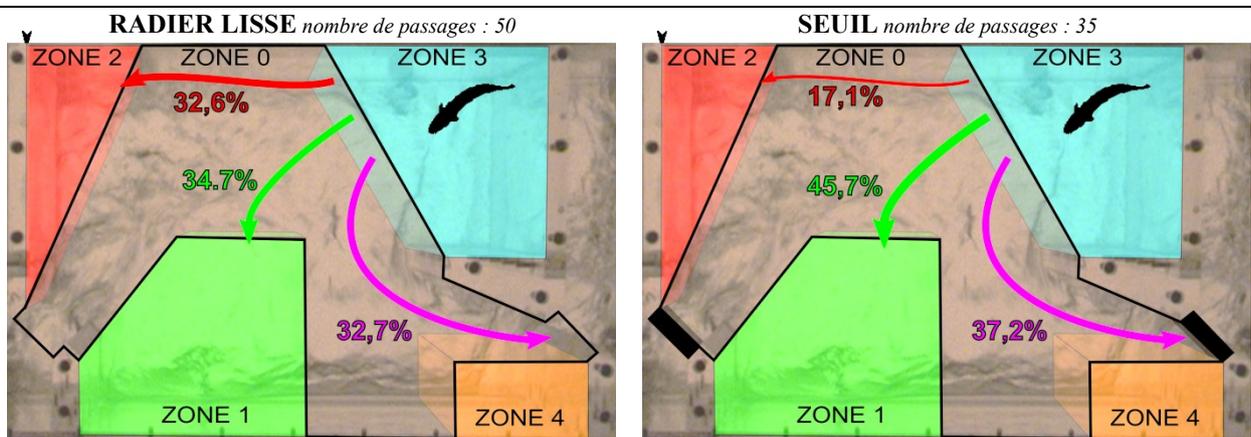


Figure IV-44. Destination après un passage en zone 3 -- montaison

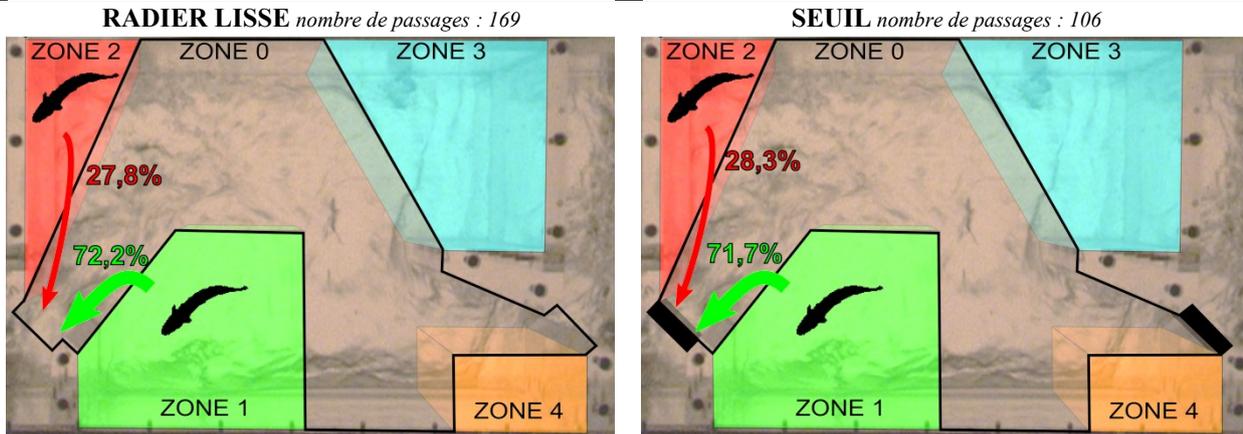


Figure IV-45. Dernière zone de passage avant le franchissement de la fente amont -- montaison

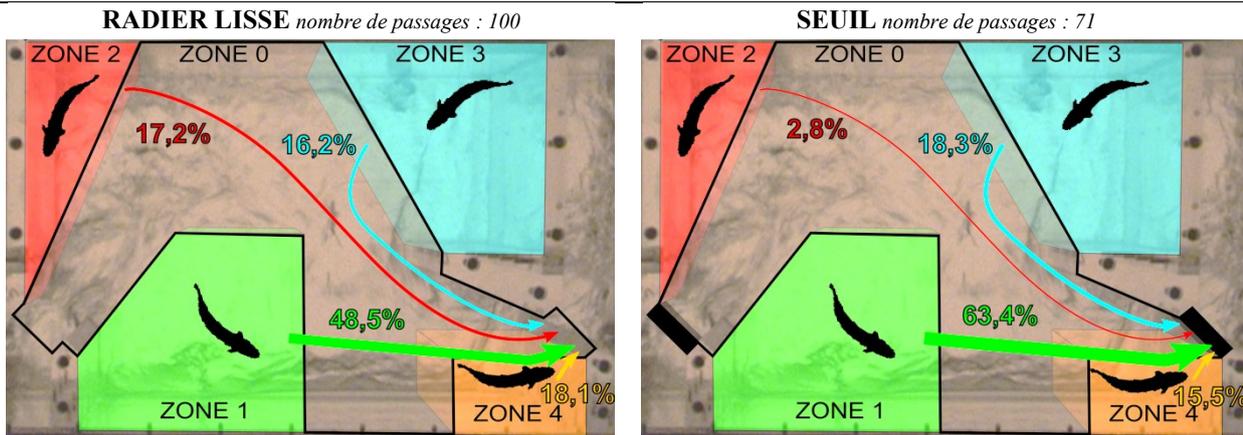


Figure IV-46. Dernière zone de passage avant le franchissement de la fente aval -- montaison

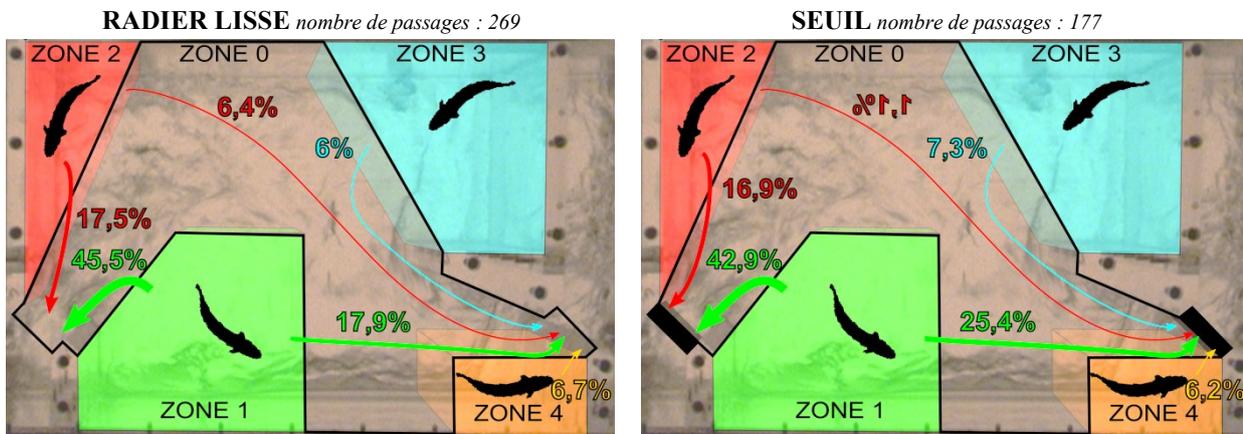


Figure IV-47. Dernière zone de passage avant la sortie du bassin -- montaison

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, l'influence des seuils insérés aux pieds des fentes des passes à poissons à fentes verticales, a été étudiée d'un point de vue hydraulique, cinématique et biologique. Tout d'abord, des cartographies de la topologie de l'écoulement pour plusieurs pentes, largeurs de bassin, débits et hauteurs de seuils ont été réalisées. Elles ont permis de montrer que l'ajout de seuils dans les fentes, forçait l'écoulement à adopter une topologie de type 2, dans laquelle le jet est orienté vers la paroi opposée à la fente. Cette caractéristique est d'autant plus marquée que la hauteur des seuils est importante. Contrairement à la configuration *radier lisse*, le débit a une influence significative sur la topologie de l'écoulement, notamment lorsque qu'un seuil de hauteur égale à une demi-largeur de fente est installé. Dans ce cas, l'augmentation du débit diminue l'influence relative de la hauteur du seuil par rapport à la colonne d'eau dans la fente, et

la zone de transition entre la topologie de type 1 et celle de type 2 s'opère sur des largeurs de bassins plus étendues.

L'évolution du coefficient de débit en fonction de la pente, de la largeur des bassins, du débit et de la hauteur des seuils, a ensuite été étudiée. La présence des seuils ne modifie pas significativement l'évolution du coefficient de débit en fonction de la pente ou de la largeur des bassins. Sa diminution est du même ordre de grandeur que dans la configuration *radier lisse*. De même, la variation du débit n'a pas d'influence sur le C_d . L'analyse conjointe de l'évolution du coefficient de débit et de la topologie de l'écoulement a permis de montrer que, pour une même topologie, plus la hauteur des seuils est grande, plus le C_d est faible. En revanche, lorsque l'augmentation de la hauteur des seuils entraîne une modification de la topologie de l'écoulement du type 1 vers le type 2, le coefficient de débit subit une augmentation. Pour la topologie de type 1, le jet est soumis à un battement important au cours duquel il alimente la zone de recirculation supérieure et ressort par « bouffées de vitesses » du bassin par la fente aval. Cette configuration génère une hauteur d'eau plus importante dans les bassins que dans le cas de la topologie de type 2 dans laquelle, certes, le jet impacte la paroi opposée à la fente, mais a une trajectoire en moyenne plus « stable » au cours du temps, en réduisant les occurrences du type « bouffées de vitesses ».

Des profils de vitesses ont été réalisées pour différentes hauteurs de seuils, deux largeurs de bassins ($B/b=6,67$ et $B/b=9$) et une pente $s=7,5\%$. L'étude des grandeurs cinématiques révèle que l'écoulement passe progressivement du type 1 vers le type 2 lorsque la hauteur des seuils augmente. Certains profils présentent par ailleurs une diminution d'énergie cinétique turbulente, due à la fois à un changement de topologie et à un accroissement du volume de dissipation (élévation de la hauteur d'eau). Les variations de vitesses importantes le long de la colonne d'eau indiquent par ailleurs que la présence d'un seuil tend à amplifier la tridimensionnalité de l'écoulement.

L'écoulement dans une passe à poissons munie de seuils d'une hauteur égale à une largeur de fente ($h_s/b=1$) a ensuite été analysé à partir de simulations numériques et comparé à une configuration avec un radier lisse, et ce pour deux largeurs de bassins ($B/b=6,67$ et 9). Des simulations URANS et LES ont ainsi été étudiées, le choix d'utiliser l'une ou l'autre de ces deux méthodes s'étant basé sur des comparaisons avec des résultats expérimentaux. En configuration *radier lisse* pour $B/b=6,67$ et 9 (simulation LES), le caractère bidimensionnel de l'écoulement est retrouvé, conformément aux résultats issus de la littérature. En revanche dans la configuration $h_s/b=1$, la création d'une large zone de recirculation à l'aval des seuils, génère un écoulement plus tridimensionnel pour les deux largeurs de bassins. En grande largeur ($B/b=9$), la structure topologique de l'écoulement est particulièrement impactée et varie, de manière alternative et répétée, d'un bassin à un autre. Les régions des bassins potentiellement les plus favorables pour les poissons ont ensuite été définies à partir du calcul des grandeurs clés de l'écoulement (vorticité, vitesse moyenne, énergie cinétique turbulente), considérées dans la littérature comme ayant un impact fort sur le comportement des poissons. Des expérimentations avec des truites *fario* ont été menées au laboratoire pour évaluer l'impact de la présence des seuils sur le comportement des poissons. L'analyse des vidéos issues de ces manipulations a révélé que les régions identifiées comme potentiellement favorables correspondent à celles utilisées par les poissons en situation de nage stationnaire (zones de repos). Des tests statistiques ont été réalisés à partir de la quantification des mouvements des poissons entre bassins et ont permis de montrer qu'il existait une diminution significative de l'efficacité (dans les conditions expérimentales du laboratoire) lorsque la passe à poissons était munie de seuils. En revanche, en ce qui concerne le franchissement total, l'indice de dévalaison et l'indice d'activité, des tendances ont été remarquées mais aucune différence significative n'a pu être établie. Aucune différence n'a été remarquée au niveau du temps de séjour des individus dans le bassin 3 entre les configurations étudiées. La présence de seuils ne semble donc ni ralentir ni accélérer le passage des truites d'une fente à l'autre du bassin. Les truites n'utilisent pas non plus davantage les zones de stabulation. Les trajectoires des poissons sont globalement identiques dans les deux configurations.

Chapitre 5

ETUDE DE L'INFLUENCE DES MACRO-RUGOSITES

Sommaire

V.	ETUDE DE L'INFLUENCE DES MACRO-RUGOSITES	143
V.1	Topologie de l'écoulement	144
V.2	Coefficient de débit	145
V.3	Influence de la densité de macro-rugosités sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement	148
V.4	Analyse de l'écoulement avec une densité de macro-rugosité $d_r=15\%$	153
	V.4.1 Validations des modèles numériques.....	153
	V.4.2 Etude de l'écoulement	156
	<i>V.4.2.a Influence de la présence de macro-rugosités sur l'écoulement en grande largeur (B/b=9)</i>	157
	<i>V.4.2.b Influence de la présence de macro-rugosités sur l'écoulement en petite largeur (B/b=6,67)</i>	167
	V.4.3 Influence de la présence de macro-rugosités sur les paramètres clés de l'écoulement.....	170
V.5	Influence des macro-rugosités sur le comportement des poissons	173
	V.5.1 Identification des zones de stabulations.....	173
	V.5.2 Synthèse sur les indices généraux.....	174
	V.5.3 Synthèse sur les temps de séjour et de stabulation	174
	V.5.4 Synthèse sur les trajectoires	176
V.6	Conclusion.....	176

Depuis quelques années, des macro-rugosités sont disposées sur les radiers des passes à fentes verticales. Leur implantation est inspirée des passes « naturelles » à enrochements régulièrement répartis et elles sont généralement constituées de blocs disposés uniformément sur le radier. Les macro-rugosités permettent d'adapter l'écoulement des passes à poissons à fentes verticales « classiques » (*radier lisse*) aux espèces benthiques (espèces de fond). Ce chapitre est consacré à l'étude de l'insertion de macro-rugosités dans une passe à poissons à fentes verticales. L'influence des macro-rugosités sur l'écoulement est tout d'abord analysée d'un point de vue hydraulique et cinématique par des mesures expérimentales et des simulations numériques. Pour caractériser l'effet des macro-rugosités sur le comportement de différentes espèces de poissons et sur l'efficacité du dispositif, les résultats des tests biologiques sont ensuite exposés.

V.1 Topologie de l'écoulement

Des cartographies de la topologie de l'écoulement en fonction de la largeur des bassins, de la pente et du débit ont été réalisées pour les deux densités de macro-rugosités ($d_r=10\%$ et 15%) (Figure V-1 b et c) et également rappelées pour la configuration *radier lisse* (sans macro-rugosités) (Figure V-1 a). Pour visualiser plus clairement l'influence des macro-rugosités sur l'écoulement, un quatrième graphique est proposé (Figure V-2).

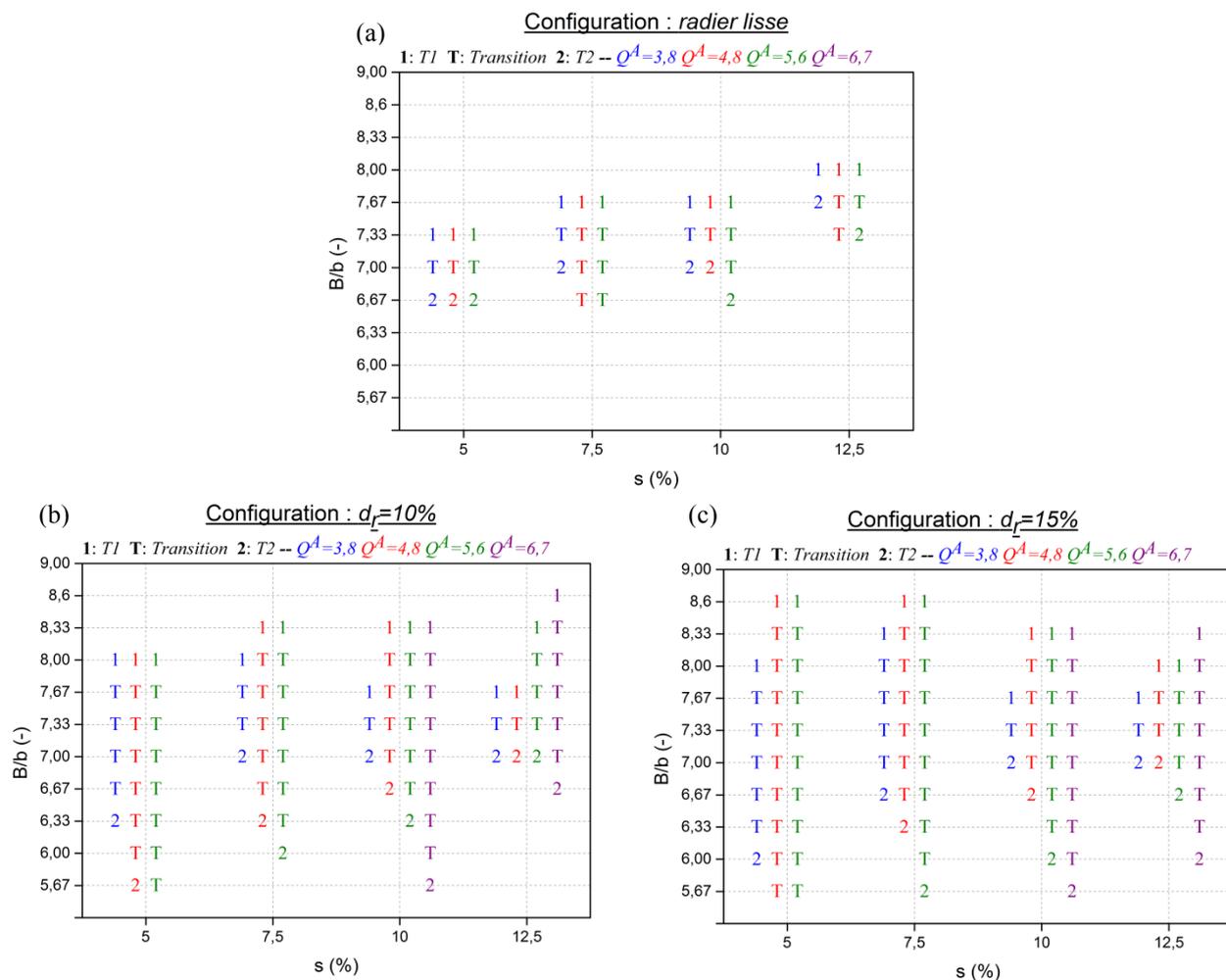


Figure V-1. Cartographies de la topologie de l'écoulement en fonction de la pente, de la largeur des bassins, du débit et de densité de macro-rugosités. (a) configuration radier lisse (Wang *et al.*, 2010), (b) configuration macro-rugosités $d_r=10\%$, (c) configuration macro-rugosités $d_r=15\%$.

Il délimite les zones de transition pour chacune des densités de macro-rugosités pour chaque paramètre. Il est à noter qu'une sortie de la zone de transition par le haut (largeur de bassin croissante) entraîne un passage en topologie de type 1, tandis qu'une sortie par le bas (largeur de bassin décroissante) entraîne une topologie de type 2. Dès lors que l'écoulement est de type 1 ou

de type 2, une augmentation ou respectivement une diminution de la largeur des bassins ne modifie plus la topologie de l'écoulement.

À l'instar de la configuration *radier lisse* (Wang *et al.*, 2010), la diminution de la largeur des bassins et l'augmentation de la pente de la passe tendent à changer la structure de l'écoulement d'un type 1 vers un type 2. L'ajout de macro-rugosités sur le radier de la passe à poissons permet d'éloigner l'établissement de la topologie de type 2 vers des largeurs de bassins plus petites. En revanche, le changement de la structure de l'écoulement du type 1 vers le type transitoire est atteint pour des largeurs de bassins plus grandes qu'en configuration *radier lisse*. En d'autres termes, la présence des macro-rugosités favorise l'écoulement de transition au détriment des topologies 1 et 2. La gamme de largeur pour laquelle l'écoulement transitoire a été mesuré est significativement plus grande lorsque la densité de macro-rugosités est augmentée. L'accroissement du débit a également une influence sur cette dernière, repoussant la topologie de type 2 vers des B/b plus faibles. En revanche, le débit a une influence moins flagrante sur le passage de la topologie de type 1 à transitoire (Figure V-2).

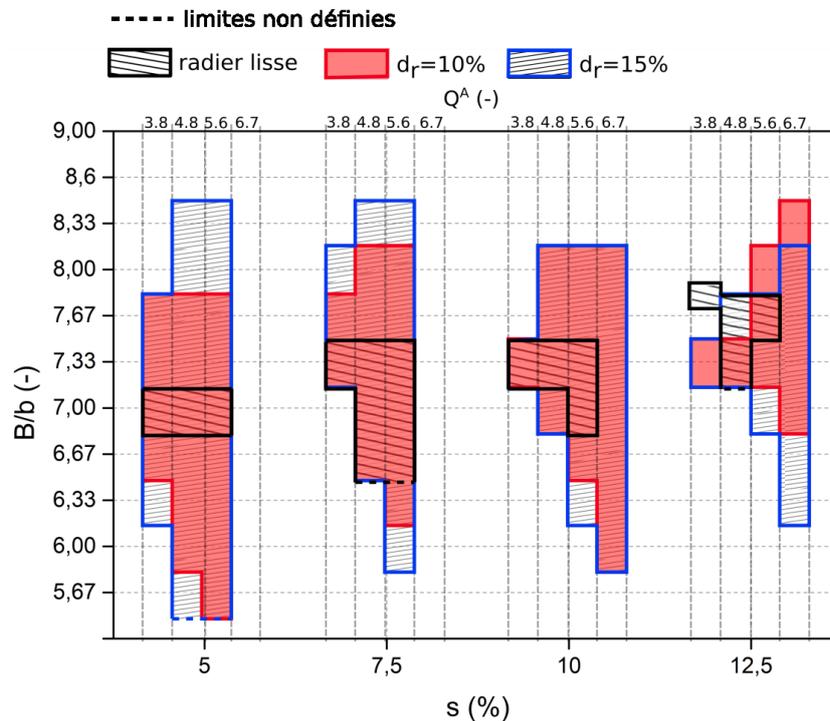


Figure V-2. Cartographies des zones de transition entre la topologie de type 1 et la topologie de type 2 en fonction de la densité de macro-rugosités.

En réduisant la largeur des bassins, la première occurrence de la topologie transitoire est atteinte en moyenne avec un décalage de largeur par rapport à la configuration *radier lisse* de $\Delta B/b = +0,4$ pour $d_r = 10\%$ et $\Delta B/b = +0,6$ pour $d_r = 15\%$. Le décalage de la topologie de type 2 est très variable. Il est plus important pour $d_r = 15\%$ que pour $d_r = 10\%$ et il augmente quand le débit augmente. Pour un débit donné, l'augmentation de la pente décale la topologie de type 2 vers de plus grandes largeurs de bassins. Dans la configuration *radier lisse*, le passage de $s = 5\%$ à $s = 12,5\%$ entraîne un décalage de la topologie de type 2 vers les plus grandes largeurs de bassins. Ce décalage $\Delta B/b$ ne dépend pas du débit et est en moyenne égal à 1. Pour les deux densités ($d_r = 10\%$ et $d_r = 15\%$) la diminution de largeur de bassin est sensiblement identique avec $\Delta B/b \approx 1$ pour $Q^A = 3,8$, $\Delta B/b = 1,33$ pour $Q^A = 4,8$ et $\Delta B/b \geq 1,33$ pour $Q^A = 5,6$. Contrairement à la configuration étudiée par Wang *et al.* (2010), le débit a donc une influence non négligeable.

V.2 Coefficient de débit

Le coefficient de débit C_d a été tracé en fonction du débit, de la pente et de la largeur des bassins pour les 2 densités de macro-rugosités ($d_r = 10\%$ et $d_r = 15\%$) et pour la configuration *radier lisse* (Figure V-3). La topologie de l'écoulement est également notée pour chacun des points mesurés.

Les incertitudes, calculées pour chaque coefficient, sont données sous la forme de barre d'erreurs. Toutes configurations confondues, le C_d varie de 0,60 +/-0,02 à 0,90 +/-0,03 avec $k=2$.

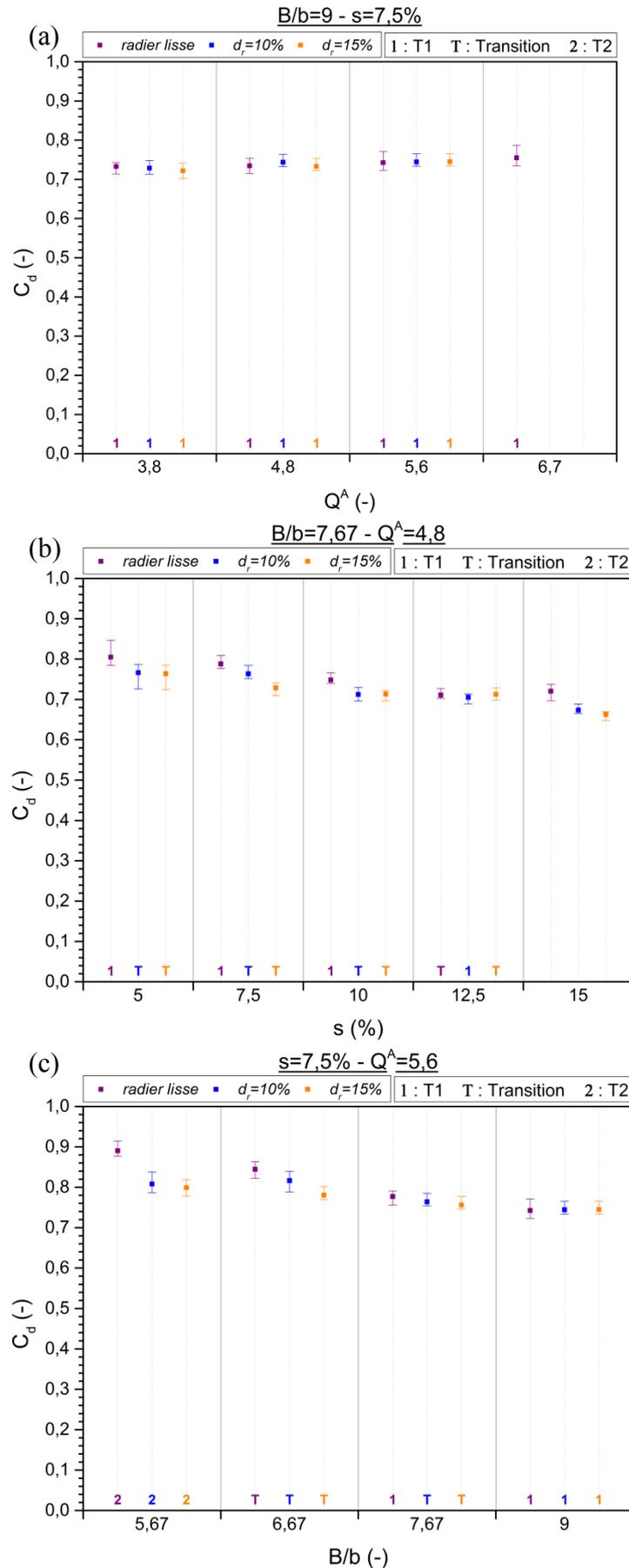


Figure V-3. Evolution du coefficient de débit pour la configuration *radier lisse* et les deux densités de macro-rugosités en fonction : (a) du débit, (b) de la pente et (c) de la largeur de bassin.

Les variations du coefficient de débit en fonction du débit, de la pente et de la largeur des bassins ont été évaluées pour la configuration *radier lisse* dans le paragraphe IV.2 .

Dans les configurations $d_r=10\%$ et 15% , le C_d n'est pas plus affecté par l'évolution du débit qu'il ne l'est dans la configuration *radier lisse* où l'impact est négligeable (Figure V-3 a). La variation moyenne est de $1\% \pm 2\%$ pour $d_r=10\%$ et $1,6\% \pm 2\%$ pour $d_r=15\%$ (avec $k=2$). L'augmentation de la pente et de la largeur des bassins (Figure V-3 b et c) en présence de macro-rugosités, entraîne, comme dans la configuration *radier lisse*, une diminution du coefficient de débit. En revanche, avec les macro-rugosités, la largeur de bassin a un impact sur la variation du C_d en fonction de la pente (Figure V-4). L'évolution moyenne du C_d entre $s=5\%$ et $s=12,5\%$ a été calculée pour chacune des quatre largeurs étudiées.

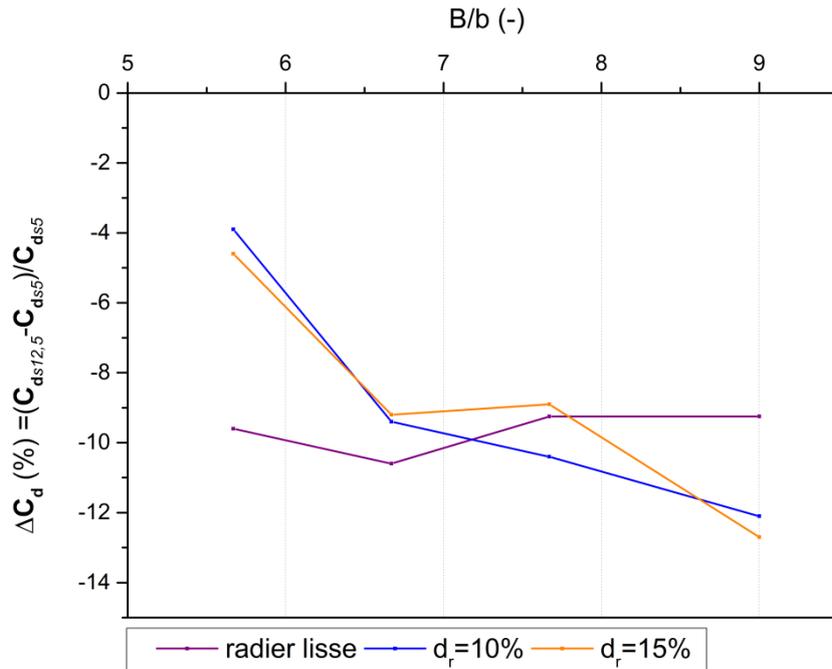


Figure V-4. Evolution de l'écart relatif entre le C_d calculé pour une pente $s=5\%$ et celui calculé pour une pente $s=12,5\%$ en fonction de la largeur des bassins et de la configuration (*radier lisse*, $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$).

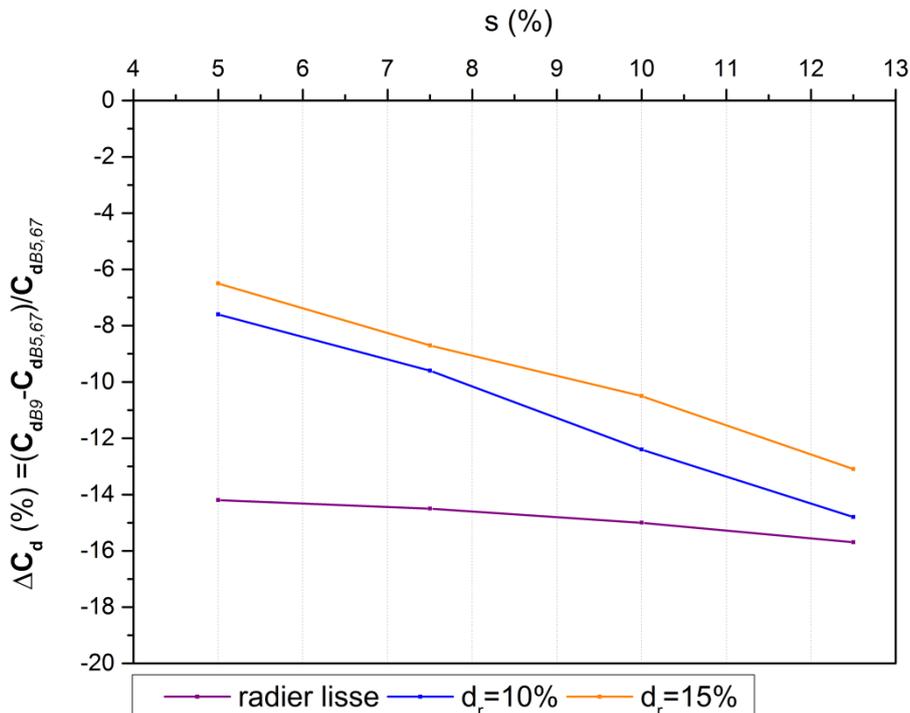


Figure V-5. Evolution de l'écart relatif entre le C_d calculé pour une largeur de bassin $B/b=5,67$ et celui calculé pour $B/b=9$ en fonction de la pente et de la configuration (*radier lisse*, $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$).

Il en ressort qu'avec les macro-rugosités, plus la largeur des bassins augmente, plus l'influence de la pente sur le coefficient de débit est importante. Par exemple (Figure V-4), pour $B/b=5,67$ la diminution relative du C_d entre $s=5\%$ et $s=12,5\%$ est de 4% environ pour $d_r=10$ et 15% contre plus de 12% pour $B/b=9$. Dans la configuration *radier lisse*, elle reste en moyenne de 10%. En d'autres termes, en présence de macro-rugosités et à faible largeur de bassin, le coefficient de débit ne sera quasiment pas impacté par un changement de pente.

Avec les macro-rugosités, plus la pente est importante, plus l'augmentation de la largeur des bassins a une influence significative sur la diminution du coefficient de débit (Figure V-5). La variation relative du C_d entre $B/b=5,67$ et $B/b=9$ pour une pente $s=5\%$ est de -14,2%, -7,6% et -6,5% respectivement dans les configurations radier lisse, $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$. Cette variation est similaire dans le cas du radier lisse à $s=12,5\%$, en revanche elle est plus significative pour $d_r=10\%$ et 15% où elle atteint respectivement 14,8% et 13,1%. En d'autres termes, en présence de macro-rugosités et à faible pente, le coefficient de débit ne sera quasiment pas impacté par un changement de largeur de bassin.

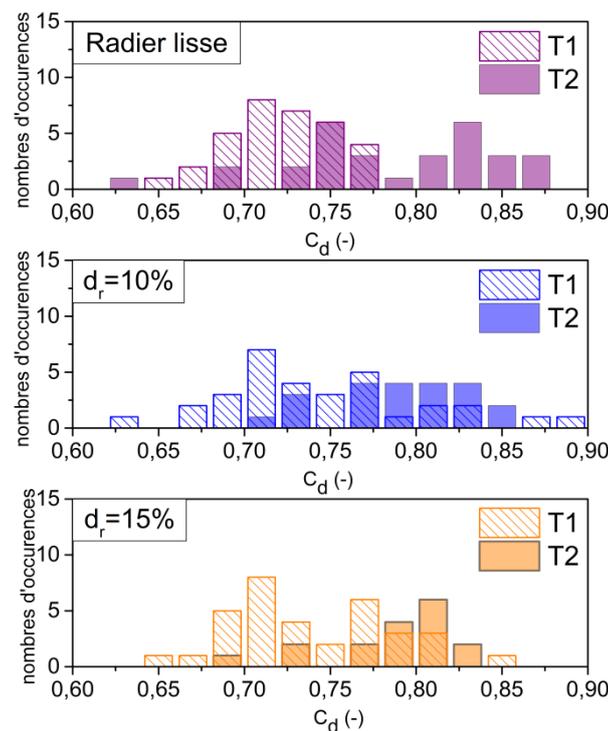


Figure V-6. Histogrammes du coefficient de débit en fonction de la topologie T1 ou T2 pour les différentes densités de macro-rugosités.

Toutes pentes, largeurs de bassins et débits confondus, la présence de macro-rugosités diminue le coefficient de débit d'en moyenne 3,5%. En moyenne, son influence est donc négligeable. Dans certaines configurations cependant (fortes pentes, faibles largeurs de bassins), les macro-rugosités peuvent générer une diminution du C_d de l'ordre de 10 à 15%.

L'influence de la topologie sur les coefficients de débit mesurés en présence de macro-rugosités n'est pas flagrante (Figure V-6), même si la topologie de type 2 garde une propension à faire augmenter le C_d .

V.3 Influence de la densité de macro-rugosités sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement

L'écoulement qui s'établit dans la passe à poissons a une topologie particulière, avec un jet issu de la fente amont et plusieurs zones de recirculation. La non-uniformité et le caractère instationnaire de l'écoulement rend difficile l'utilisation de la double moyenne habituellement utilisée pour caractériser l'écoulement au-dessus de macro-rugosités. La double moyenne

consiste à moyenner une grandeur d'abord temporellement, puis spatialement (*cf.* paragraphe I.2.2.b). Par ailleurs, les profils verticaux qui ont été réalisés au cours de cette thèse, pour chaque configuration, ne sont pas suffisants pour décrire l'écoulement au-dessus des macro-rugosités. En effet, la position des profils D et D' étant fixes par rapport au repère du bassin 3 de la passe à poissons, ils se retrouvent à des positions différentes vis-à-vis des macro-rugosités lorsque la densité change. D'autre part, la topologie de l'écoulement n'étant pas tout à fait identique suivant les configurations, il est difficile de comparer ces profils. L'étude de la sous-couche rugueuse sera donc effectuée via la simulation numérique 3D. En revanche, en ce qui concerne les profils transversaux et longitudinaux (B et E), ils sont comparés ici en fonction de la densité de macro-rugosités. Les profils B et E se situent à $Z/b=2$ du radier, soit à une distance $Z/b=1,3$ du sommet des macro-rugosités dans les configurations $d_r=10\%$ et 15% .

Pour quantifier l'influence de la densité de macro-rugosités sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement, une comparaison des profils de vitesses et d'énergies cinétiques turbulentes obtenus pour deux largeurs de bassin ($B/b=6,67$ et 9), une pente $s=7,5\%$ et un débit $Q^A=4,8$ dans les configurations *radier lisse*, $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$ est ainsi effectuée.

Lorsque $B/b=6,67$, la topologie est de type transitoire dans les trois configurations (*radier lisse*, $d_r=10\%$ et 15%). Elle est de type 1 pour $B/b=9$.

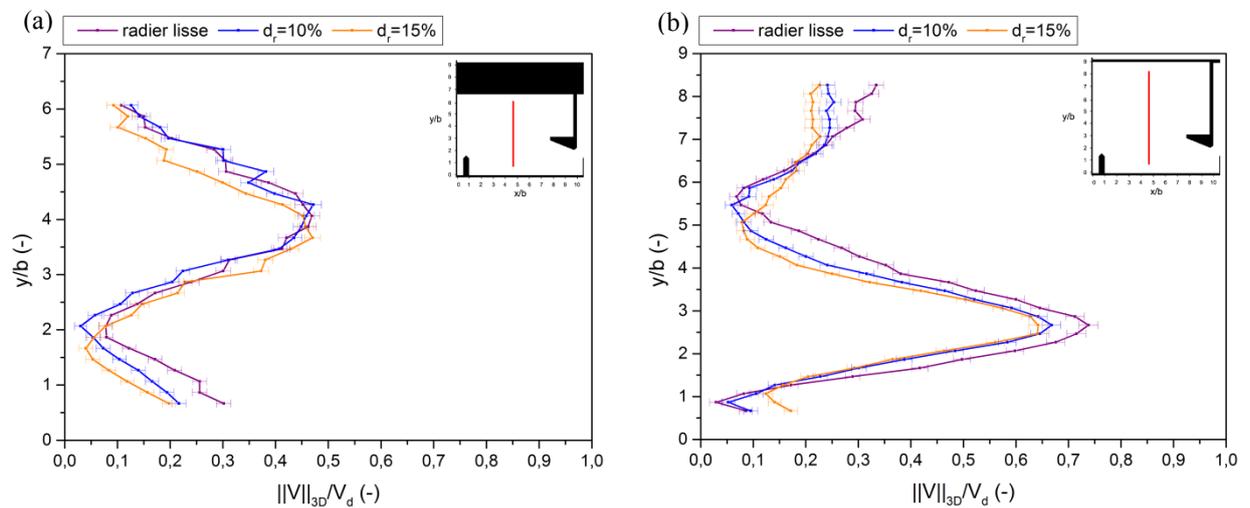


Figure V-7. Norme de la vitesse tridimensionnelle $\frac{\|V_{3D}\|}{V_d}$ en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil B. Pour $B/b=6,67$ (a) et pour $B/b=9$ (b).

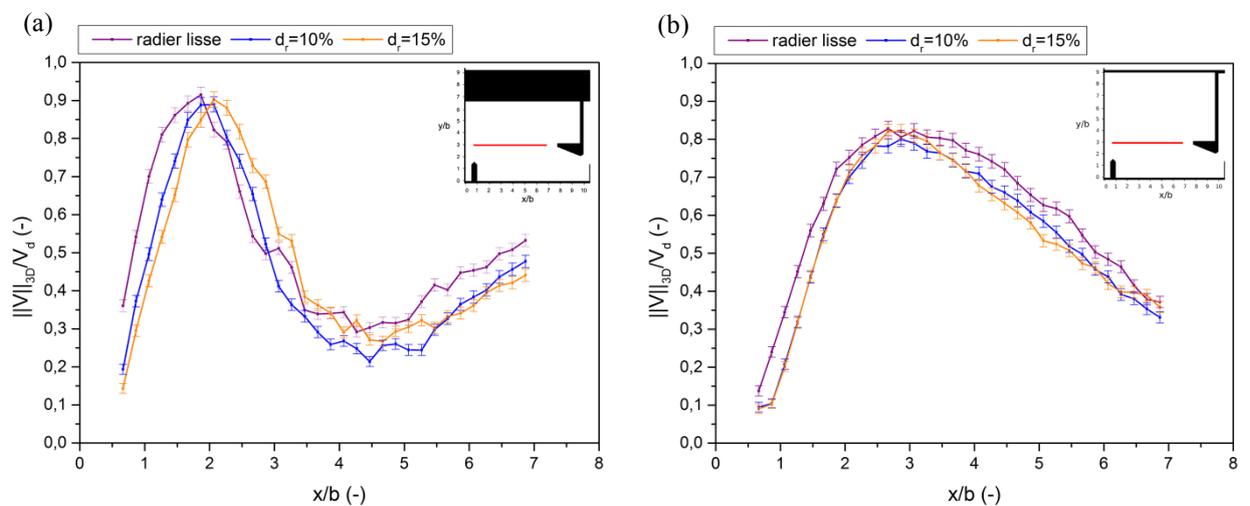


Figure V-8. Norme de la vitesse tridimensionnelle $\frac{\|V_{3D}\|}{V_d}$ en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil E. Pour $B/b=6,67$ (a) et pour $B/b=9$ (b).

Les figures V-7 et V-8 donnent les profils B et E de vitesses moyennes tridimensionnelles pour les deux largeurs de bassins étudiées. Le passage du jet dans les trois configurations (Figure V-8 b) est clairement visible entre $X/b=2$ et $X/b=4$, ce qui caractérise un écoulement de type 1. Pour $B/b=6,67$, également dans les trois configurations, le passage du jet se situe en moyenne plus près de la paroi opposée à la fente (entre $Y/b=3$ et $Y/b=5$), caractéristique d'un écoulement transitoire (Figure V-7 a).

Les profils B et E sont des profils réalisés dans un plan XY situé à $Z/b=2$ par rapport au radier ($Z/h_r=3$ en prenant la hauteur des plots en référence). À cette distance, les vitesses moyennes sont peu impactées par la présence de macro-rugosités. Il est à noter toutefois une diminution, équivalente pour les deux densités de macro-rugosités, de 13% \pm 3% (avec $k=2$) de l'intensité du jet en $Y/b=3$ (Figure V-7 b) par rapport à la configuration *radier lisse*. Pour chaque largeur de bassin, la forme des courbes tracées pour les différentes densités de macro-rugosité est identique. Cependant un léger décalage sur X existe entre les profils avec et sans macro-rugosités pour le profil E (Figure V-8 a). Ce décalage semble indiquer que le jet est en moyenne plus courbé et donc que l'angle qu'il forme par rapport à la paroi latérale en $X=0$ est en moyenne un peu plus élevé.

Les graphiques des figures V-9 et V-10 montrent les composantes d'énergie cinétique turbulente $\frac{k_u}{V_d^2}$, $\frac{k_v}{V_d^2}$, $\frac{k_w}{V_d^2}$ et $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$, respectivement pour les profils B et E dans la configuration $B/b=6,67$.

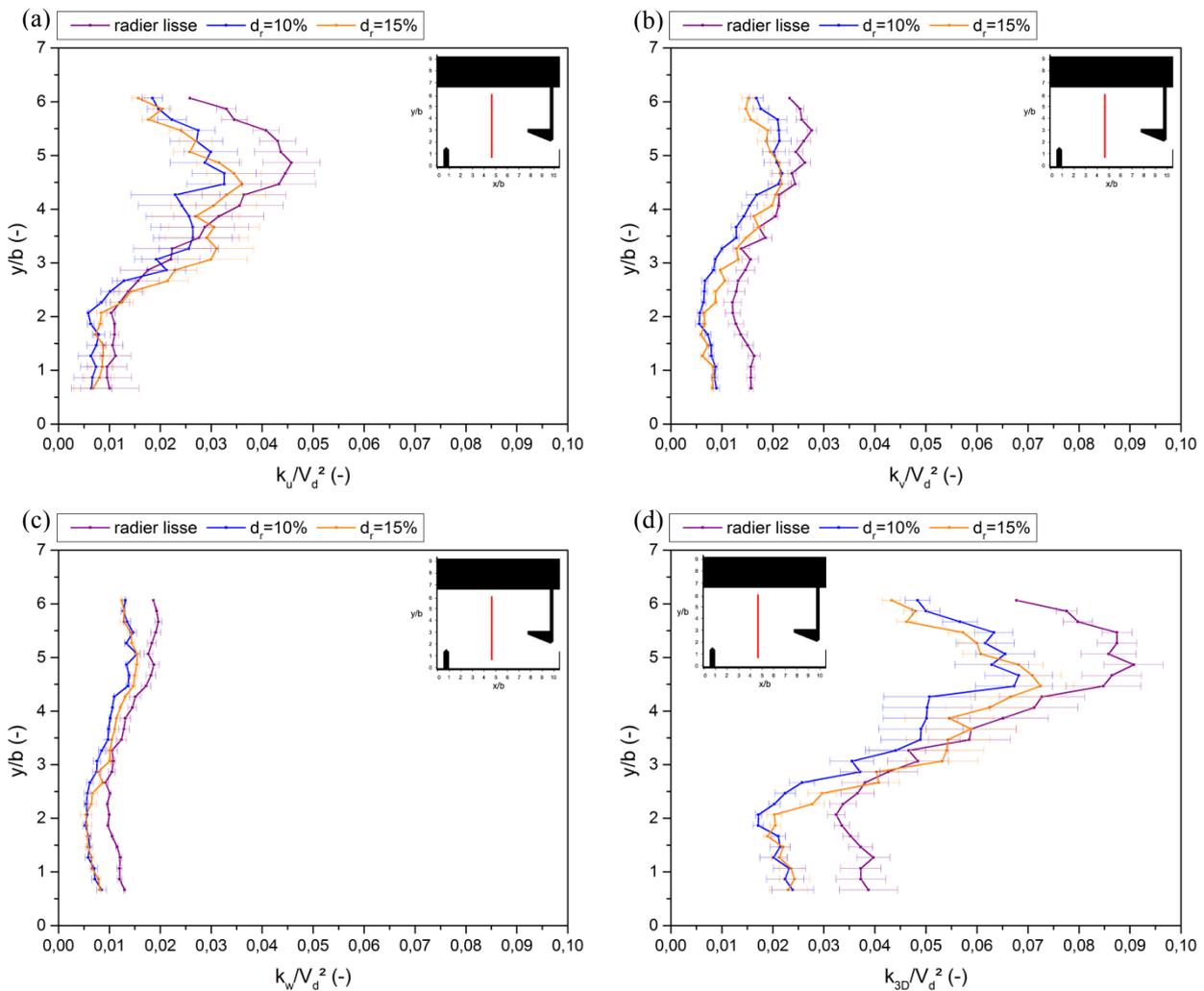


Figure V-9. Energie cinétique turbulente $\frac{k_u}{V_d^2}$, $\frac{k_v}{V_d^2}$, $\frac{k_w}{V_d^2}$ et $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$ en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil B et la largeur $B/b=6,67$.

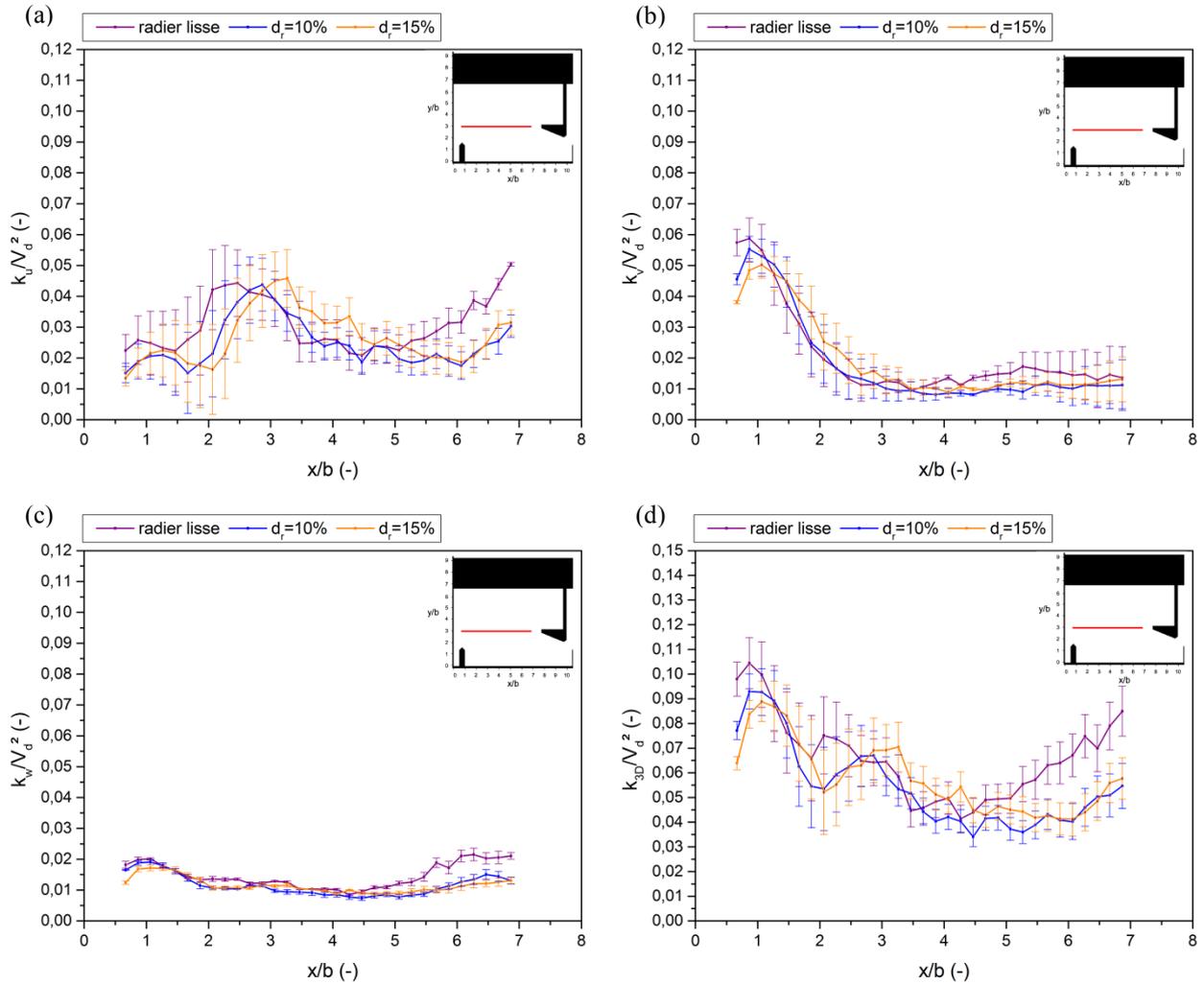


Figure V-10. Energie cinétique turbulente $\frac{k_u}{V_d^2}$, $\frac{k_v}{V_d^2}$, $\frac{k_w}{V_d^2}$ et $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$ en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil E et la largeur $B/b=6,67$.

La présence de macro-rugosités entraîne une diminution notable de $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$. Elle est particulièrement visible sur le profil B (Figure V-9). Pour les deux densités de macro-rugosités, entre $Y/b=0$ et $Y/b=2$, $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$ est réduite d'en moyenne 40% +/-7% par rapport à la configuration radier lisse. Sur l'intervalle $4 \leq Y/b \leq 6$, cette réduction est en moyenne de 26% +/-7%. Il est à noter que sur le premier intervalle, c'est la composante $\frac{k_u}{V_d^2}$ qui contribue majoritairement à la diminution de l'énergie cinétique turbulente globale $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$, alors qu'elle est équitablement répartie entre $\frac{k_v}{V_d^2}$ et $\frac{k_w}{V_d^2}$ sur le deuxième intervalle. Avec les macro-rugosités, les fluctuations longitudinales et verticales de vitesses sont également diminuées d'en moyenne respectivement 38% +/-14% et 41% +/-8% près du grand déflecteur ($X/b \geq 5,5$, Figure V-10).

En revanche, l'impact de l'augmentation de la densité de macro-rugosités est négligeable.

Pour cette largeur de bassin l'écoulement est transitoire quelle que soit la densité de macro-rugosités. La zone près de la paroi opposée à la fente ($4 \leq \frac{Y}{b} \leq 6$) est alors sujette à de grandes variations de vitesse car elle alterne entre écoulement de type 1 et écoulement de type 2. La composante de vitesse sur X est la plus impactée par ces variations, car cette partie du profil B est située sur le trajet du jet en écoulement de type 2 (forte vitesse positive) et dans la zone de recirculation dans le cas d'un écoulement de type 1 (vitesse négative). En présence de macro-rugosités, l'amplitude de ces variations semble réduite.

La partie inférieure du profil B ($0 \leq \frac{Y}{b} \leq 2$) se situe dans une zone de recirculation. La présence des macro-rugosités semble créer une contrainte, indépendante de la densité, qui diminue l'amplitude des fluctuations de vitesses verticales et transversales.

Les graphiques des figures V-11 et V-12 montrent les composantes d'énergie cinétique turbulente $\frac{k_u}{V_d^2}$, $\frac{k_v}{V_d^2}$, $\frac{k_w}{V_d^2}$ et $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$, respectivement pour les profils B et E pour la configuration $B/b=9$.

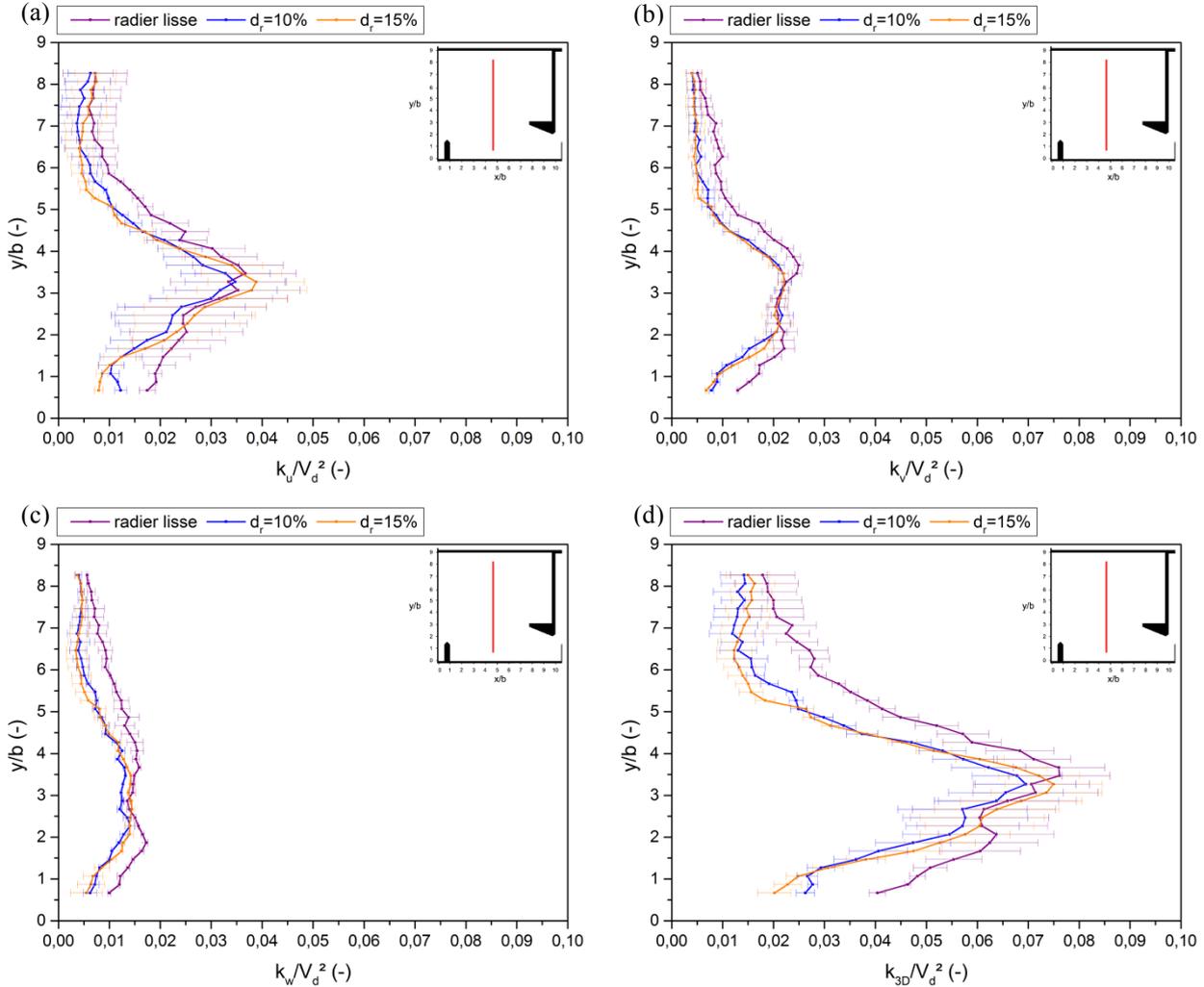


Figure V-11. Energie cinétique turbulente $\frac{k_u}{V_d^2}$, $\frac{k_v}{V_d^2}$, $\frac{k_w}{V_d^2}$ et $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$ en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil B et la largeur $B/b=9$.

En grande largeur ($B/b=9$) sur le profil B (Figure V-11), l'énergie cinétique turbulente $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$ est en moyenne réduite de 25% +/-15%. Les zones de plus fortes influences sont surtout situées de part et d'autre du jet ($Y/b \leq 2$ et ≥ 4) et les trois composantes fluctuantes contribuent équitablement à cette baisse. En revanche, en prenant en compte les incertitudes, l'influence de la présence de macro-rugosités sur $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$ est moins perceptible sur le profil E (Figure V-12). Seule la région de recirculation sur la gauche du jet en rentrant dans le bassin ($X/b \leq 2$) admet une réduction significative de 30% +/-8% d'énergie cinétique turbulente.

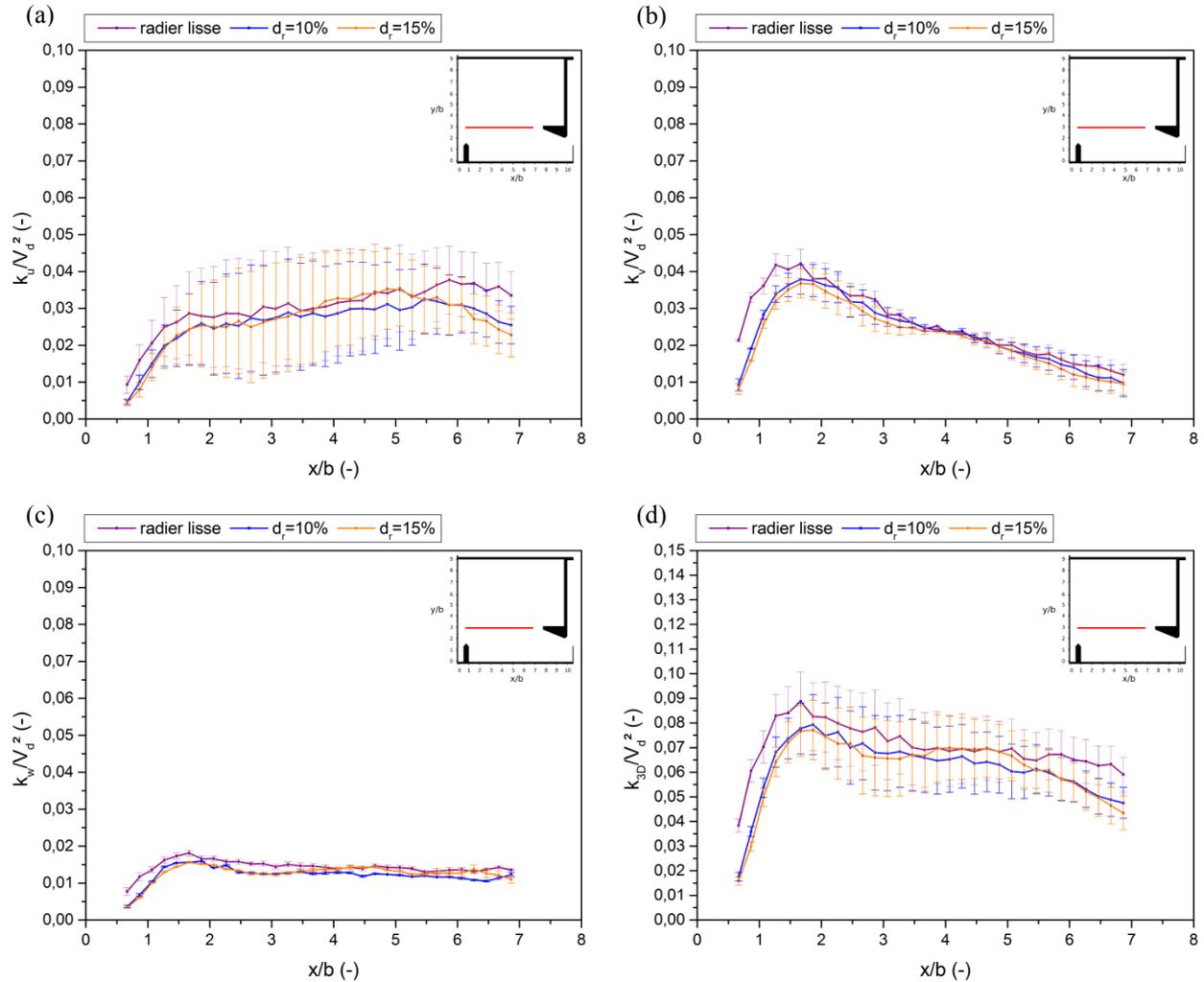


Figure V-12. Energie cinétique turbulente $\frac{k_u}{V_d^2}$, $\frac{k_v}{V_d^2}$, $\frac{k_w}{V_d^2}$ et $\frac{k_{3D}}{V_d^2}$ en fonction de la densité de macro-rugosités pour le profil E et la largeur $B/b=9$.

V.4 Analyse de l'écoulement avec une densité de macro-rugosité $d_r=15\%$

Les caractéristiques hydrauliques et les grandeurs cinématiques de l'écoulement dans la passe à poissons sont modifiées par la présence des macro-rugosités. L'étude des profils de vitesses a montré qu'à une distance $Z/h_r=3$, l'écoulement moyen était peu perturbé par ces dernières. En revanche, une diminution de l'énergie cinétique turbulente a été notée. Des données volumiques sont nécessaires pour étudier l'impact des macro-rugosités sur l'écoulement dans la passe à poissons en raison de la forte hétérogénéité de l'écoulement généré par les plots. Des simulations numériques 3D URANS et LES ont donc été effectuées dans le but de caractériser les modifications induites par la présence d'une densité de macro-rugosités $d_r=15\%$.

V.4.1 Validations des modèles numériques

Une étude comparative est menée dans le but de déterminer la méthode de simulation (URANS ou LES) la plus adaptée à la modélisation de l'écoulement dans la passe à poissons munie de macro-rugosités de densité $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$ et 9 , $s=7,5\%$ et $Q^4=4,8$.

Les profils de vitesses et d'énergie cinétique turbulente, obtenus expérimentalement (ADV) et par les simulations (URANS et LES) pour une largeur de bassin $B/b=9$, ont été tracés sur la figure V-13.

Dans la configuration grande largeur ($B/b=9$), la topologie de l'écoulement est de type 1 lorsque $d_r=15\%$. Cette topologie est correctement reproduite par les deux types de modélisation.

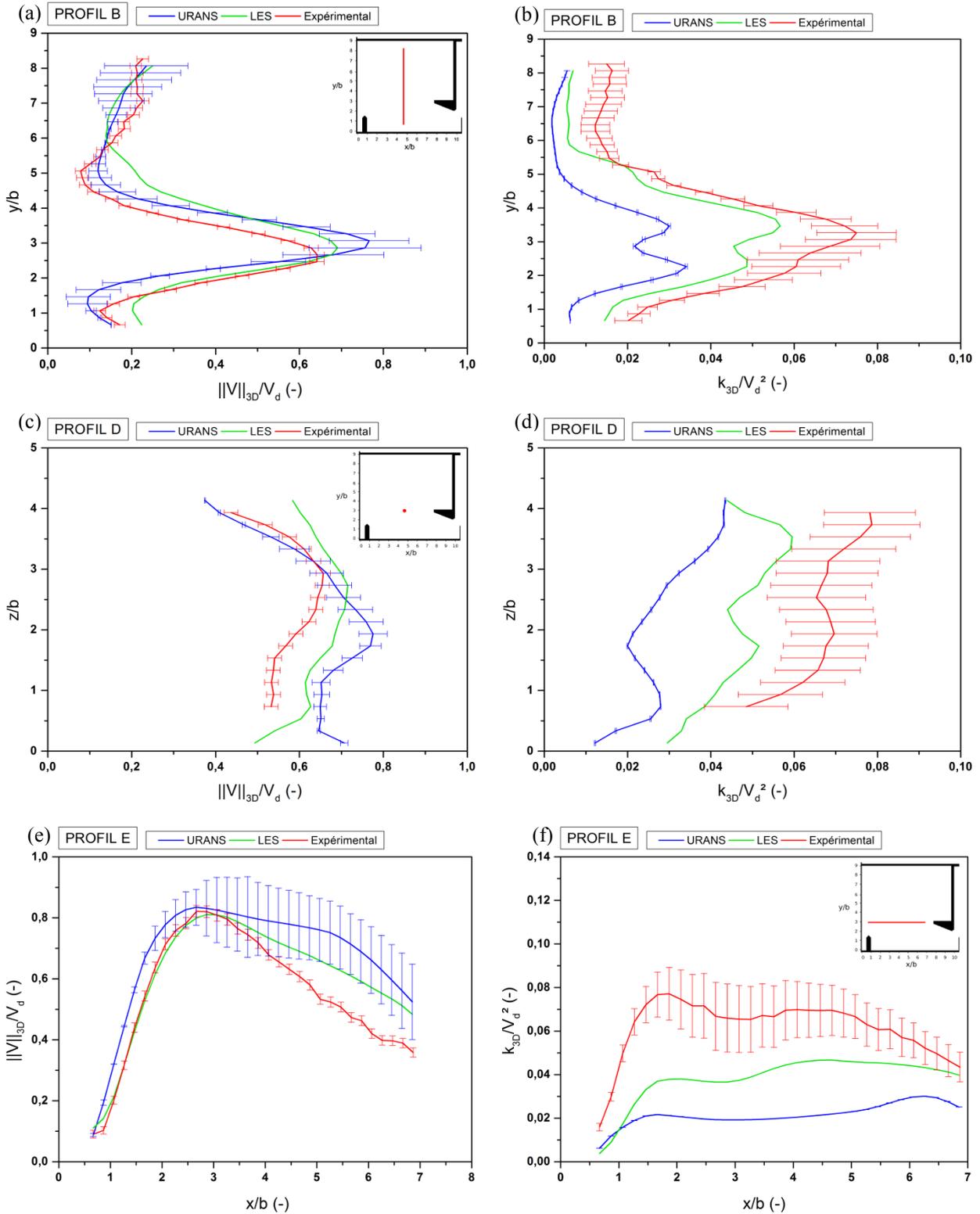


Figure V-13. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=9$ avec $d_r=15\%$ pour les profils B, D et E. À gauche : norme de la vitesse 3D adimensionnée, à droite : énergie cinétique 3D adimensionnée.

Les profils de vitesses moyennes B et E ont des formes semblables à celles obtenues expérimentalement ($r^2 > 0,87$ pour l'URANS et $r^2 > 0,89$ pour la LES). Le passage du jet est correctement positionné, cependant les deux méthodes surestiment son intensité (+7,8% en LES et +18% en URANS). Le long de la colonne d'eau, sur le profil D, la LES représente mieux les variations de l'écoulement moyen que l'URANS ($r^2 = 0,56$ en URANS et 0,91 en LES). En revanche, l'écart-type moyen par rapport au profil expérimental est équivalent pour les deux méthodes ($\sigma_m \approx 15\%$). L'énergie cinétique turbulente est quant à elle beaucoup mieux modélisée en LES qu'en URANS, et ce, quel que soit le profil étudié. En moyenne sur les trois profils, l'URANS sous-estime l'énergie cinétique turbulente de 60% par rapport aux profils

expérimentaux, contre 30% pour la LES. D'autre part, la LES reproduit également mieux l'allure générale des profils, avec des coefficients de corrélation toujours supérieurs à ceux obtenus avec l'URANS. Les écarts-types relatifs moyens σ_m et les coefficients de corrélation r^2 sont donnés dans le tableau 14.

		Profil B		Profil D		Profil E	
		σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)
$\frac{\ V\ _{3D}}{V_d}$	URANS	28,8	0,87	15,7	0,56	22,6	0,92
	LES	28,5	0,89	14,2	0,91	11,3	0,95
$\frac{k_{3D}}{V_d^2}$	URANS	66,0	0,95	55,4	0,55	65,0	0,26
	LES	28,8	0,98	27,0	0,74	38,0	0,64

Tableau 14 : Ecarts-types relatifs moyens et coefficients de corrélations calculés entre les profils de vitesses et d'énergies cinétiques turbulentes issus des simulations numériques et ceux issus des mesures expérimentales. Configuration : $d_r=15\%$ et $B/b=9$.

Les résultats obtenus en LES sont globalement toujours plus proches des résultats expérimentaux que ne le sont ceux issus de la simulation URANS. L'étude de l'écoulement en présence de macro-rugosités se fera donc par la suite, à partir des résultats obtenus en LES. Il est à noter que les vitesses moyennes sont légèrement surestimées et que l'énergie cinétique est en moyenne sous-estimée de 30% environ. Cependant la topologie globale et la répartition des grandeurs cinématiques sont cohérentes avec celles obtenues expérimentalement.

Dans la configuration $B/b=6,67$ (Figure V-14), la topologie de l'écoulement est de type transitoire. Cette topologie est correctement modélisée par la méthode LES contrairement à la méthode URANS. En URANS, la topologie modélisée est clairement de type 1. D'une part, sur le profil B l'intensité maximale du jet est située en $Y/b=3$. D'autre part, le jet suit le profil E contrairement au cas transitoire ou au type 2 où une perte de vitesse importante est perceptible pour $X/b>2$. Les écarts sont donc importants entre les profils de vitesse moyenne et d'énergie cinétique turbulente obtenus en URANS et ceux obtenus expérimentalement. Globalement, la simulation LES surestime la vitesse moyenne, notamment sur le profil B avec un écart-type relatif moyen σ_m par rapport à l'expérimental de 54%. En revanche, les coefficients de corrélation sont très bons ($r^2>0,88$) indiquant une bonne répartition des vitesses le long des trois profils étudiés.

		Profil B		Profil D		Profil E	
		σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)	σ_m (%)	r^2 (-)
$\frac{\ V\ _{3D}}{V_d}$	URANS	28,8	0,87	15,7	0,56	22,6	0,92
	LES	28,5	0,89	14,2	0,91	11,3	0,95
$\frac{k_{3D}}{V_d^2}$	URANS	66,0	0,95	55,4	0,55	65,0	0,26
	LES	28,8	0,98	27,0	0,74	38,0	0,64

Tableau 15 : Ecarts-types relatifs moyens et coefficients de corrélations calculés entre les profils de vitesses et d'énergies cinétiques turbulentes issus des simulations numériques et ceux issus des mesures expérimentales. Configuration : $d_r=15\%$ et $B/b=6,67$.

L'énergie cinétique turbulente est également mieux modélisée par la méthode LES que par la méthode URANS. Elle s'écarte cependant des résultats expérimentaux sur le profil E entre $X/b=0,5$ et $3,5$ où le battement du jet est sous-estimé. Cette tendance se retrouve également pour $Z/b>3$ sur le profil D. Les écarts-types relatif moyens σ_m et les coefficients de corrélation r^2 sont donnés dans le tableau 15.

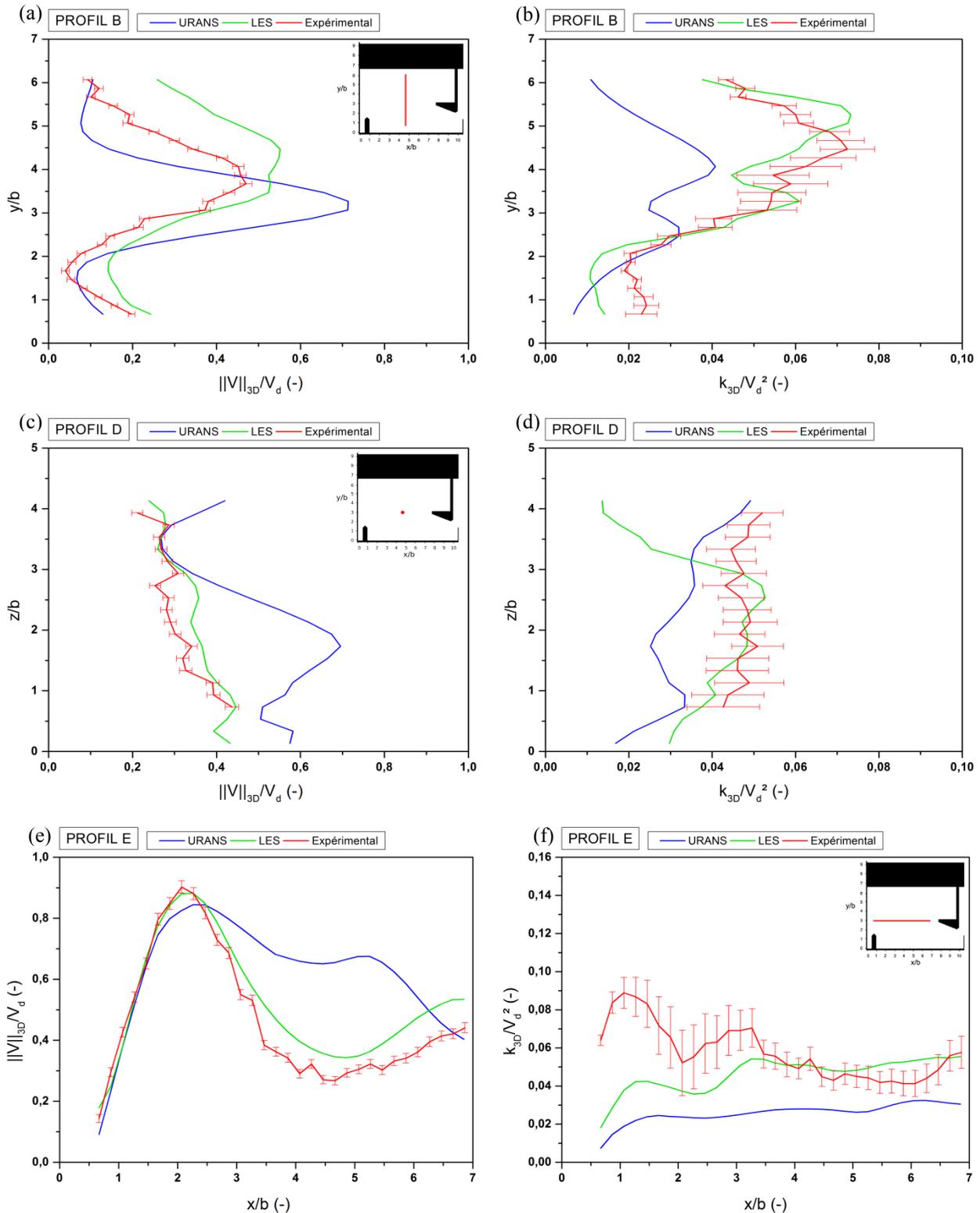


Figure V-14. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour $B/b=6,67$ avec $d_r=15\%$ pour les profils B, D et E. À gauche : norme de la vitesse 3D adimensionnée, à droite : énergie cinétique 3D adimensionnée.

Globalement, la simulation LES modélise de façon plus juste les grandeurs cinématiques de l'écoulement dans la configuration $B/b=6,67$ et $d_r=15\%$.

En conclusion, la méthode LES sera utilisée pour étudier l'écoulement dans la passe à poissons avec une densité de macro-rugosités $d_r=15\%$ et ce pour les deux largeurs $B/b=6,67$ et 9.

V.4.2 Etude de l'écoulement

Dans cette partie, les simulations numériques réalisées en LES ont été utilisées pour analyser l'écoulement généré au-dessus et dans les macro-rugosités pour deux largeurs de bassins :

$B/b=6,67$ et 9 . Dans ce paragraphe, la description de l'écoulement se fera en utilisant essentiellement l'adimensionnement par rapport à la hauteur des rugosités Z/h_r pour faciliter les comparaisons avec les résultats issus de la littérature. L'étude numérique qui suit, a été réalisée pour deux largeurs de bassin ($B/b=6,67$ et 9), $d_r=15\%$, une pente $s=7,5\%$ et un débit $Q^A=4,8$.

V.4.2.a Influence de la présence de macro-rugosités sur l'écoulement en grande largeur ($B/b=9$)

L'analyse des champs de vitesses moyens obtenus dans la configuration *radier lisse* (cf. paragraphe IV.4.2), a montré que l'écoulement était essentiellement bidimensionnel et que sa topologie ne variait pas en fonction des bassins (Figure IV-15). Pour visualiser l'effet des macro-rugosités sur l'écoulement, les champs de vitesses moyens ont été représentés sur différents plans horizontaux, positionnés en $Z/h_r=0,75$; $1,2$ et $4,5$, et au milieu des fentes dans des plans inclinés à 45° (Figure V-15).

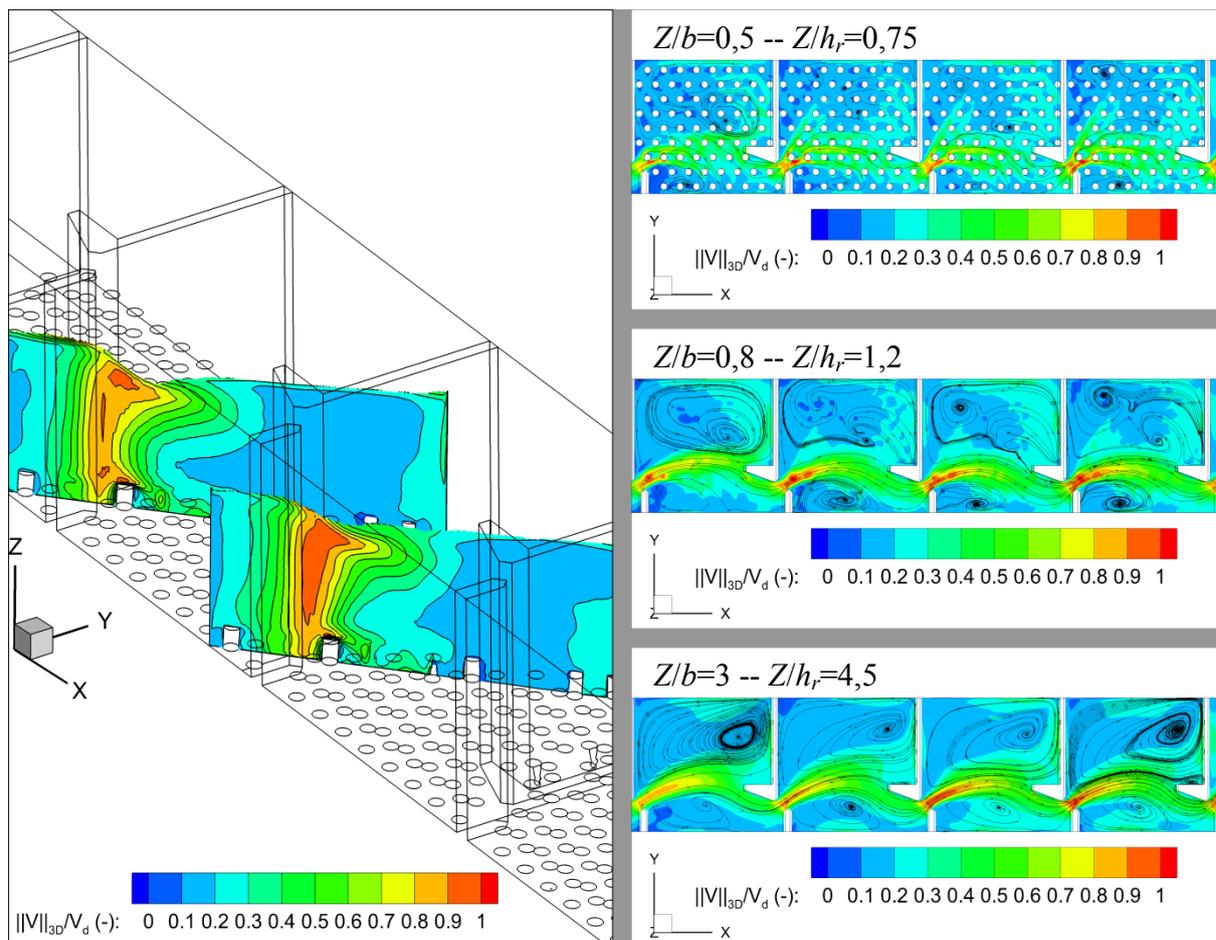


Figure V-15. Champs de vitesses moyens en configuration $d_r=15\%$ pour $B/b=9$. À gauche : plans de coupe au milieu des fentes 2 et 3 (à 45°) ; à droite : plans de coupe horizontaux à $Z/b=0,5$; $0,8$ et 3 équivalents respectivement à $Z/h_r=0,75$; $1,2$ et $4,5$.

Sur le plan le plus éloigné du radier ($Z/h_r=4,5$), la topologie (type 1) de l'écoulement est identique d'un bassin à un autre, avec un jet qui a une forme courbe générant deux zones de recirculation contrarotatives sur sa gauche et sur sa droite. Le tourbillon supérieur est déformé par rapport à la configuration *radier lisse* et son centre tourbillonnaire est décalé vers l'aval. En $Z/h_r=1,2$, l'écoulement est globalement identique dans chaque bassin. En revanche, il apparaît plus perturbé, notamment au niveau du tourbillon supérieur dont la forme est moins bien définie. Les topologies moyennes et les ordres de grandeurs des valeurs de vitesses obtenues sur ces deux plans sont comparables à celles mesurées en PIV par Bourtal (2012). Le plan $Z/h_r=0,75$ permet de visualiser l'écoulement moyen existant au sein des rugosités, dans la canopée. En rencontrant le premier plot, le jet se scinde en deux parties non symétriques. La partie principale du flux est dirigée sur la droite du premier plot, directement vers le second plot situé sur la même ligne, où

il se divise alors encore en deux parties, mais plutôt symétriques cette fois. Il poursuit ensuite son trajet vers la fente aval en empruntant les allées formées par l'alignement des plots. L'autre partie du flux est dirigée sur la gauche du premier plot, en direction de la paroi opposée à la fente. Il rencontre alors d'autres plots, alignés sur une diagonale passant par le milieu du premier plot et orientée à 60° par rapport à l'axe longitudinal. Le jet est ainsi éclaté sur une grande partie de la surface disponible dans la canopée, générant de nombreuses zones de sillages facilitant la dissipation de l'énergie cinétique. Les isocontours de vitesses moyennes tracés dans les plans passant par le milieu des fentes (Figure V-15), permettent de mettre en évidence que le jet subit des variations d'orientation plus importantes sur la colonne d'eau dans cette configuration que dans le cas d'un radier lisse.

Pour mieux comprendre comment la structure de l'écoulement moyen est impacté par la présence des macro-rugosités, l'évolution de la position spatiale des cœurs tourbillonnaires des principales zones de recirculation a été représentée sur les figures V-16 et V-17, respectivement pour les configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$.

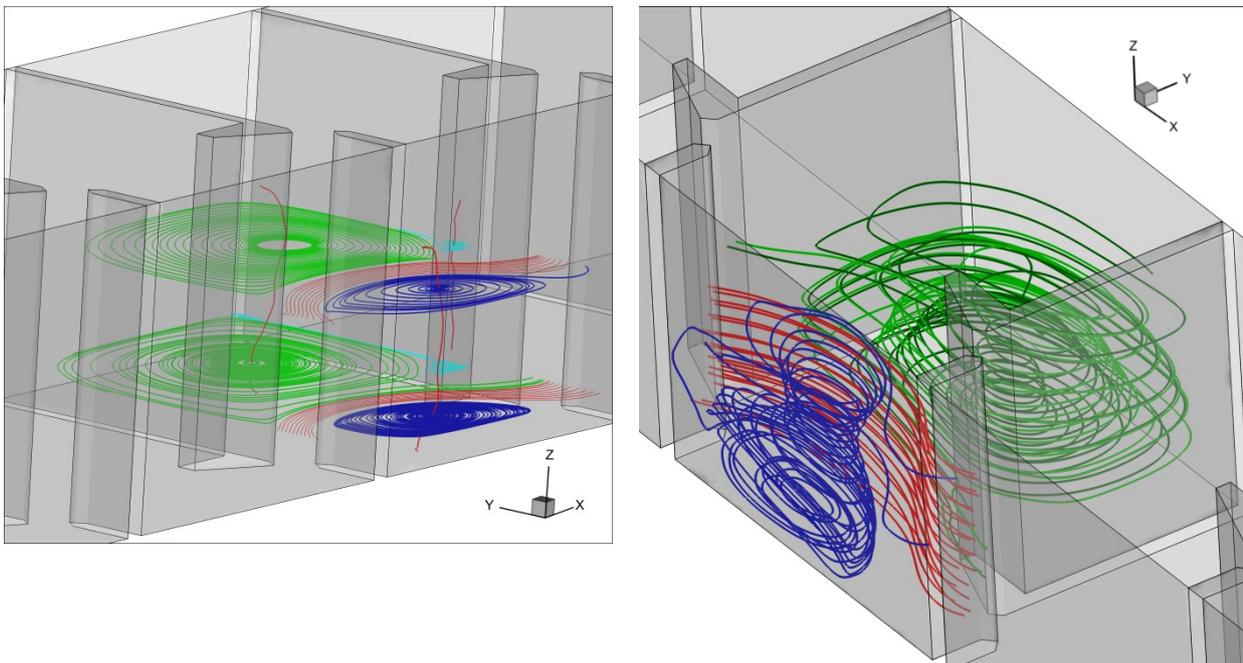


Figure V-16. Evolution de la position des cœurs tourbillonnaires (en rouge) des principales zones de recirculation dans la configuration *radier lisse*. Les lignes de courant issues du champ moyen de vitesse sont tracées en vert pour montrer l'évolution spatiale de la zone de recirculation supérieure, en rouge pour le jet, en bleu foncé pour la zone de recirculation inférieure et en bleu clair pour la petite zone de recirculation située derrière le déflecteur central.

Dans la configuration *radier lisse*, la bidimensionnalité de l'écoulement est confirmée, avec des structures tourbillonnaires dont les centres restent sur un axe vertical. En revanche, dans la configuration $d_r=15\%$, si l'axe du tourbillon inférieur est également vertical, celui du tourbillon supérieur est fortement incliné, jusqu'à devenir horizontal à l'approche des macro-rugosités. Cette évolution montre une modification importante de l'écoulement moyen, qui se tridimensionnalise bien au-delà de la zone d'influence de la canopée. Le jet reste cependant en moyenne bidimensionnel, mais alimente la zone de recirculation supérieure en plongeant vers le déflecteur central à cause notamment du gradient de vitesse important induit par la présence des macro-rugosités.

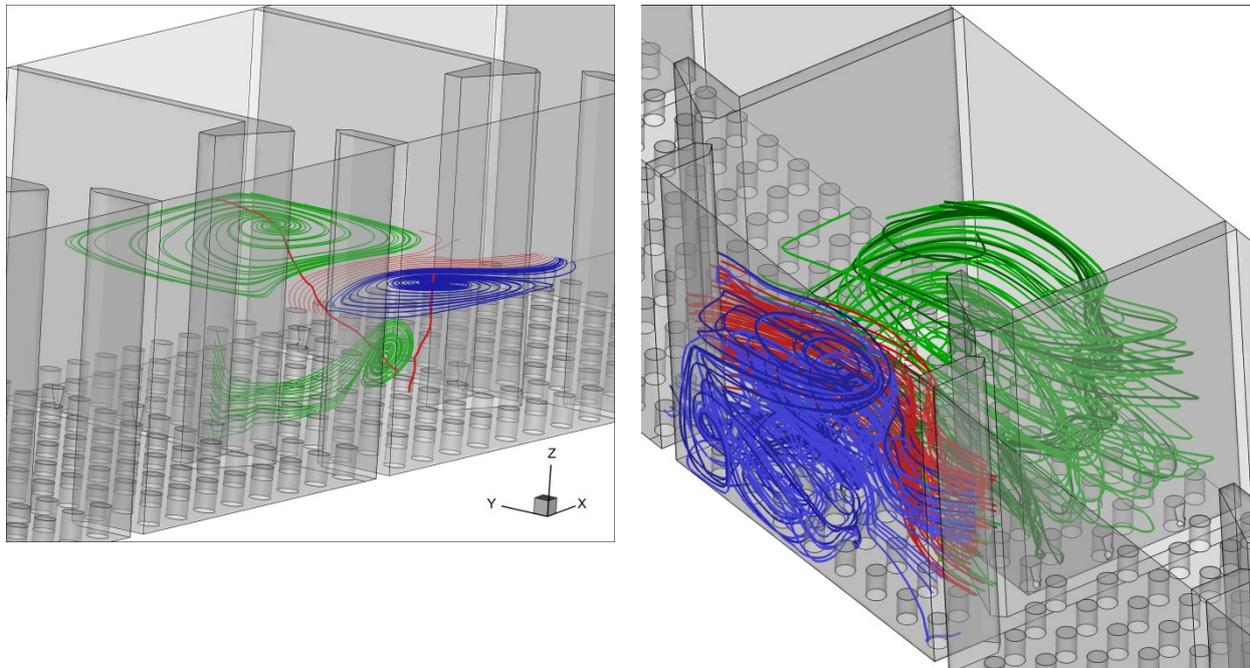


Figure V-17. Evolution de la position des cœurs tourbillonnaires (en rouge) des principales zones de recirculation dans la configuration $d_r=15\%$. Les lignes de courant issues du champ moyen de vitesse sont tracées en vert pour montrer l'évolution spatiale de la zone de recirculation supérieure, en rouge pour le jet et en bleu pour la zone de recirculation inférieure.

De manière à caractériser l'influence éventuelle des rugosités sur la structure du jet, une analyse similaire à celle de Liu *et al.* (2006) et Tarrade (2007) a été menée. Pour caractériser le jet, la ligne d'écoulement principal correspondant à la ligne centrale et directrice du jet a tout d'abord été tracée. Un repère lié à cette ligne a ensuite été défini, dont l'origine se situe au milieu de la fente. L'abscisse x_j définit la distance le long de la ligne centrale du jet, tandis que y_j correspond à la distance dans la direction transversale orthogonale à x_j . Sur la ligne centrale, y_j est égal à 0. La figure V-18 donne la forme de la ligne centrale du jet et les positions des profils transversaux.

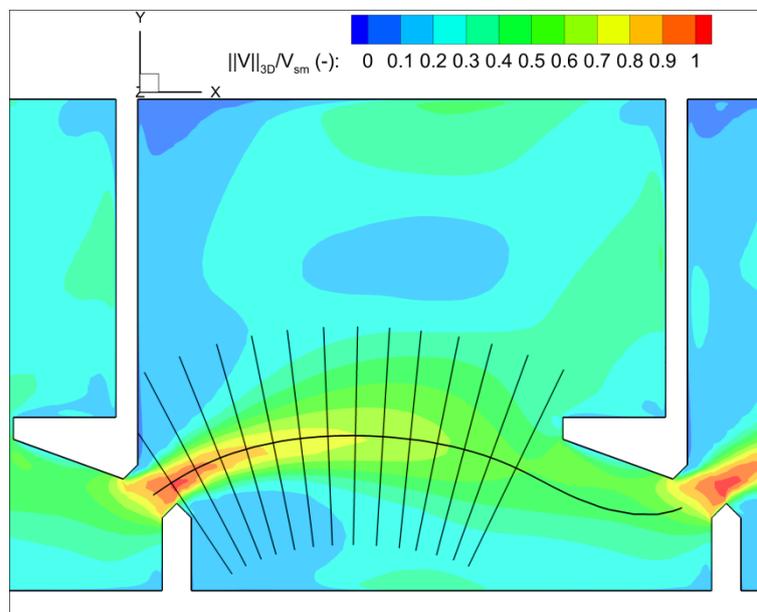


Figure V-18. Champ de vitesses moyen adimensionné par la vitesse maximale dans le jet (V_{sm}) et position de la ligne centrale du jet et des profils de vitesses transversaux.

Pour permettre d'effectuer la comparaison des profils de vitesses dans le jet de chacune des configurations (*radier lisse* et $d_r=15\%$), les champs de vitesses ont été adimensionnés par la valeur maximale de la vitesse (V_{sm}) obtenue sur la ligne centrale du jet pour chaque simulation. Dans la littérature, la frontière du jet (épaisseur de diffusion transversale) est souvent définie comme étant la valeur de y_j à partir de laquelle la vitesse du jet U_j atteint la moitié de la vitesse

maximale U_{jmax} dans chaque section. D'autre part, pour prendre en compte l'asymétrie du jet, lorsqu'elle existe, par rapport à la ligne centrale, Liu *et al.* (2006) ont défini les demi-largeurs b_- et b_+ , respectivement à gauche et à droite du jet en regardant vers l'aval. L'évolution de la largeur du jet et du profil de vitesse suivant x_j est tracée sur la figure V-19. Dans la configuration *radier lisse*, l'asymétrie décrite par Liu *et al.* (2006) est retrouvée. La demi-largeur b_+ atteint des valeurs plus faibles en raison du confinement plus important due à la présence de la zone de recirculation inférieure et de la paroi.

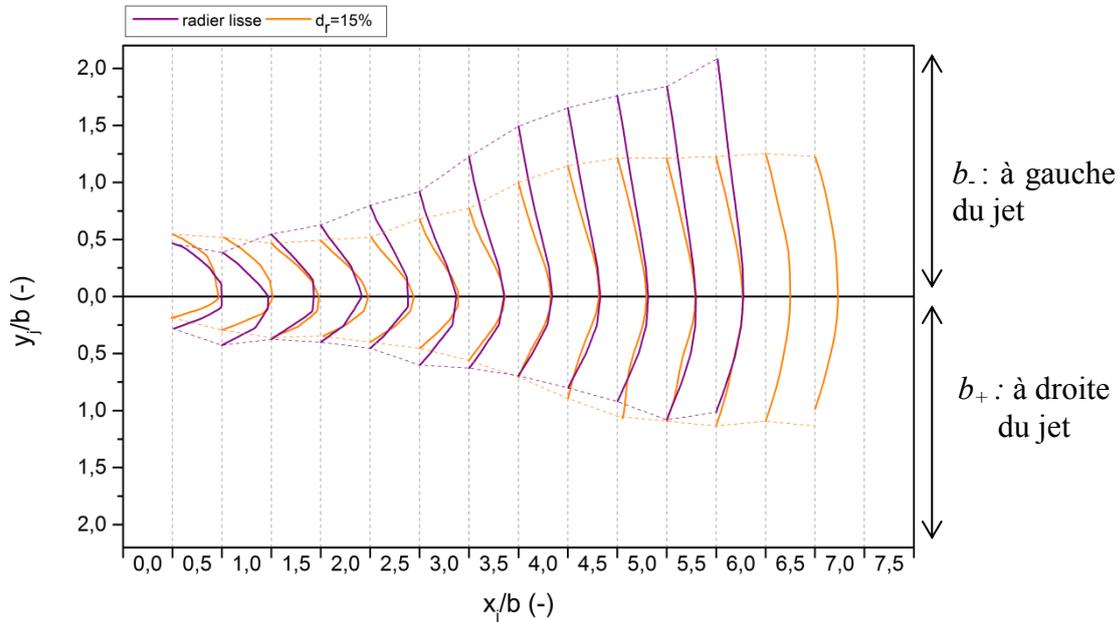


Figure V-19. Evolution de la largeur du jet et du profil de vitesse moyen en fonction de x_j dans les configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$ pour $B/b=9$.

Cette demi-largeur évolue de manière sensiblement identique pour les deux configurations. Par ailleurs, pour $d_r=15\%$, la largeur du jet est symétrique par rapport à la ligne centrale. La zone de recirculation supérieure semble confiner le jet et le contraindre dans son expansion.

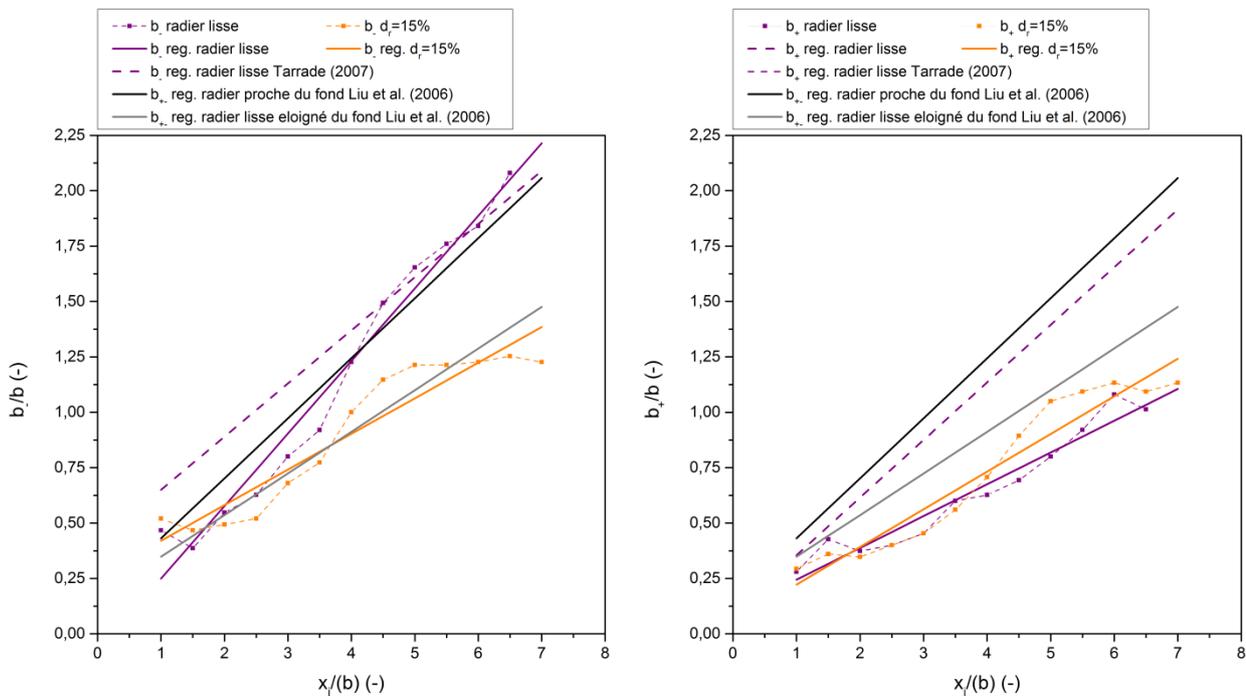


Figure V-20. Evolution de la demi-largeur du jet en fonction de x_j dans les configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$ et comparaison avec les régressions proposées par Liu *et al.* (2006) et Tarrade (2007). À gauche, demi-largeur b_- ; à droite demi-largeur b_+ .

La largeur b_- atteint donc des valeurs plus faibles que dans la configuration *radier lisse*.

Les évolutions des demi-largeurs b_+ et b_- ont été comparées aux valeurs obtenues dans la littérature sur la figure V-20.

Liu *et al.* (2006) ont estimé que le jet était symétrique mais que sa largeur dépendait de la distance qui le séparait du fond. Ils ont donc proposé deux régressions linéaires, une décrivant l'évolution de la demi-largeur du jet près du radier et une éloignée. Tarrade (2007) a pris en compte la dissymétrie et a proposé une régression linéaire pour chacune des demi-largeurs b_+ et b_- . Les mesures effectuées ici montrent que l'évolution de b_- dans la configuration *radier lisse* est relativement proche de la loi proposée par Liu *et al.* (2006) dans le cas où le jet est proche du fond. En ce qui concerne la configuration $d_r=15\%$, cette évolution est bien représentée par la loi établie loin du fond. Ces caractéristiques semblent étonnantes, car au-dessus d'une canopée, l'écoulement est considéré comme étant « décalé » d'une distance de déplacement d par rapport au fond (Raupach *et al.*, 1991). En d'autres termes, dans la configuration $d_r=15\%$, le fond virtuel perçu par les grandes structures de l'écoulement se comporte comme si le plan d'observation était plus proche du radier. L'évolution des demi-largeurs b_+ est moins bien représentée par les régressions issues de la littérature.

	<i>Radier lisse</i>		$d_r=15\%$	
	Expression	R ² (-)	Expression	R ² (-)
$\frac{b_-}{b}$	$0,327 \cdot \frac{x_j}{b} - 0,078$	0,97	$0,161 \cdot \frac{x_j}{b} - 0,260$	0,90
$\frac{b_+}{b}$	$0,143 \cdot \frac{x_j}{b} + 0,101$	0,94	$0,170 \cdot \frac{x_j}{b} + 0,052$	0,93

Tableau 16 : Expressions de l'évolution des demi-largeurs du jet dans les configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$.

Les expressions obtenues à partir des régressions linéaires effectuées sur les demi-largeurs en configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$ sont fournies dans le tableau 16.

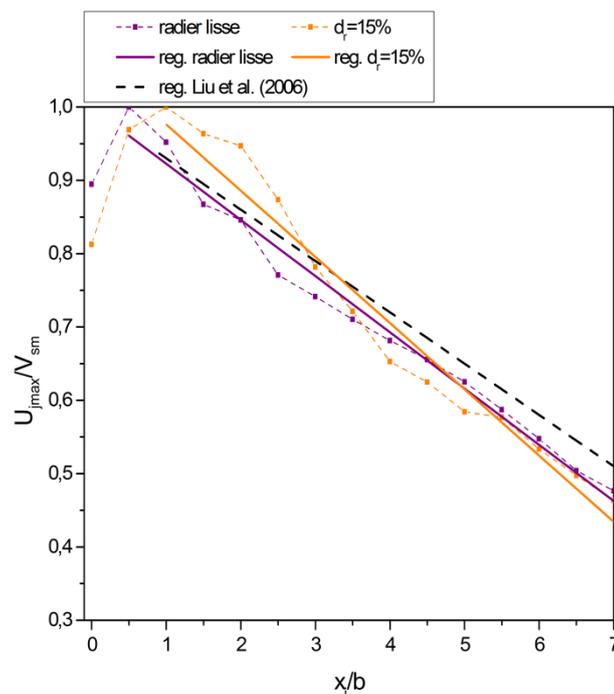


Figure V-21. Evolution de la vitesse maximale U_{jmax} dans le jet en fonction de x_j dans les configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$ pour $B/b=9$.

Une autre caractéristique intéressante concerne l'évolution de la vitesse maximale du jet U_{jmax} en fonction de x_j . Liu *et al.* (2006) ont montré que la décroissance de U_{jmax} le long de la ligne centrale du jet était plus forte que celle observée dans le cas d'un jet plan turbulent et qu'elle

commençait lorsque U_{jmax} était maximale, en $x_j/b=0,875$, contre 1,25 pour Tarrade (2007). Les résultats obtenus dans la configuration *radier lisse* et $d_r=15\%$ prédisent une vitesse maximale atteinte respectivement en $x_j/b \approx 0,5$ et 1 (Figure V-21).

La décroissance linéaire proposée par Liu *et al.* (2006) décrit relativement bien l'évolution de U_{jmax} en fonction de x_j observée pour les deux configurations. Les macro-rugosités n'ont *a priori* pas une grande influence sur cette décroissance comme le prouvent les faibles différences entre les coefficients des régressions linéaires appliquées sur les données de chacune des configurations (Tableau 17).

	<i>Radier lisse</i>		$d_r=15\%$	
	Expression	R ² (-)	Expression	R ² (-)
$\frac{U_{jmax}}{V_{sm}}$	$0,999 - 0,077 \cdot \frac{x_j}{b}$	0,96	$1,067 - 0,090 \cdot \frac{x_j}{b}$	0,87

Tableau 17 : Expressions de l'évolution de la vitesse maximale U_{jmax} dans le jet en fonction de x_j dans les configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$ pour $B/b=9$.

Afin d'obtenir une représentation verticale de l'écoulement au-dessus et à l'intérieur d'une canopée, où la dispersion spatiale est importante, les champs instantanés sont doublement moyennés (Raupach *et al.*, 1991 ; Nikora *et al.*, 2007a ; Florens, 2010 ; Rouzes, 2015). L'opération de double moyenne consiste dans un premier temps, à moyennner temporellement les champs instantanés, puis à les moyennner spatialement, suivant les directions longitudinales et transversales X et Y . Ce concept a été appliqué ici, dans une zone définie par l'épaisseur moyenne du jet (Figure V-22), dans laquelle la vitesse $\|V\|_{2D}$ a été prise en référence.

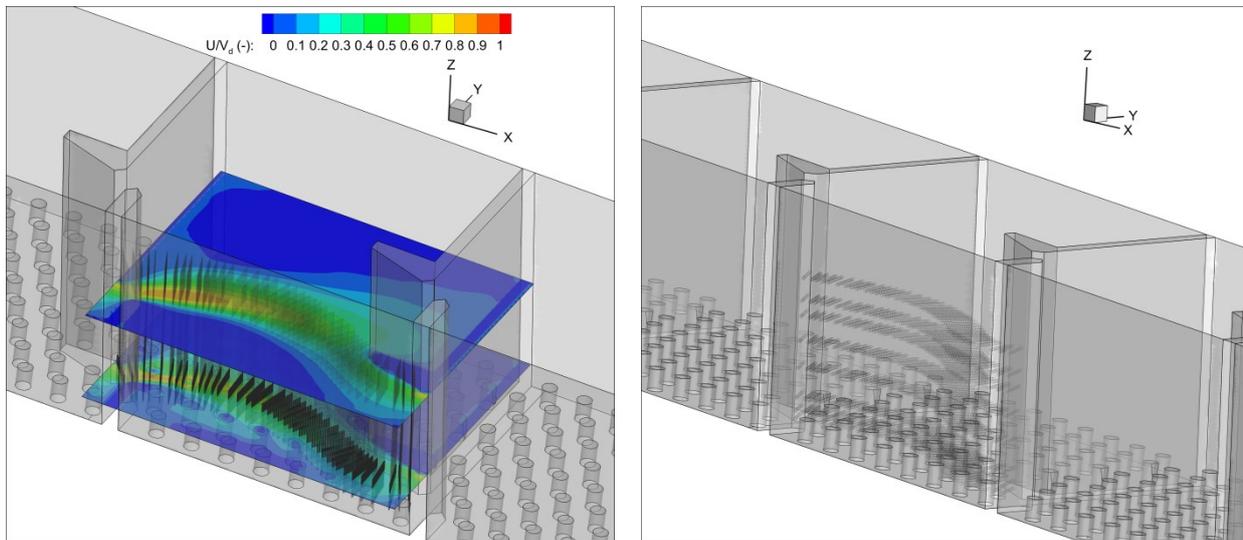


Figure V-22. Positions des points utilisés pour réaliser la double moyenne dans la configuration $d_r=15\%$ et $B/b=9$. À gauche tous les plans horizontaux sont représentés, à droite quelques plans seulement.

Dans la littérature consacrée aux écoulements de canopée, les paramètres de parois u_τ , d et z_0 (respectivement la vitesse de frottement, la hauteur de déplacement et la longueur de rugosité), sont utilisés pour normaliser les profils verticaux et ainsi permettre des comparaisons. Il existe différentes méthodes pour obtenir chacun de ces paramètres (Florens, 2010). Pour estimer la valeur de u_τ , la méthode consistant à extrapoler l'expression linéaire des tensions de Reynolds $\langle u'w' \rangle$ jusqu'à $Z=d$ a été choisie. Elle se base sur le fait que ces tensions sont maximales près du fond, le fond virtuel étant ici à une distance $Z=d$ du radier. Ainsi, à partir d'une régression effectuée sur la partie linéaire du profil vertical des tensions de Reynolds $\langle u'w' \rangle$ (eq.V-1) :

$$u_\tau = \sqrt{A \cdot d + B} \quad (\text{eq.V-1})$$

avec A et B les coefficients de la régression linéaire, d la hauteur de déplacement (m) et u_τ la vitesse de frottement pariétal (m.s^{-1}).

Pour commencer, la hauteur de déplacement peut être fixée égale à la hauteur des rugosités. De cette manière, une première approximation de u_τ peut être calculée. Afin de déterminer la zone logarithmique, une régression linéaire est effectuée sur le profil de vitesse exprimé de la manière suivante (Florens, 2010) (eq.V-2) :

$$e^{\kappa \frac{\langle \|V\|_{2D} \rangle}{u_\tau}} = \frac{Z - d}{z_0} \quad (\text{eq.V-2})$$

avec κ la constante de Von Karman, $\langle \|V\|_{2D} \rangle$ la norme de la vitesse doublement moyennée dans le plan XY (m.s^{-1}), u_τ la vitesse de frottement pariétal (m.s^{-1}), Z la distance normale à la paroi (m), d la hauteur de déplacement (m) et z_0 la longueur de rugosité (m).

La production turbulente $P_T = -\langle u'w' \rangle \cdot \frac{\partial \langle \|V\|_{2D} \rangle}{\partial Z}$ adimensionnée par sa valeur maximale sur la colonne d'eau a été tracée en fonction de la distance normale à la paroi Z/h_r (Figure V-23).

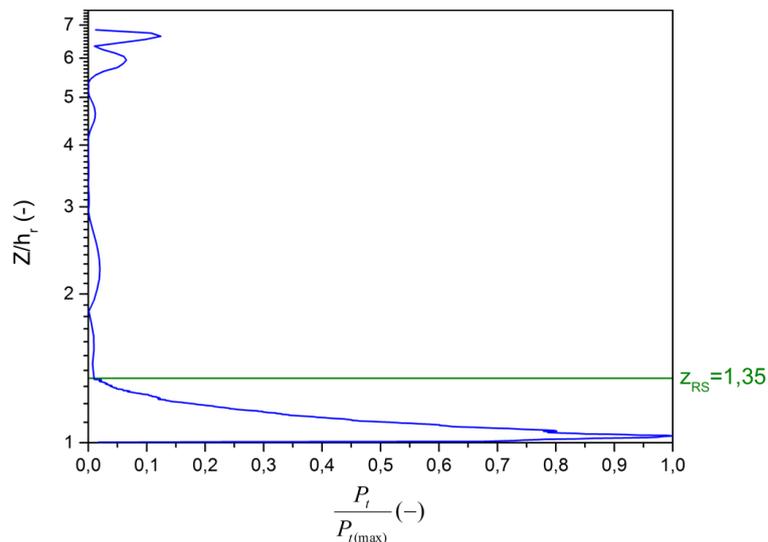


Figure V-23. Production turbulente en fonction de la distance normale à la paroi dans la configuration $d_r=15\%$ et $B/b=9$ et hauteur de la sous-couche rugueuse (z_{RS}).

La sous-couche rugueuse est définie comme étant une zone où la production turbulente est importante. Son étendue a été définie jusqu'à la hauteur à partir de laquelle la production turbulente adimensionnée devient inférieure à 5%, soit $z_{RS}=1,4$. La distance à laquelle la production atteint son maximum a été définie comme étant la limite inférieure de la sous-couche logarithmique. La borne supérieure de cette dernière a été obtenue (en $Z/h_r=1,1$) par une méthode de maximisation du coefficient de détermination de la régression linéaire calculée sur (eq.V-2). La pente de la droite ($1/z_0$) et l'ordonnée à l'origine ($-d/z_0$) permettent de déterminer les paramètres de parois d et z_0 . La vitesse u_τ est ensuite recalculée en utilisant la nouvelle valeur de d , définissant un processus itératif au terme duquel les paramètres ne varient plus sensiblement. Les paramètres de parois ont ainsi été déterminés : $u_\tau=0,0718 \text{ m.s}^{-1}$; $d=0,041 \text{ m}$ et $z_0=7,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ avec un coefficient de détermination $R^2=0,998$. Dans la couche externe, l'expression du profil de vitesse déficitaire a également été évaluée à partir de la fin de zone logarithmique. La borne supérieure a également été définie par maximisation du coefficient de détermination. Dans la littérature, cette loi est valable jusqu'aux abords de la surface libre, dans le cas présent, cette caractéristique n'est pas vérifiée, en raison de l'écoulement fortement

inhomogène existant dans la couche externe. L'ajustement de la loi déficitaire sur le profil de vitesse se base sur l'expression suivante (eq.V-3) :

$$\frac{\langle \|V\|_{2D} \rangle}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{Z-d}{z_0} \right) + \frac{2 \cdot \Pi}{\kappa} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \eta \right) \quad (\text{eq.V-3})$$

avec $\eta = \frac{Z-d}{\delta-d}$ et δ l'épaisseur de la couche limite et Π le paramètre de Coles.

Les paramètres d , z_0 et κ étant fixés, la régression appliquée sur l'équation (eq.V-3) a permis de déterminer les paramètres $\Pi = 0,1$, et $\delta = 0,0247$ m avec $R^2=0,998$ sur l'intervalle $1,1 \leq \frac{Z}{h_r} \leq 1,36$. L'étendue de la sous-couche rugueuse z_{RS} ainsi que les profils de vitesse moyennes dans la sous couche inertielle (logarithmique) et dans la zone de vitesse déficitaire sont tracés sur la figure V-24.

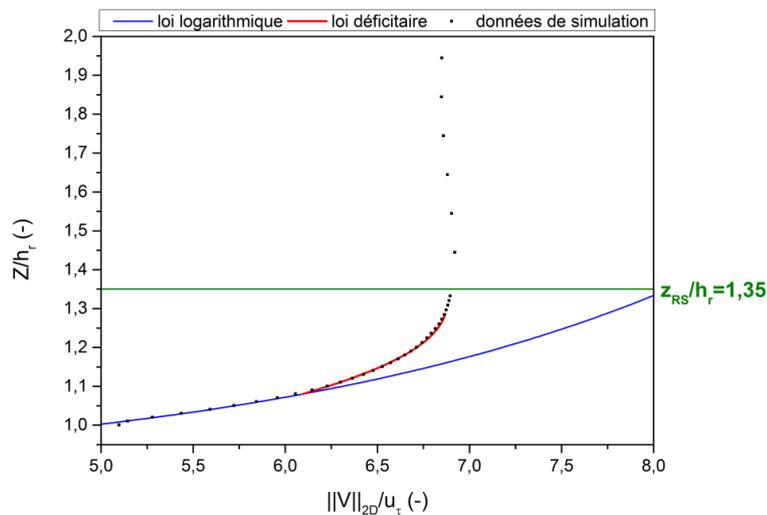


Figure V-24. Profils de vitesses dans la couche limite au-dessus des macro-rugosités.

Les paramètres de parois et les bornes des différentes sous-couches sont résumés dans le tableau 18 et comparés aux valeurs obtenues par Florens (2010).

Les résultats de Florens (2010) présentés dans ce tableau ont été déterminés à partir de mesures au-dessus de rangées de macro-rugosités en décalés, avec un écoulement unidirectionnel, uniforme et une couche limite complètement développée ($\delta=D$, avec D la hauteur de la surface libre).

Configuration	$\frac{u_\tau}{\ V\ _{2D(max)}}$	$\frac{d}{h_r}$	$\frac{z_0}{h_r}$	$\frac{z_{min}}{h_r}$	$\frac{z_{max}}{h_r}$	$\frac{z_{RS}}{h_r}$
$d_r=15\%$ $\lambda=0,28$ $\alpha_c=0,13$; $F_r=0,55$	0,12	0,84	0,014	1,03	1,1	1,35
Florens (2010) $\lambda=0,4$ $\alpha_c=0,15$; $F_r=0,54$	0,065	0,91	0,021	1,11	1,5	2,3

Tableau 18 : Comparaison des paramètres de parois adimensionnés avec les résultats issus de la littérature (Florens, 2010). λ : densité frontale d'un motif de rugosité ; α_c : paramètre de confinement ; F_r : Nombre de Froude.

Dans le cas de l'écoulement dans la passe à poissons, l'écoulement n'est ni unidirectionnel, ni uniforme et la couche limite n'est pas complètement développée. La comparaison se retrouve donc biaisée, mais les paramètres de parois déterminés sont cependant du même ordre de grandeur. D'autre part, comme le remarque Florens (2010), tous les auteurs n'ont pas la même

définition de la hauteur de la sous-couche rugueuse, ce qui lui confère un caractère non universel. Il est à noter que, d'après Florens (2010), la hauteur z_{RS} varie significativement en fonction de l'état de confinement de la couche limite, de $z_{RS}=1,68$ pour $\alpha_c=0,33$ à $z_{RS}=2,28$ pour $\alpha_c=0,15$. En revanche, les paramètres de parois sont peu sensibles à l'accroissement du confinement, mise à part la vitesse de frottement qui augmente lorsqu'elle est calculée par la méthode de l'extrapolation.

L'écoulement dans une passe à poissons à fentes verticales est fortement instationnaire. Aussi, l'analyse seule des champs moyens peut se révéler insuffisante pour expliquer le comportement du poisson vis-à-vis de l'écoulement qu'il rencontre. Tarrade *et al.* (2011) a montré que l'écoulement instationnaire dans la configuration *radier lisse* pouvait être décrit par 3 phases principales successives (*cf.* paragraphe I.1.2.b). Bourtal (2012) retrouve ces trois mêmes phases dans une configuration avec des macro-rugosités dont la densité est identique à celle étudiée ici.

La simulation numérique instationnaire (LES) permet de retrouver ces différentes phases dans la configuration *radier lisse* (Figure V-25).

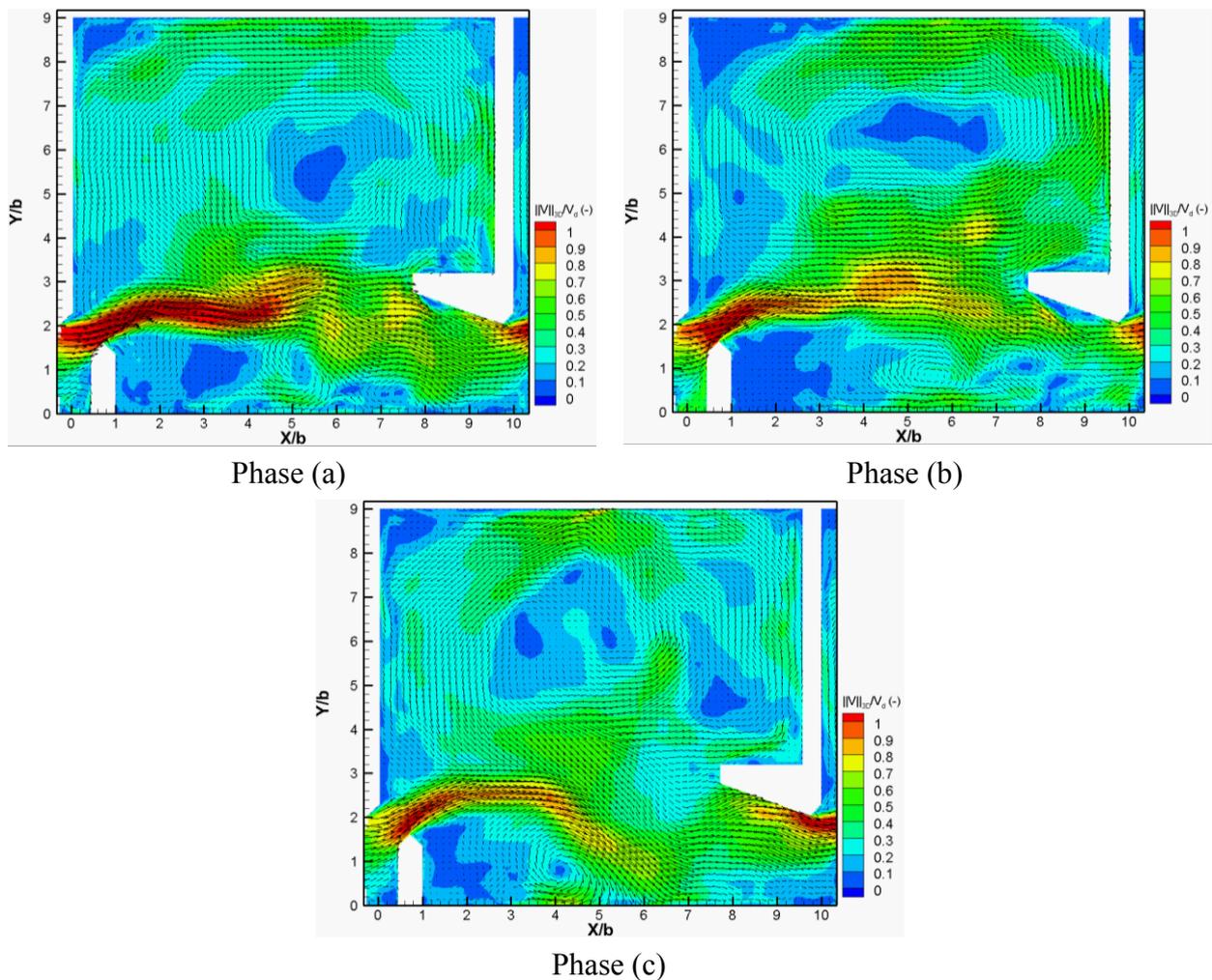


Figure V-25. Champs de vitesses instantanées, issus de la simulation numérique dans la configuration *radier lisse*, caractérisant les différentes phases de l'écoulement (plan $Z/b=2$).

Durant la phase (a), le jet a une trajectoire courbe orientée directement vers la fente aval. Il tend ensuite à se déplacer vers la paroi latérale et se divise en deux parties (phase (b)). La première longe la paroi du déflecteur central puis la paroi latérale, alimentant ainsi la zone de recirculation supérieure. La seconde partie du jet suit la partie biseautée du déflecteur central puis ressort par la fente aval. Enfin, dans une dernière phase (phase (c)), le jet adopte une courbure très importante et alimente la zone de recirculation inférieure (derrière le déflecteur latéral amont) dont la forme évolue rapidement avec le temps.

En présence de macro-rugosités, l'écoulement est tridimensionnel et les phénomènes instationnaires, comme le battement du jet, ne sont pas forcément de même fréquence et de même amplitude sur toute la hauteur d'eau. Pour le vérifier, les champs instantanés de vitesses des trois phases de l'écoulement ont été reportés sur la figure V-26 sur un plan situé $Z/h_r=3$ (parallèle au radier) et aux mêmes instants sur un plan proche des rugosités $Z/h_r=1,2$.

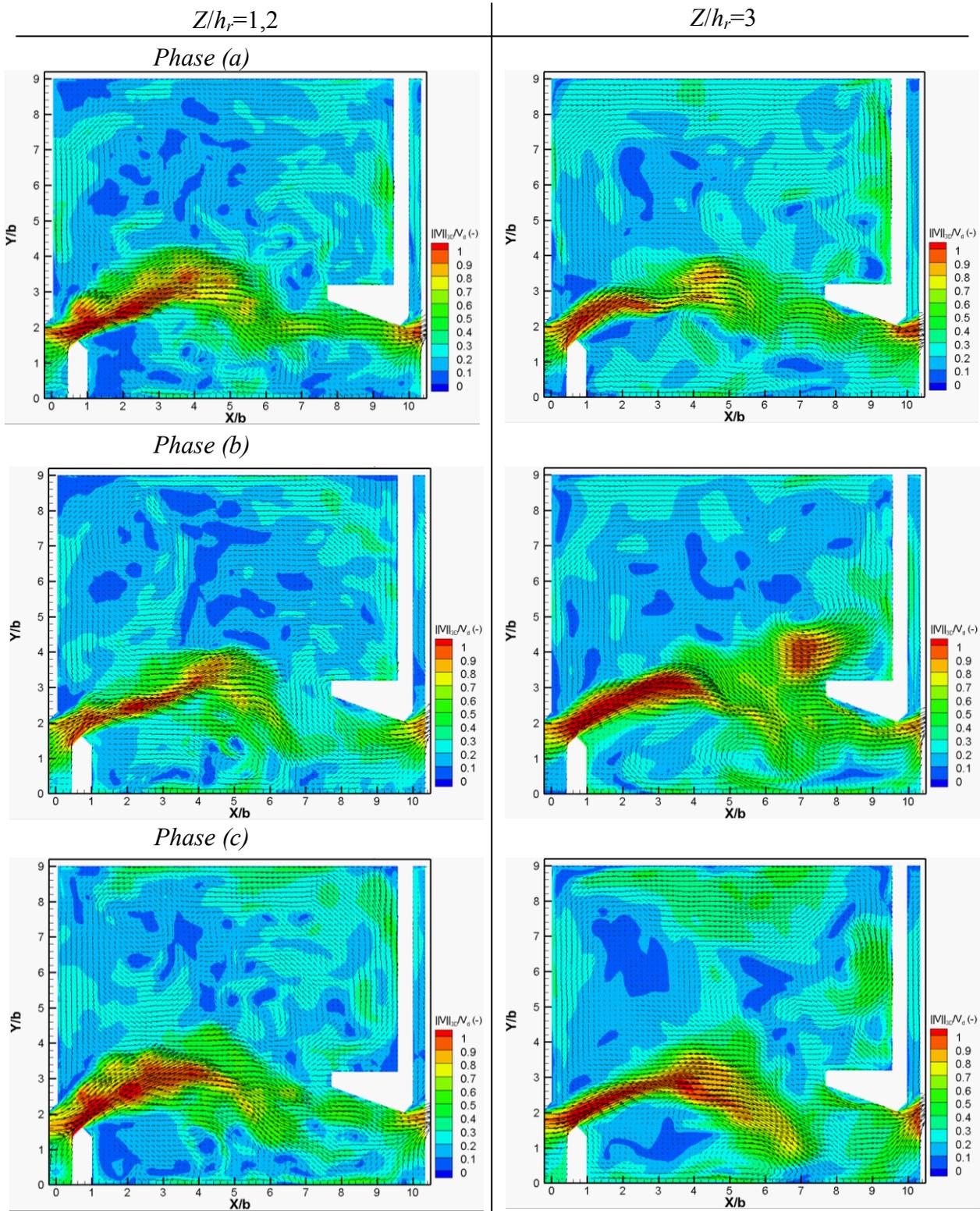


Figure V-26. Champs de vitesses instantanées, issus de la simulation numérique dans la configuration $d_r=15\%$, caractérisant les différentes phases de l'écoulement. À gauche sur le plan $Z/h_r=1,2$; à droite sur le plan $Z/h_r=3$.

Il est à noter tout d'abord que les champs instantanés obtenus au-dessus des macro-rugosités en $Z/h_r=3$ et ceux obtenus dans la configuration *radier lisse*, comportent quelques différences notables. L'écoulement est globalement moins intense dans toute la zone de recirculation supérieure dans la configuration $d_r=15\%$, quelle que soit la phase observée. Cette diminution

d'énergie cinétique dans l'écoulement principal est la conséquence de l'augmentation de la dissipation près du fond, dans la sous-couche rugueuse. Le fort taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente dans la canopée et dans la sous-couche rugueuse est mis en évidence sur la figure V-27.

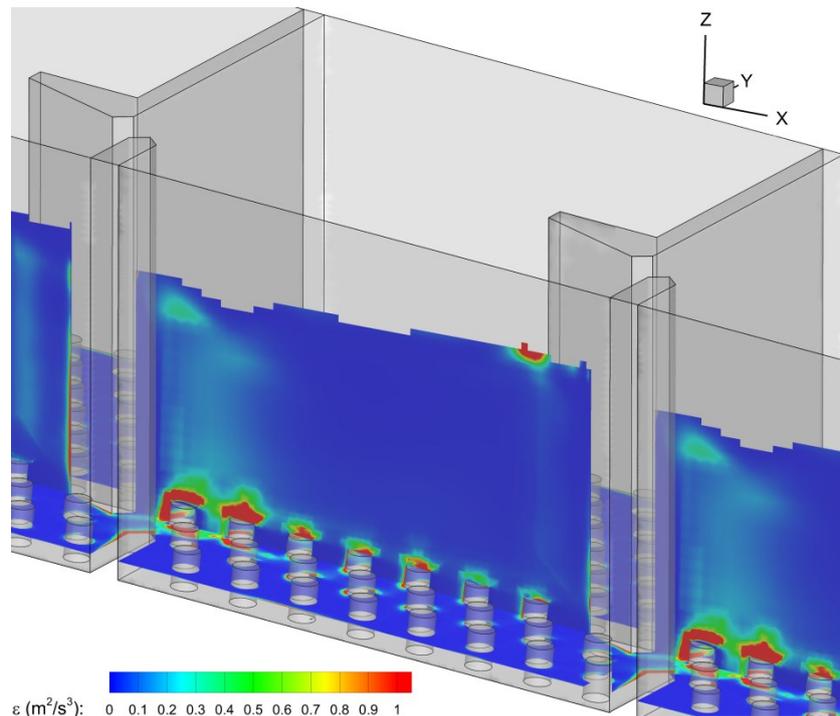


Figure V-27. Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente à l'intérieur et au-dessus des macro-rugosités.

Entre les deux plans $Z/h_r=1, 2$ et 3 , la structure instantanée de l'écoulement aux différentes phases n'est pas similaire, notamment lors de la phase (b), où la bouffée de vitesses alimentant la zone de recirculation supérieure n'est pas présente. Par ailleurs, le fait que cette bouffée de vitesses ne soit pas observée dans le plan le plus proche du fond semble cohérent avec l'analyse précédente du champ moyen, dans lequel le tourbillon supérieur était fortement incliné, indiquant qu'il était alimenté « par le haut ».

V.4.2.b Influence de la présence de macro-rugosités sur l'écoulement en petite largeur ($B/b=6,67$)

De manière identique au paragraphe précédent, concernant la grande largeur de bassin ($B/b=9$), les champs de vitesses moyens ont été représentés sur différents plans horizontaux, positionnés en $Z/h_r=0,75 ; 1,2$ et $4,5$, et au milieu des fentes dans des plans inclinés à 45° (Figure V-28). L'analyse des résultats obtenus pour cette largeur de bassin ($B/b=6,67$) dans la configuration lisse a montré que l'écoulement était quasi-bidimensionnel. L'écoulement n'est pas exactement similaire dans chacun des bassins, le jet ayant tendance à se redresser vers la paroi opposée à la fente au fur et à mesure que l'écoulement traverse les bassins. Un élargissement de la taille du jet a également été noté près de la surface libre. En présence de macro-rugosités, l'écoulement ne peut plus être complètement bidimensionnel. Cependant, à partir d'une certaine distance du haut de la canopée, les grandes structures tourbillonnaires ne se déplacent plus sensiblement, comme le montrent les lignes de courant du champ moyen sur les plans $Z/h_r=1,2$ et $4,5$. Sur ces deux plans, comme dans la configuration *radier lisse*, le jet a une forme courbe, globalement orienté vers la paroi opposée à la fente. Il est à noter cependant que près de la canopée (*i.e* $Z/h_r=1,2$) le jet semble plus contraint, laissant place à une zone de faibles vitesses dans le coin supérieur droit du bassin. Sur le plan $Z/h_r=0,75$, le jet se diffuse dans la quasi intégralité du bassin, créant ainsi de nombreuses zones de sillages derrière les plots.

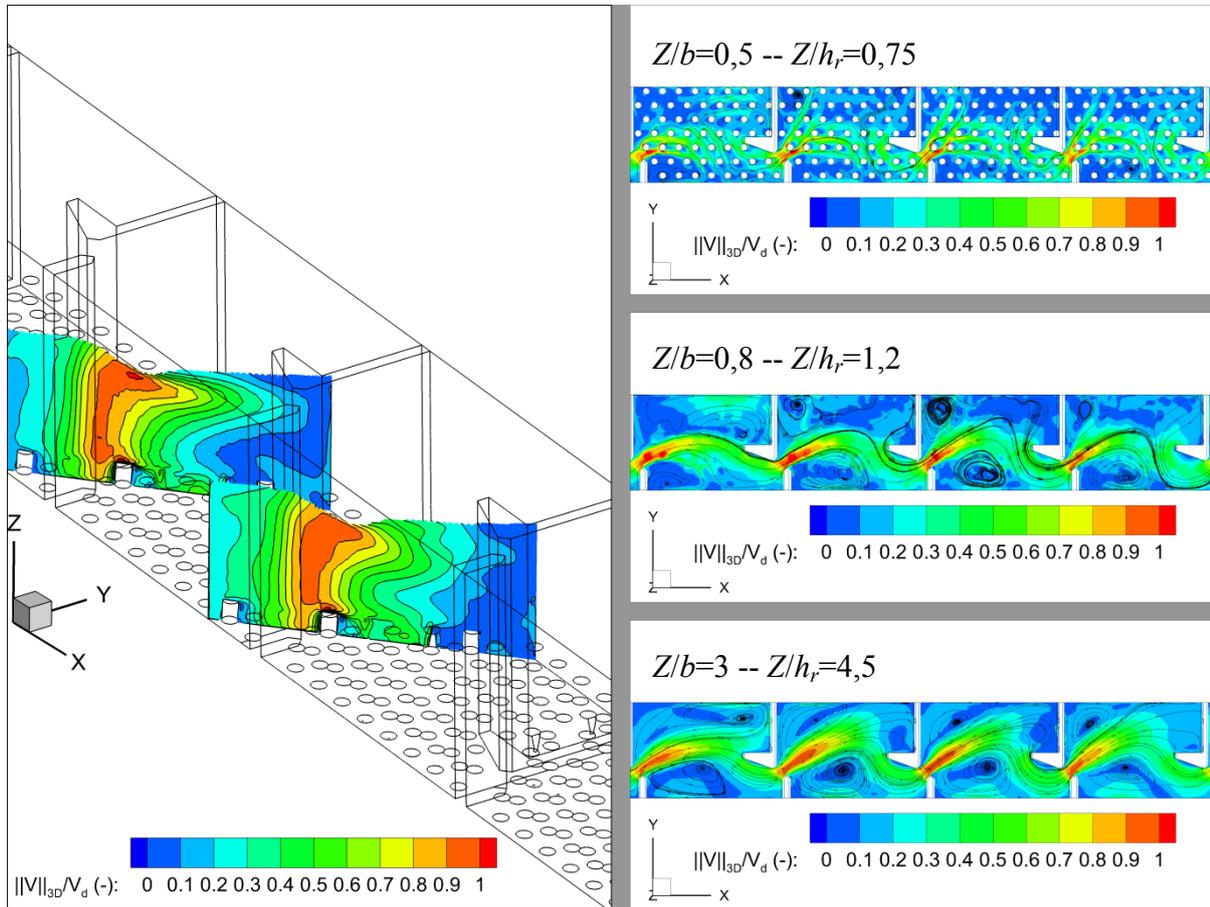


Figure V-28. Champs de vitesse moyens en configuration $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$. À gauche : plans de coupe au milieu des fentes 2 et 3 (à 45°) ; à droite : plans de coupe horizontaux à $Z/b=0,5$; $0,8$ et 3 équivalent respectivement à $Z/h_r=0,75$; $1,2$ et $4,5$.

En ce qui concerne l'écoulement moyen à travers les fentes 2 et 3, il est relativement similaire, avec toutefois une répartition plus homogène des vitesses sur la hauteur d'eau dans la fente 3.

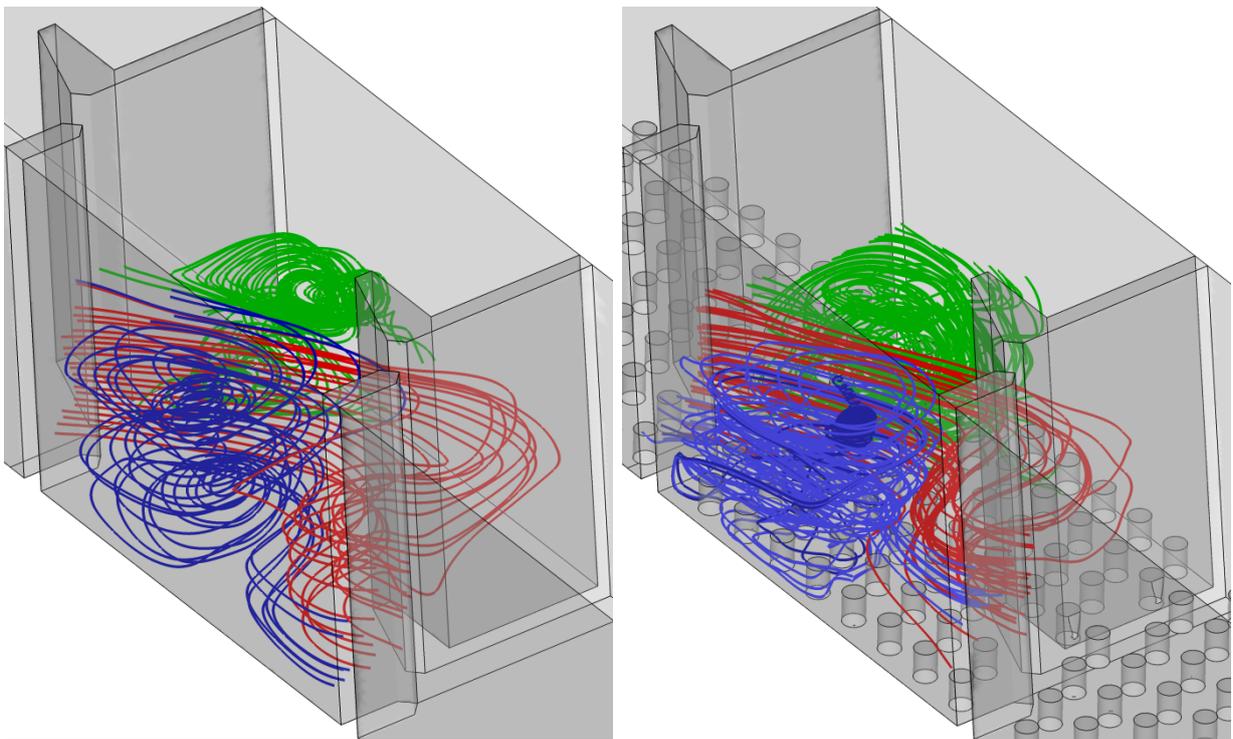


Figure V-29. Lignes de courant issues du champ moyen de vitesse pour $B/b=6,67$. À gauche dans la configuration radier lisse, à droite $d_r=15\%$.

Les lignes de courant du champ moyen de vitesse ont été tracées dans la configuration *radier lisse* et $d_r=15\%$ (Figure V-29). Elles permettent de montrer que l'écoulement est en moyenne bidimensionnel au-dessus des macro-rugosités et que les structures tourbillonnaires ont une position similaire dans la configuration *radier lisse* et $d_r=15\%$.

La structure du jet a également été analysée et comparée à celle obtenue dans une configuration d'écoulement sans macro-rugosités. La ligne centrale du jet a, dans un premier temps, été déterminée dans chacune des configurations puis la vitesse U_j du jet a été extraite sur les sections transversales définies le long de cette ligne (Figure V-30).

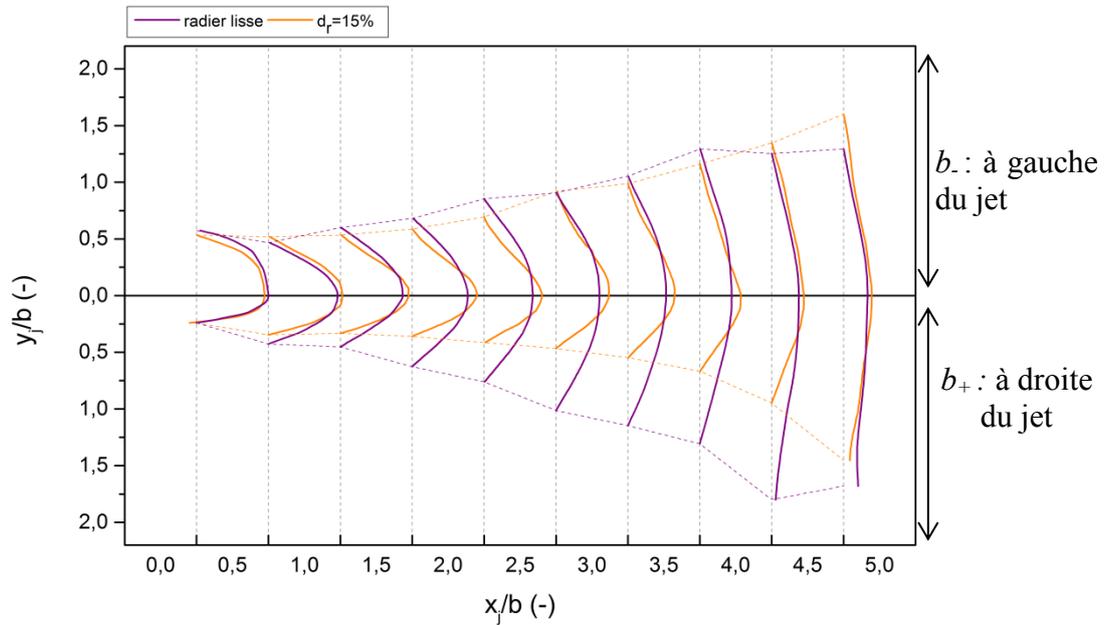


Figure V-30. Evolution de la largeur du jet et du profil de vitesse moyen en fonction de x_j dans les configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$.

Liu *et al.* (2006) expliquent que lorsque la topologie est de type 2, comme c'est le cas ici dans les deux configurations (*radier lisse* et $d_r=15\%$), il n'y a pas de recirculation sur la gauche du jet. Ce sont alors les grands déflecteurs et la paroi opposée à la fente qui contrôlent le développement de ce dernier.

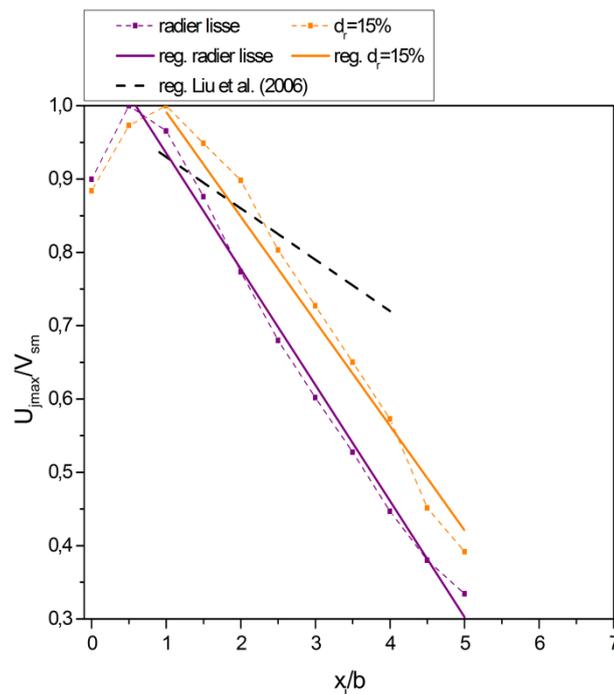


Figure V-31. Evolution de la vitesse maximale U_{jmax} dans le jet en fonction de x_j dans les configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$.

Ainsi, Liu *et al.* (2006) montrent que les deux demi-largeurs du jet ne sont pas identiques. Dans la configuration *radier lisse*, l'évolution des profils de vitesses le long de x_j tend à montrer que le jet s'élargit de manière symétrique. Cependant, en présence de macro-rugosités, la tendance décrite par Liu *et al.* (2006) est observée, avec un profil qui se dissymétrise à partir de $x_j/b=1$. Par ailleurs, le jet est contraint dans son élargissement par la zone de recirculation inférieure, ce qui explique que sa demi-largeur b_+ soit moins importante.

L'évolution de la vitesse maximale U_{jmax} du jet le long de sa ligne centrale a été tracée sur la figure V-31 pour la configuration *radier lisse* et $d_r=15\%$. La régression proposée par Liu *et al.* (2006) est également rappelée.

Dans les deux configurations, la décroissance de U_{jmax} dans le jet est linéaire et de pente identique. La vitesse maximale V_{sm} est atteinte plus près de l'entrée du bassin dans la configuration *radier lisse* ($x_j/b=0,5$) que dans la configuration $d_r=15\%$ ($x_j/b=1$), ce qui explique l'offset entre les deux courbes. Il est à noter que ces décroissances sont plus rapides que celle observée par Liu *et al.* (2006).

Les expressions issues des régressions linéaires effectuées sur la partie décroissante de la vitesse du jet sont données dans le tableau 19.

	<i>Radier lisse</i>		$d_r=15\%$	
	Expression	R ² (-)	Expression	R ² (-)
$\frac{U_{jmax}}{V_{sm}}$	$1,093 - 0,158 \cdot \frac{x_j}{b}$	0,95	$1,134 - 0,143 \cdot \frac{x_j}{b}$	0,88

Tableau 19 : Expressions de l'évolution de la vitesse maximale U_{jmax} dans le jet en fonction de x_j dans les configurations *radier lisse* et $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$.

V.4.3 Influence de la présence de macro-rugosités sur les paramètres clés de l'écoulement

De manière identique à ce qui a été présenté dans le chapitre consacré à l'étude des seuils, les régions des bassins offrant les conditions les plus favorables aux poissons ont été définies sur la base des critères mentionnés par Lacey *et al.* (2012).

Les valeurs seuils de ces grandeurs ont été choisies comme étant égales à leurs valeurs moyennes spatiales calculées dans chacun des bassins et pour chaque configuration. De cette manière, la détermination des zones dans lesquelles ces grandeurs sont supérieures à leurs valeurs seuils permet de représenter les régions les moins favorables pour les poissons.

Les contours de ces régions ont été définis séparément pour les critères de vorticité, d'énergie cinétique turbulente et de vitesse, les régions non colorées étant des zones où ces critères ne sont pas atteints. Les figures V-32 et V-33 permettent de comparer la taille et la répartition des régions les plus propices (non colorées) pour les poissons en fonction de la présence ou non des macro-rugosités, respectivement dans les configurations en grande largeur ($B/b=9$) et en petite largeur ($B/b=6,67$).

Pour les deux largeurs étudiées et $Z/b>1$, la taille et la disposition des zones les plus favorables pour les poissons (zones blanches délimitées par un contour rouge) ne varient pas sensiblement en fonction de la position altitudinale d'observation, que ce soit dans la configuration *radier lisse* ou $d_r=15\%$. Cependant, au-dessus de la canopée, l'ajout de macro-rugosités modifie sensiblement la taille de certaines de ces zones. Pour $B/b=9$, la superficie des zones 1 et 2 est augmentée en moyenne respectivement de 8% et 4%. En petite largeur de bassin, la présence des macro-rugosités diminue la taille de la zone 3 (-5%) en augmentant celle de la zone 2 (+4,5%).

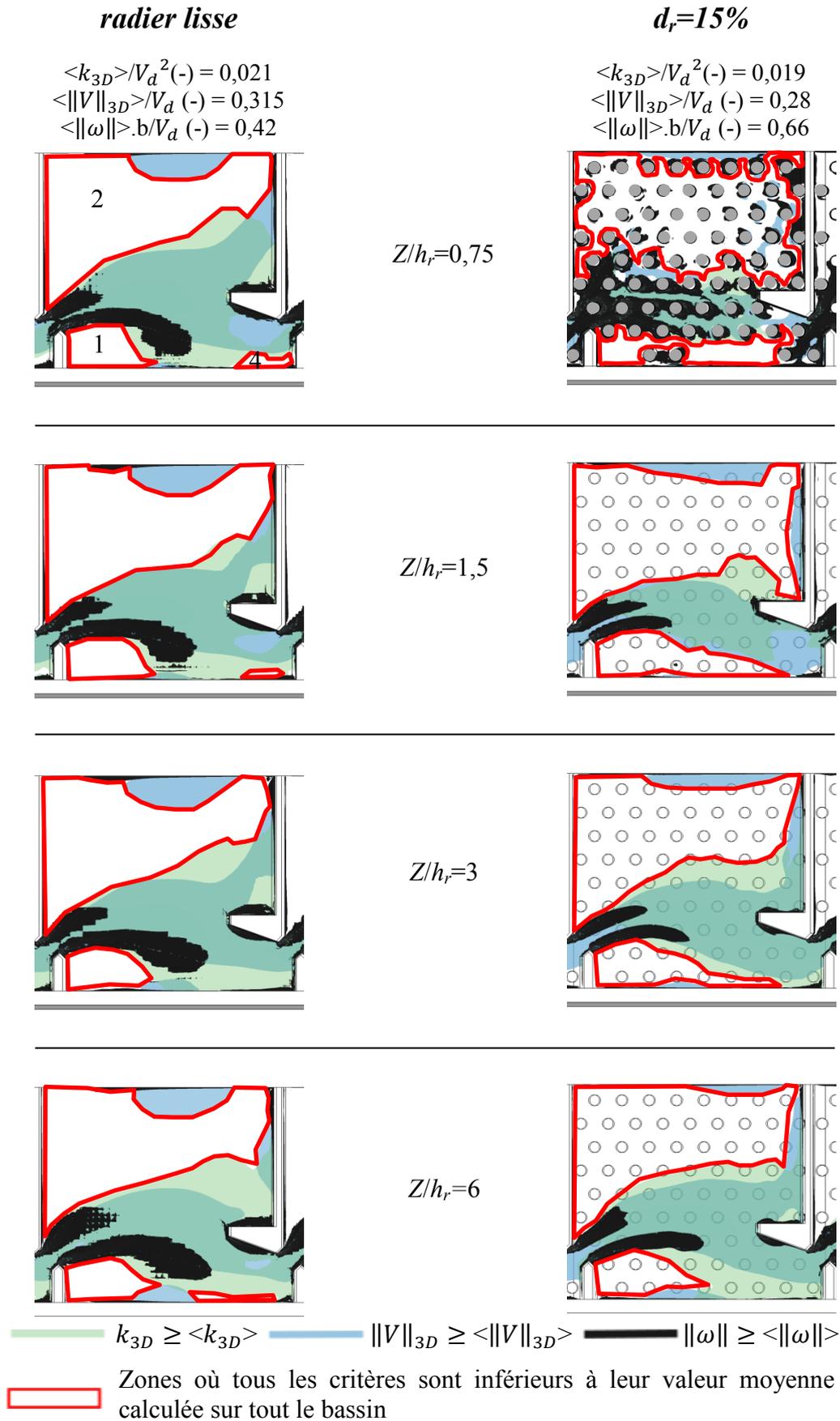


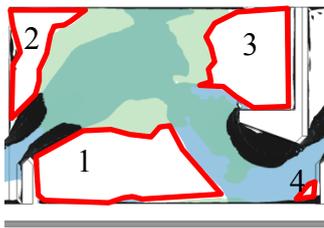
Figure V-32. Régions où les critères de vorticité (en noir), d'énergie cinétique turbulente (en vert) et de vitesse (en bleu) sont supérieurs aux valeurs seuils dans la configuration *radier lisse* (à gauche) et en configuration avec des macro-rugosités de densité $d_r=15\%$ pour $B/b=9$. Les régions où les valeurs seuils ne sont pas atteintes sont délimitées en rouge et sont numérotées dans la configuration *radier lisse*.

radier lisse

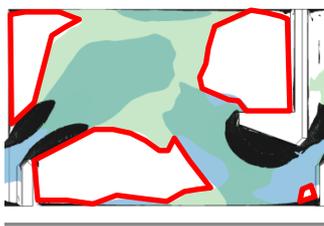
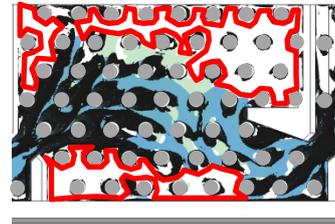
$$\begin{aligned} \langle k_{3D} \rangle / V_d^2 (-) &= 0,055 \\ \langle \|V\|_{3D} \rangle / V_d (-) &= 0,429 \\ \langle \|\omega\| \rangle \cdot b / V_d (-) &= 0,71 \end{aligned}$$

$d_r=15\%$

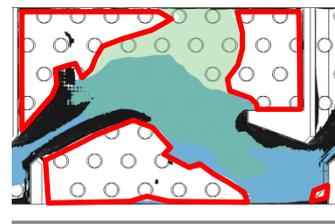
$$\begin{aligned} \langle k_{3D} \rangle / V_d^2 (-) &= 0,028 \\ \langle \|V\|_{3D} \rangle / V_d (-) &= 0,318 \\ \langle \|\omega\| \rangle \cdot b / V_d (-) &= 0,67 \end{aligned}$$



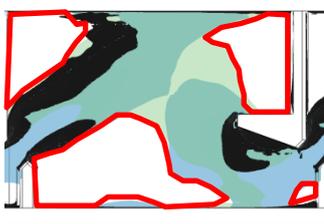
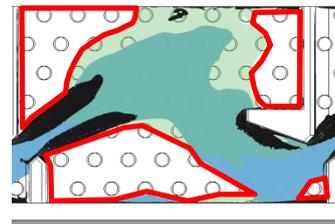
$Z/h_r=0,75$



$Z/h_r=1,5$



$Z/h_r=3$



$Z/h_r=6$

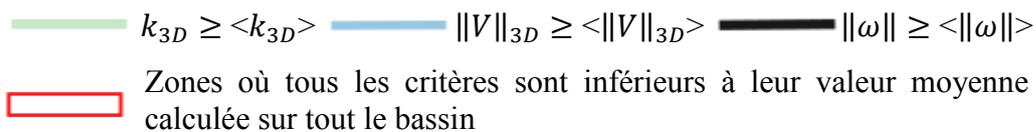
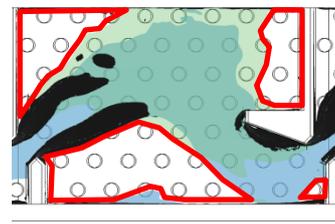


Figure V-33. Régions où les critères de vorticité (en noir), d'énergie cinétique turbulente (en vert) et de vitesse (en bleu) sont supérieurs aux valeurs seuils dans la configuration *radier lisse* (à gauche) et en configuration avec des macro-rugosités de densité $d_r=15\%$ pour $B/b=6,67$. Les régions où les valeurs seuils ne sont pas atteintes sont délimitées en rouge et sont numérotées dans la configuration *radier lisse*.

En ce qui concerne les zones dans la canopée ($Z/b=0,5$), en termes de superficie elles sont équivalentes dans la configuration *radier lisse* et $d_r=15\%$ pour $B/b=9$. Lorsque $B/b=6,67$, les zones 1 et 2 sont plus petites (-3%) avec les macro-rugosités, alors que la taille de la zone 3 n'est pas modifiée. Au sein des macro-rugosités, il est à noter que l'écoulement est soumis à une vorticité importante engendrée par la présence des plots.

L'intégration sur le volume d'eau moyen de la surface disponible totale à chaque niveau d'eau pour chaque configuration a été réalisée. Le taux de volume disponible dans la configuration *radier lisse* en grande largeur ($B/b=9$) est de 42%. Il est légèrement supérieur dans la configuration $d_r=15\%$ où il atteint 49%. En petite largeur ($B/b=6,67$), les taux de volume disponibles sont équivalents pour les deux configurations ($\approx 40\%$).

V.5 Influence des macro-rugosités sur le comportement des poissons

Afin d'étudier l'influence des macro-rugosités sur le comportement des poissons, 3 campagnes expérimentales ont été menées. Ces expérimentations ont permis de tester différentes espèces et différentes tailles de poissons. Les deux premières campagnes ont été effectuées par Michaud (2015), la dernière par Vaill  e (2016), tous deux biologistes de formation. Le même protocole opératoire a été suivi pour toutes les manipulations (cf. paragraphe II.4.2.c).

La première session d'expérimentations a tout d'abord été réalisée avec des truites *fario* (*Salmo trutta fario*) issues d'une pisciculture locale. Dans le cadre d'une seconde période d'expérimentation, des chevesnes (*Squalius cephalus*), des gardons (*Rutilus rutilus*) et des goujons (*Gobio gobio*) ont été testés. Ces espèces ont été capturées lors de pêches électriques organisées par l'Unité Régionale Poitou-Charentes de l'ONEMA. Enfin, la troisième session a permis de tester des truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) issues de la même pisciculture.

Des lots ont été formés pour chacune des phases expérimentales, soit en fonction de la taille des individus (tests avec les truites), soit en fonction des espèces. Trois configurations ont été comparées durant chaque campagne expérimentale pour la petite largeur de bassin ($B/b=6,67$) : une configuration dans laquelle la passe à poissons n'était pas équipée de macro-rugosités (*radier lisse*) et deux configurations avec des macro-rugosités de densités différentes ($d_r=10\%$ et 15%).

En ce qui concerne l'analyse des données, elle a été effectuée de manière identique à celle présentée dans l'analyse du comportement des truites dans la passe à poissons en présence de seuils (cf. paragraphe IV.5). Ainsi, pour les macro-rugosités, seule une synthèse des principaux résultats obtenus est proposée.

Il convient par ailleurs de préciser que les résultats, significatifs ou non, issus de ces manipulations ont été obtenus dans des conditions expérimentales de laboratoire qui peuvent influencer le comportement des poissons.

V.5.1 Identification des zones de stabulations

Les zones de stabulations des poissons, définies suite à la visualisation du comportement des poissons dans l'écoulement en présence de macro-rugosités, sont les mêmes que celles définies dans la configuration *radier lisse* (Figure IV-24, cf. paragraphe IV.5.1). La définition des régions les plus favorables pour les poissons, déterminées à partir des critères sur les grandeurs cinétiques de l'écoulement en présence de macro-rugosités, sont en cohérence avec ce résultat. L'analyse de l'écoulement décrite dans le paragraphe précédent, montre que la sous-couche rugueuse s'étend (dans le jet) jusqu'à $Z/h_r=1,35$ pour la plus grande largeur de bassin ($B/b=9$). Dans la mesure où la vitesse maximale de l'écoulement est identique pour la plus petite largeur ($B/b=6,67$)   tudi  e ici, la hauteur de cette sous-couche est supposée être du même ordre de grandeur. De manière à analyser la position des poissons sur la hauteur d'eau dans le bassin et ainsi voir si cette sous-couche rugueuse a une influence sur le comportement des poissons, la vue

latérale de l'écoulement a été divisée en deux zones. La délimitation, parallèle au radier, a été fixée à $Z/h_r=2$ (Figure V-34).

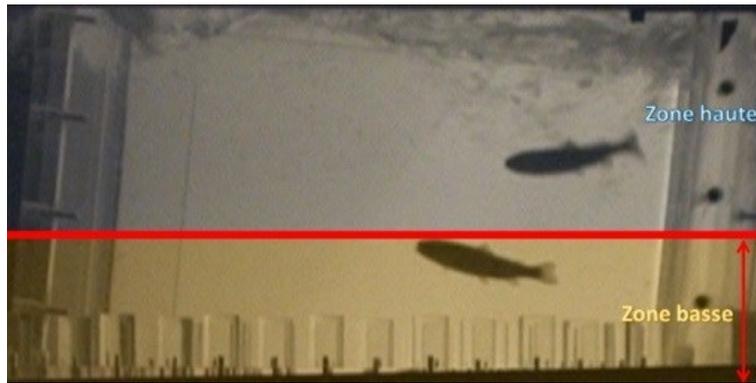


Figure V-34. Zones de stabulations verticales définies dans le bassin de mesure dans la configuration $B/b=6,67$.

Les visualisations de la vue latérale et de la vue de dessous du bassin étant parfaitement synchronisées, l'association de la position verticale du poisson avec sa position horizontale a été effectuée. Ainsi, la position du poisson sur la colonne d'eau, lorsqu'il était dans chacune des zones de stabulations horizontales, a pu être comparée dans les configurations avec et sans macro-rugosités dans l'écoulement.

V.5.2 Synthèse sur les indices généraux

Sur l'ensemble des tests statistiques qui ont été effectués sur les indices généraux (indice d'efficacité totale, de franchissement, de dévalaison et d'activité), aucun n'a décelé de différence significative entre les configurations. Des tendances ont toutefois été notées.

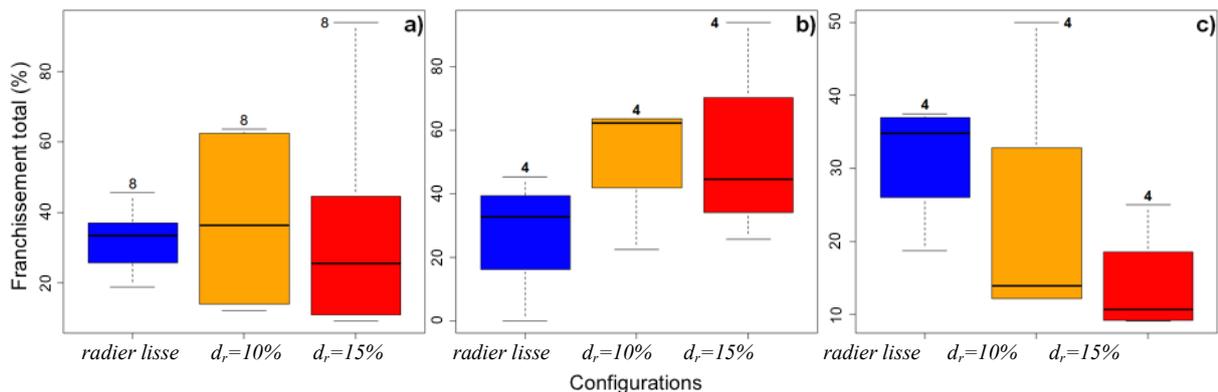


Figure V-35. Franchissement total des truites arc-en-ciel en fonction des configurations. a) toutes les tailles, b) les lots de poissons de grande taille et c) les lots de poissons de petite taille. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons (Vaillé, 2016).

La présence de macro-rugosités tend à augmenter le franchissement des truites *arc-en-ciel* de grande taille et à diminuer celui des truites de petite taille (Figure V-35). La même caractéristique a été notée en ce qui concerne l'indice d'activité.

Les analyses menées suites à la campagne expérimentale sur les truites *fario* ont montré une tendance identique à l'augmentation des indices de franchissement et d'activité, sans révéler de différence notable entre les différentes tailles d'individus. L'accès au bassin de mesure (bassin 3) semble être favorisé par l'ajout de macro-rugosités.

V.5.3 Synthèse sur les temps de séjour et de stabulation

En ce qui concerne le temps de séjour des poissons dans le bassin de visualisation, des différences significatives ont été observées en fonction des configurations ($K-W=12.31$, $ddl=2$, $p-val=0.0021$) sur les lots de truites *fario* (Figure V-36).

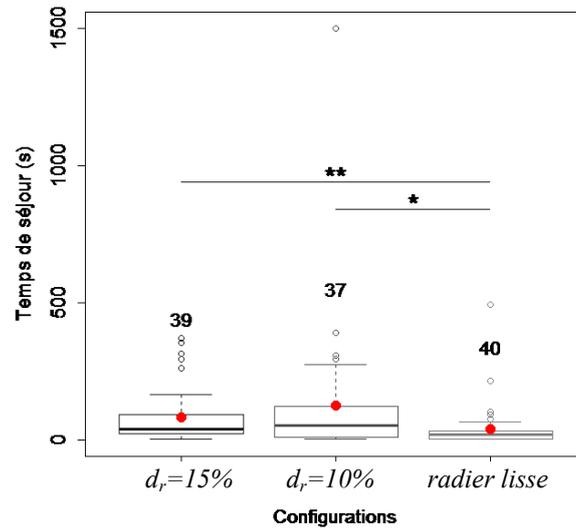


Figure V-36. Temps de séjours des truites *fario* en fonction des configurations. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons et les étoiles indiquent la significativité des tests statistiques (Michaud, 2015).

Les truites *fario* ont passé plus de temps dans le bassin de visualisation lorsque des macro-rugosités étaient présentes. Il est difficile d'en déterminer les raisons. Il semblerait cependant que les zones de repos leur soient plus propices, ce qui les incite à les utiliser d'avantage, augmentant ainsi leur temps de séjour. Par ailleurs, les tests statistiques effectués sur la proportion d'individus ayant utilisé les zones de stabulations en fonction des configurations corroborent cette analyse ($\chi^2=7.45$, ddl=2, p-val=0.024) (Figure V-37).

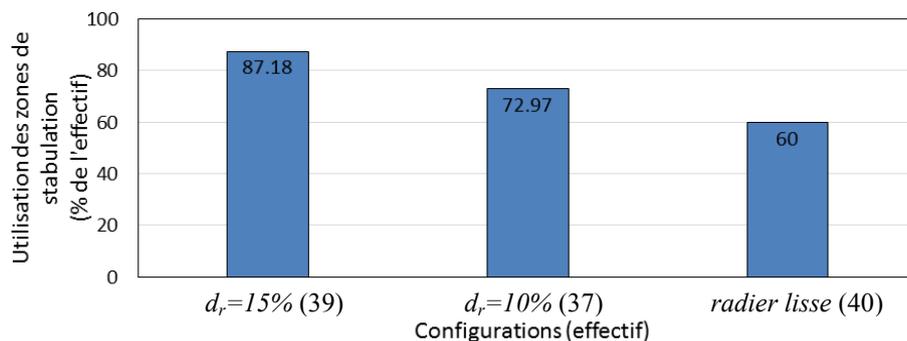


Figure V-37. Proportions de l'effectif de truites *fario* qui utilisent les zones de stabulation en fonction des configurations (Michaud, 2015).

Pour toutes les autres espèces de poissons testées, les temps de séjour ne présentent pas de différences significatives entre les configurations.

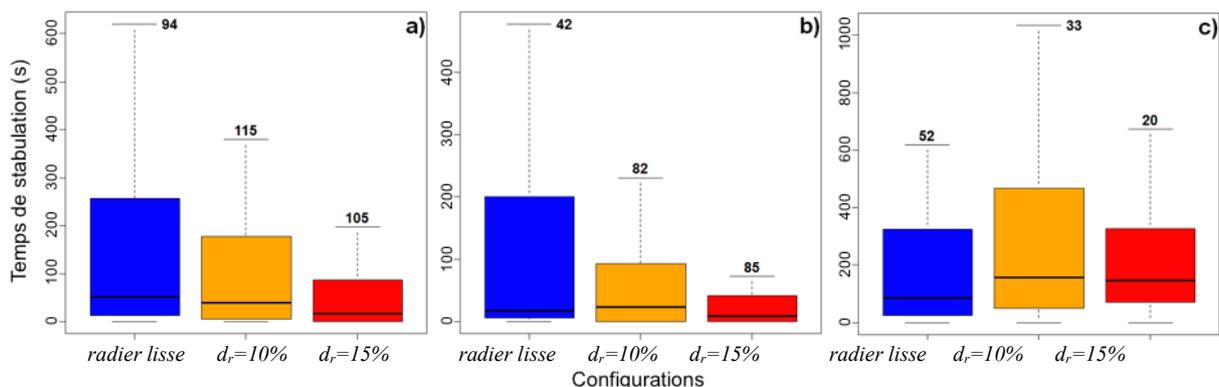


Figure V-38. Temps de stabulation des truites arc-en-ciel en fonction des configurations. a) toutes les tailles, b) les lots de poissons de grande taille et c) les lots de poissons de petite taille. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons (Vaillé, 2016).

En revanche, pour les lots de truites arc-en-ciel de plus grande taille, le temps de stabulation décroît lorsque la densité des macro-rugosités augmente (Figure V-38).

Les macro-rugosités ne modifient pas le temps de stabulation des truites de petite taille. Par ailleurs, l'analyse des résultats issus de la vue latérale du bassin, permet de montrer que les truites arc-en-ciel qui utilisent les zones de stabulation 2 et 3 se positionnent plus dans la partie basse de l'écoulement que dans la partie haute, ce qui n'est pas le cas pour les zones 1 et 4. Cependant, les macro-rugosités ne favorisent pas significativement la stabulation en partie basse.

V.5.4 Synthèse sur les trajectoires

Les statistiques des trajectoires empruntées par les poissons ont été globalement identiques pour chacune des campagnes expérimentales. L'analyse présentée ici correspond aux tests effectués sur les truites arc-en-ciel.

La densité de macro-rugosité $d_r=15\%$ affecte de manière significative la dernière zone occupée par les poissons avant de franchir la fente amont du bassin 3. Une augmentation de l'accès du bassin en amont par la zone 1 a été notée ainsi qu'une diminution de l'accès par la zone 2.

Après un passage dans la zone 1, 25% des poissons dans la configuration *radier lisse* retournent directement dans la zone 1, contre 17% pour les configurations $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$. Les individus ont tendance à se diriger plus souvent de la zone 1 vers la zone 4 dans les configurations avec des rugosités (16.5% pour les configurations $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$ et 12% pour la configuration *radier lisse*).

Après un passage dans la zone 2, les individus ont majoritairement utilisé la zone 3 dans la configuration *radier lisse* (41%) et dans la configuration $d_r=10\%$ (52%). En revanche, en configuration $d_r=15\%$ seulement 15% des individus réalisent ce trajet. La zone 1 a été largement utilisée après un passage dans la zone 2 en configuration $d_r=15\%$ (54%) et dans une moindre mesure en configuration *radier lisse* et $d_r=10\%$ (en moyenne 26%).

Lorsque les individus sortent de la zone 3, leur destination principale est la zone 2 pour les configurations *radier lisse* (73%) et $d_r=10\%$ (66%) contre 42% pour la configuration $d_r=15\%$. Les configurations *radier lisse* et $d_r=10\%$ ont les mêmes pourcentages en ce qui concerne le passage des individus de la zone 3 vers la zone 1 (10%) et de la zone 3 vers le franchissement de la fente aval (6%). En configuration $d_r=15\%$ ces pourcentages sont plus élevés : 16% de la zone 3 vers la zone 1 et 16% franchissent la fente aval.

La zone 1 est majoritairement la dernière zone de passage des individus avant le franchissement de la fente aval en dévalaison dans les configurations *radier lisse* (44%) et $d_r=10\%$ (43%). En configuration $d_r=15\%$ la dernière zone de passage des poissons avant le franchissement de la fente aval en dévalaison est la zone 4 (47%).

V.6 Conclusion

Ce chapitre était consacré à l'étude de l'insertion de macro-rugosités dans une passe à poissons à fentes verticales. L'influence des macro-rugosités sur l'écoulement a été analysée d'un point de vue hydraulique et cinématique par l'intermédiaire de mesures expérimentales et de simulations numériques. Des tests biologiques ont également été réalisés avec différentes espèces de poissons pour caractériser l'effet des macro-rugosités sur le comportement des poissons et sur l'efficacité du dispositif.

L'étude hydraulique a mis en évidence le fait que l'ajout des macro-rugosités sur le radier d'une passe à poissons modifie significativement la topologie de l'écoulement. En particulier, l'augmentation de la densité des plots tend à faire apparaître la topologie transitoire sur une plus large gamme de largeurs de bassins, en repoussant la topologie de type 1 vers les plus grandes

largeurs et celle de type 2 vers les plus petites. Contrairement à la configuration radier lisse, l'augmentation du débit, donc de la hauteur d'eau, au-dessus des macro-rugosités induit également un élargissement de la zone de transition. L'évolution du coefficient de débit en fonction de la pente, de la largeur des bassins, du débit et de la densité des macro-rugosités a ensuite été étudiée. Les macro-rugosités ont un impact sur le coefficient de débit. Leur présence modifie l'influence des paramètres géométriques des bassins et peut générer, dans certaines configurations (fortes pentes, faibles largeurs de bassins), une diminution du C_d de l'ordre de 10 à 15%.

Pour quantifier l'influence de la densité de macro-rugosités sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement, une comparaison des profils de vitesses et d'énergies cinétiques turbulentes obtenus dans les configurations *radier lisse*, $d_r=10\%$ et $d_r=15\%$ a été effectuée. Elle a montré que la variation de la densité de macro-rugosités n'avait pas une influence significative sur les grandeurs statistiques de l'écoulement. Il a été noté une légère diminution de l'énergie cinétique turbulente en présence de macro-rugosités. En revanche, les vitesses moyennes n'ont pas été significativement diminuées. La position des plans de mesures, pour $Z/h_r=3$, est potentiellement en dehors de la sous-couche rugueuse et donc de la zone d'influence des macro-rugosités, ce qui peut expliquer le faible impact de ces dernières sur les quantités statistiques mesurées.

L'analyse de l'écoulement tridimensionnel dans la passe à poissons avec une densité de macro-rugosités $d_r=15\%$ pour deux largeurs de bassins a été effectuée grâce à des simulations numériques réalisées en LES. Pour la petite largeur de bassins ($B/b=6,67$), l'écoulement moyen reste bidimensionnel. Pour la plus grande largeur de bassin ($B/b=9$), l'insertion des macro-rugosités augmente la tridimensionnalité de l'écoulement moyen en inclinant l'axe du tourbillon de la zone de recirculation supérieure. L'étude de l'écoulement par la technique de la double moyenne a permis d'évaluer la zone d'influence des macro-rugosités, *i.e.* la sous-couche rugueuse, à une distance $z_{RS}=1,35h_r$ du radier. L'étude de l'écoulement instationnaire a montré que les trois phases de l'écoulement observées au sein d'une passe à poissons classique existent encore lorsque des macro-rugosités sont disposées sur le radier. En revanche, dans la sous-couche rugueuse, elles sont moins énergétiques en raison du taux de dissipation important. D'autre part, les caractéristiques du jet sont légèrement modifiées. Son épaisseur de diffusion transversale diminue avec les macro-rugosités pour les deux largeurs de bassins étudiées. En revanche, la décroissance de la vitesse maximale dans le jet n'est pas impactée.

Des expérimentations avec différentes espèces de poissons ont été menées au laboratoire pour évaluer l'impact de la présence des macro-rugosités sur le comportement des poissons. L'analyse des vidéos issues de ces manipulations, a révélé que les régions identifiées comme potentiellement favorables correspondent à celles utilisées par les poissons en situation de nage stationnaire (zones de repos). Des tests statistiques ont été réalisés et ont permis de montrer qu'il n'existait pas d'influence significative (dans les conditions expérimentales du laboratoire) des macro-rugosités sur les indices généraux reflétant le comportement des poissons. Cependant des tendances ont été notées pour certaines espèces, notamment une augmentation du franchissement et de l'activité lorsque des macro-rugosités sont présentes. Certaines espèces utilisent également plus les zones de repos. En ce qui concerne les trajectoires empruntées par les poissons, les macro-rugosités n'entraînent globalement pas de modifications significatives. L'écoulement de sillage généré derrière chacun des plots permet de dissiper l'énergie de l'écoulement et de créer des zones susceptibles de servir d'abris pour les poissons. Cependant, la taille légèrement trop importante des individus ne leur permettait pas de nager entre les macro-rugosités et donc de tirer profit de ces régions des bassins où l'écoulement pourrait leur être certainement plus favorable (présence de nombreux abris).

Chapitre 6

ETUDE DE L'INFLUENCE DES STRUCTURES FLEXIBLES

Sommaire

VI.	ETUDE DE L'INFLUENCE DES STRUCTURES FLEXIBLES	179
VI.1	Coefficient de débit.....	180
VI.2	Influence des structures souples sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement	182
	VI.2.1 Influence des structures souples en grande largeur ($B/b=9$).....	182
	VI.2.2 Influence des structures souples en petite largeur ($B/b=6,67$).....	185
VI.3	Analyse de l'interaction fluide/structure	189
	VI.3.1 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux	189
	VI.3.2 Analyse de l'écoulement et du comportement des structures pour la grande largeur de bassin ($B/b=9$).....	191
VI.4	Influence des structures souples sur le comportement des poissons	196
	VI.4.1 Identification des zones de stabulations	197
	VI.4.2 Synthèse sur les indices généraux	197
	VI.4.3 Synthèse sur les temps de stabulation	198
	VI.4.4 Synthèse sur les trajectoires.....	198
VI.5	Conclusion	199

L'analyse bibliographique et l'expérience acquise au sein du laboratoire sur la problématique de l'adaptation aux petites espèces des caractéristiques de l'écoulement par l'insertion d'obstacles, a conduit à l'étude de l'ajout de structures flexibles dans les bassins. L'objectif de ce dernier dispositif est d'augmenter la dissipation d'énergie dans les bassins en évitant, par leur flexibilité, les problèmes d'obstruction et de colmatage liés au passage des corps dérivants. Ce chapitre est consacré à l'étude de l'insertion de structures flexibles dans une passe à poissons à fentes verticales, pour augmenter la dissipation d'énergie et favoriser le franchissement des plus petites espèces de poissons. L'influence des structures flexibles sur l'écoulement est tout d'abord analysée d'un point de vue hydraulique et cinématique par des mesures expérimentales et des simulations numériques. Pour caractériser l'effet des structures flexibles sur le comportement de différentes espèces de poissons et sur l'efficacité du dispositif, les résultats des tests biologiques sont ensuite exposés.

VI.1 Coefficient de débit

Pour obtenir un fonctionnement hydraulique conforme à ce qui est attendu lors du dimensionnement, le coefficient de débit de l'ouvrage doit être correctement estimé. Il est alors important de connaître son évolution en fonction des différents paramètres, géométriques ou hydrauliques, qui caractérisent la configuration de passe à poissons retenue lors du dimensionnement. Ainsi, l'impact sur le coefficient de débit C_d de l'insertion de structures souples dans le jet à l'entrée des bassins est étudié en fonction de la pente, du débit et de la largeur des bassins (Figure VI-1). Les incertitudes, calculées pour chaque coefficient, sont données sous la forme de barre d'erreurs. Toutes configurations confondues, le C_d varie de 0,62 +/-0,03 à 0,89 +/-0,02 avec $k=2$.

La figure VI-1 a) donne une évolution du coefficient de débit en fonction de Q^A pour $B/b=7,67$, représentative de celle obtenue pour les différentes pentes et largeurs de bassins. Tout d'abord, contrairement à la configuration *radier lisse*, en présence de structures souples le débit a un impact sur la valeur du coefficient de débit (Figure VI-1 a). Lorsque le débit augmente, la fraction de l'écoulement qui passe au-dessus des structures souples est plus importante, réduisant ainsi l'influence globale de ces dernières sur le C_d . L'accroissement du débit de $Q^A=3,8$ à $Q^A=6,7$ entraîne une augmentation moyenne du C_d de 10,8% +/-3,1%, calculée pour toutes les largeurs de bassins et pour toutes les pentes.

La diminution du C_d en fonction de la pente de la passe à poissons est du même ordre de grandeur dans la configuration *radier lisse* et *structures souples* (-10% en moyenne) (Figure VI-1 b). En revanche, le coefficient de débit n'est pas affecté de la même manière par l'augmentation de la largeur des bassins (Figure VI-1 c). Dans la configuration *radier lisse*, l'augmentation de la largeur des bassins entraîne une diminution de 15% en moyenne du coefficient de débit, quelle que soit la pente et le débit. Lorsque les structures souples sont insérées, la diminution moyenne du C_d entre $B/b=5,67$ et 9 est de 4% avec une dispersion moyenne de 3% en prenant en compte toute la gamme de débit et toutes les pentes. L'influence de la largeur des bassins peut donc être considérée, dans ces conditions, comme étant négligeable. Pour la plus grande largeur de bassin, le C_d obtenu en présence de structures souples est équivalent à celui obtenu dans la configuration *radier lisse*. Ainsi, quand la largeur des bassins diminue, l'insertion des structures souples diminue le coefficient de débit, en raison essentiellement de l'augmentation du C_d en configuration *radier lisse*.

Le coefficient de débit est donc impacté par la pente et le débit. La vitesse maximale théorique atteinte dans le jet est proportionnelle à la racine carrée de la pente. Les structures souples étant positionnées dans le jet, une augmentation de la pente génère une vitesse plus importante entre ces dernières. La perte de charge se trouve ainsi augmentée. Il est à noter que cette perte de charge est équivalente à celle obtenue pour une topologie de type 1 en configuration *radier lisse* dans laquelle le jet est soumis à un battement important, allant alternativement à droite et à gauche du déflecteur central. À pente identique, une diminution de débit réduit quant à elle le

niveau d'eau au-dessus des structures souples, ce qui confine l'écoulement et l'oblige à passer au travers de la canopée formée par les structures. La perte de charge est donc augmentée, se traduisant alors par une diminution du coefficient de débit.

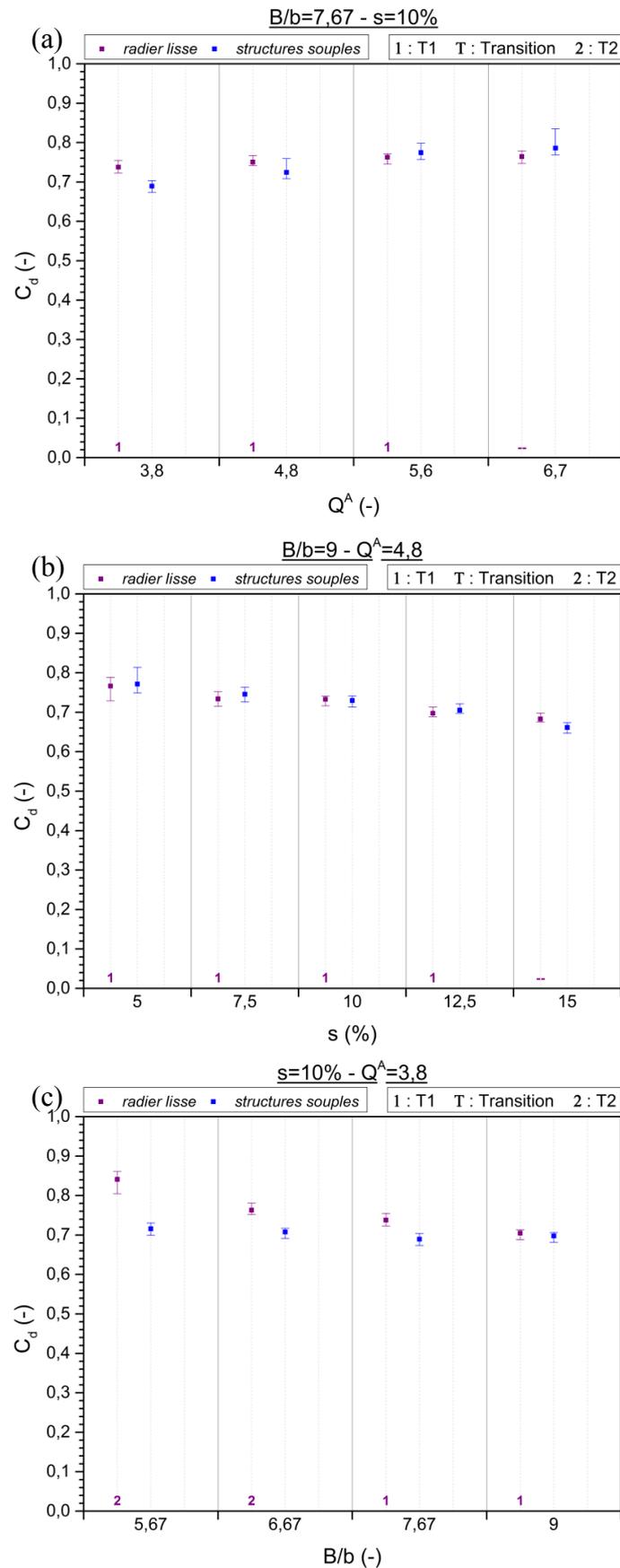


Figure VI-1. Evolution du coefficient de débit dans les configurations *radier lisse* et *structures souples* en fonction : (a) du débit, (b) de la pente et (c) de la largeur de bassin.

En configuration *radier lisse*, un rétrécissement de la largeur des bassins entraîne une diminution de la perte de charge (augmentation du coefficient de débit), due au changement de topologie de l'écoulement notamment. Cet effet n'est plus constaté en présence de structures souples, indiquant que la topologie d'écoulement générée n'est plus dépendante de la largeur des bassins.

VI.2 Influence des structures souples sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement

L'insertion des structures souples dans l'écoulement modifie les caractéristiques hydrauliques de la passe à poissons. Pour caractériser expérimentalement les modifications générées par la présence de ces structures sur la cinématique de l'écoulement, des profils de vitesses et d'énergie cinétique turbulente ont été réalisés pour des largeurs de bassins $B/b=6,67$ et 9 , une pente $s=7,5\%$ et un débit $Q^4=4,8$. À la manière de ce qui a été effectué dans le chapitre précédent sur les macro-rugosités, l'étude des structures souples va être menée en adimensionnant la hauteur Z par la hauteur des structures souples ($L_c=0,15$ m).

VI.2.1 Influence des structures souples en grande largeur ($B/b=9$)

La figure VI-2 permet de mettre en évidence l'influence des structures souples à la fois sur la topologie moyenne de l'écoulement et sur les valeurs de l'énergie cinétique turbulente.

L'échelle des vecteurs vitesses est identique pour les deux configurations. Le plan de mesure sur lequel les profils ont été réalisés est parallèle au radier et situé à une distance $Z/L_c=1$ ($Z/b=2$).

La présence des structures souples modifie significativement les caractéristiques cinématiques et turbulentes de l'écoulement. Tout d'abord, la topologie de l'écoulement est totalement différente. Dans la configuration *radier lisse*, le jet a en moyenne une forme courbe et alimente deux zones de recirculation contrarotatives sur sa gauche et sur sa droite. La présence de structures souples empêche la formation de la grande zone de recirculation supérieure. Au regard de la direction prise par les vecteurs du profil B lorsque Y/b se rapproche de 0, il semble cependant que la petite zone de recirculation inférieure subsiste. La taille des vecteurs indique que le jet se diffuse principalement dans la zone inférieure du bassin (environ $Y/b<3$). Par ailleurs, la comparaison avec la configuration *radier lisse* montre que la vitesse moyenne maximale dans le jet est réduite de moitié (-56%). En ce qui concerne la vitesse moyenne dans la zone supérieure du bassin, elle est globalement divisée par 1,7.

Avec les structures souples, l'énergie cinétique turbulente est également fortement réduite dans la partie inférieure du bassin, notamment dans la zone correspondant au passage du jet ($Y/b<3$) (réduction moyenne de 58%). En revanche, dans la partie supérieure du bassin ($Y/b>5$) elle est en moyenne doublée. La figure VI-3 permet de visualiser la vitesse verticale W/V_d (positive lorsqu'elle est dirigée vers le haut) mesurée pour chaque profil de vitesse. Dans la configuration *radier lisse* et dans le jet pour des valeurs de Y/b comprises entre 0 et 4, W/V_d est proche de 0 et sa contribution par rapport à la norme bidimensionnelle de la vitesse ($\|V\|_{2D}/V_d$) est négligeable. Pour ce même intervalle, derrière les structures souples, une zone de vitesse verticale positive apparaît. La contribution de W/V_d est importante, allant même jusqu'à dépasser la contribution de $\|V\|_{2D}/V_d$ vers le milieu du bassin ($Y/b\cong 4$).

Globalement, pour la plus grande largeur de bassin ($B/b=9$), l'ajout des structures souples réduit la vitesse moyenne $\|V\|_{2D}/V_d$ de moitié par rapport à la configuration *radier lisse*. Cependant il est à noter une contribution plus importante de la composante verticale de la vitesse moyenne dans le jet. En ce qui concerne l'énergie cinétique turbulente, elle est en moyenne approximativement divisée par deux dans le passage du jet et doublée dans la zone supérieure des bassins.

Les profils verticaux de vitesses moyennes et d'énergie cinétique turbulente en D et D' ont également été tracés respectivement sur les figures VI-4 et VI-5 afin de connaître l'évolution de la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau.

Les couleurs des vecteurs représentent les valeurs de la composante transversale de vitesse. L'écoulement qui passe par le profil D (Figure VI-4) est animé d'une vitesse verticale conséquente de $Z/L_c=0,3$ à $1,4$, limite à partir de laquelle elle est fortement réduite à l'instar de la vitesse transversale. D'autre part, à ce niveau ($Z/L_c =1,4$) la vitesse longitudinale augmente sensiblement, générant un gradient important de vitesse selon l'axe Z.

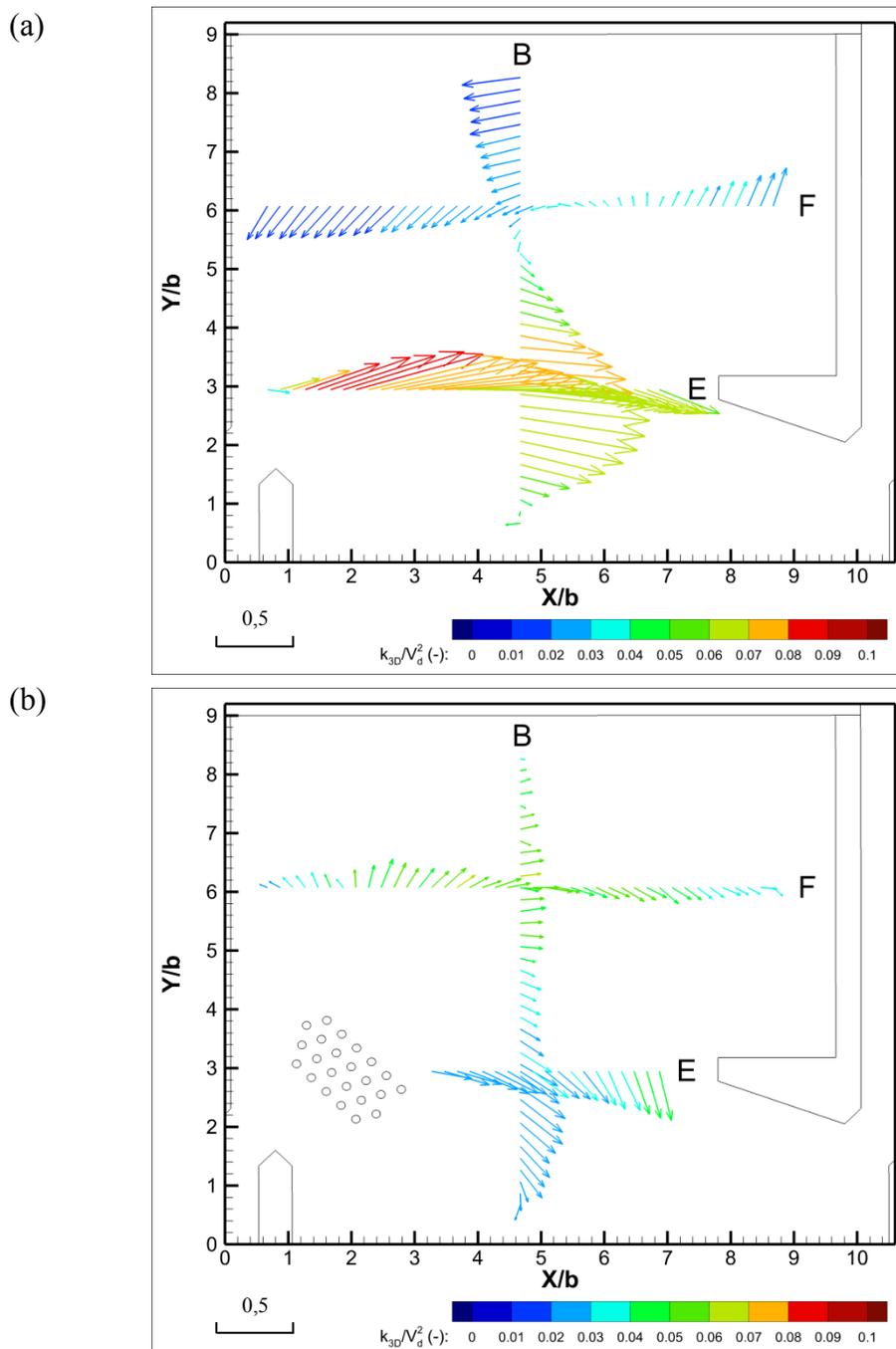


Figure VI-2. Profils de vitesses moyennes colorés en fonction de l'énergie cinétique turbulente pour $B/b=9$ en $Z/L_c=1$. a) configuration *radier lisse* ; b) configuration *structures souples*.

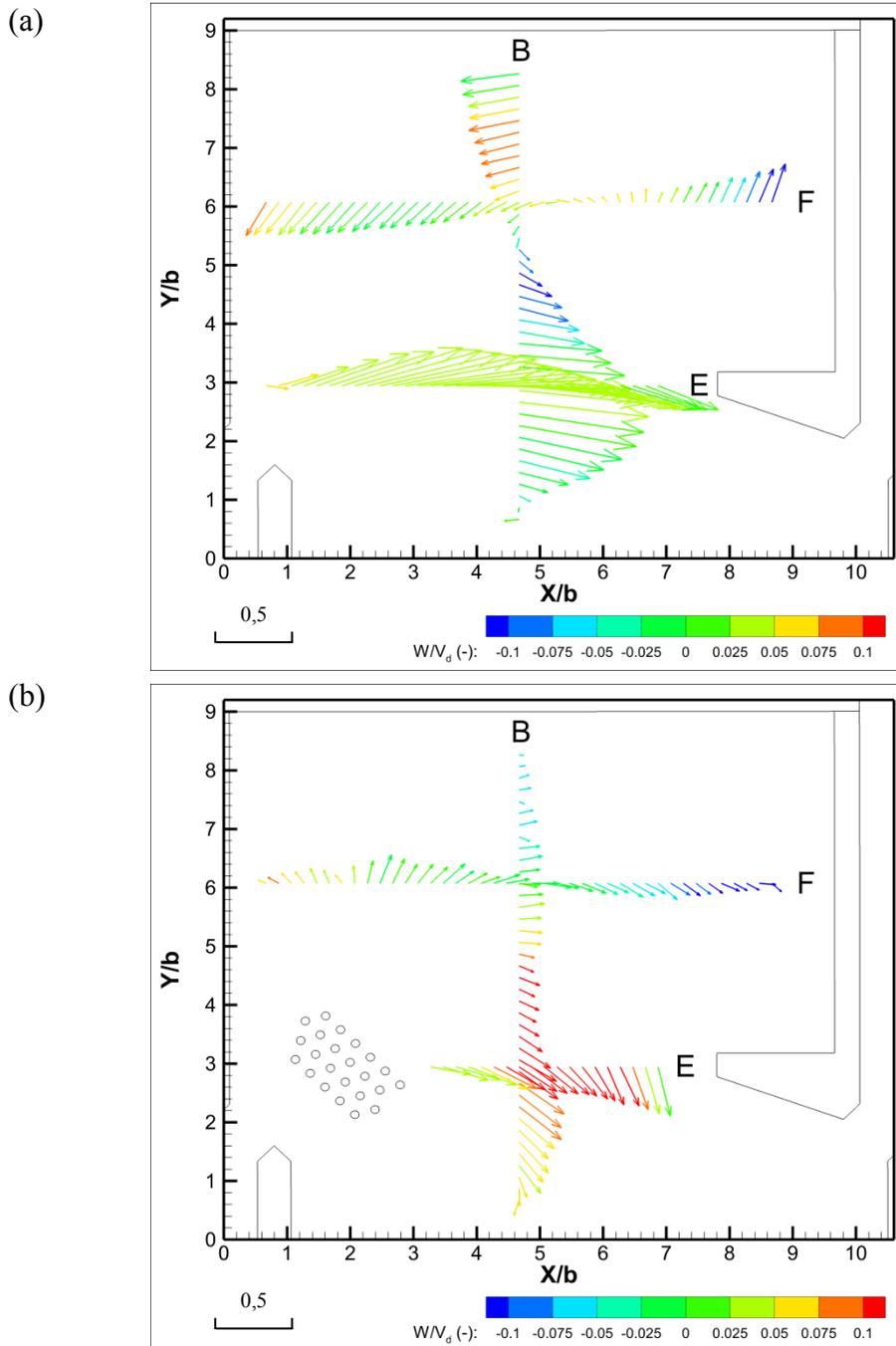


Figure VI-3. Profils de vitesses moyennes colorés en fonction de la vitesse verticale W/V_d pour $B/b=9$ en $Z/L_c=1$.
a) configuration *radier lisse* ; b) configuration *structures souples*.

Sur ce même intervalle ($Z/L_c=0,3$ à $1,4$), l'énergie cinétique turbulente est réduite de manière significative (environ -45%) par rapport à celle obtenue en configuration *radier lisse*, synonyme d'une fluctuation moyenne de vitesse plus faible.

Pour le profil D' (Figure VI-5), il est observé une inversion simultanée de la composante de vitesse moyenne longitudinale et transversale à $Z/L_c \cong 0,5$. Cela semble indiquer la présence d'un tourbillon d'axe horizontal, incliné dans le sens des X décroissants. La vitesse verticale moyenne reste quant à elle négligeable. En ce qui concerne l'énergie cinétique turbulente, elle est en augmentation constante sur toute la colonne d'eau. Près du fond, elle est égale à l'énergie cinétique turbulente mesurée au sein de l'écoulement en configuration *radier lisse*, alors qu'elle atteint presque 3 fois sa valeur à $Z/L_c=1,8$.

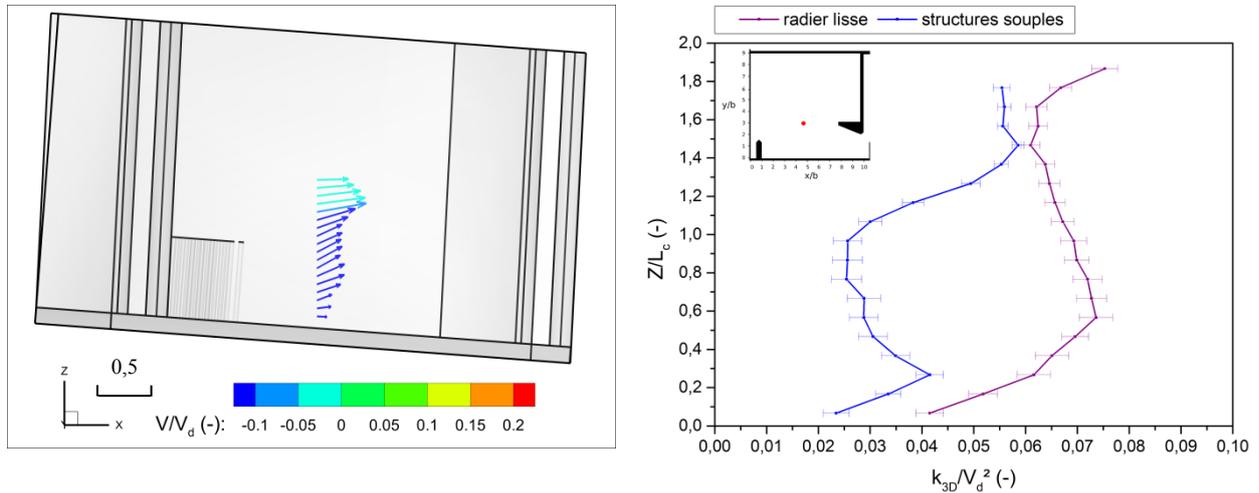


Figure VI-4. Evolution de la vitesse moyenne (a) et de l'énergie cinétique turbulente (b) pour le profil D dans la configuration *structures souples* et $B/b=9$.

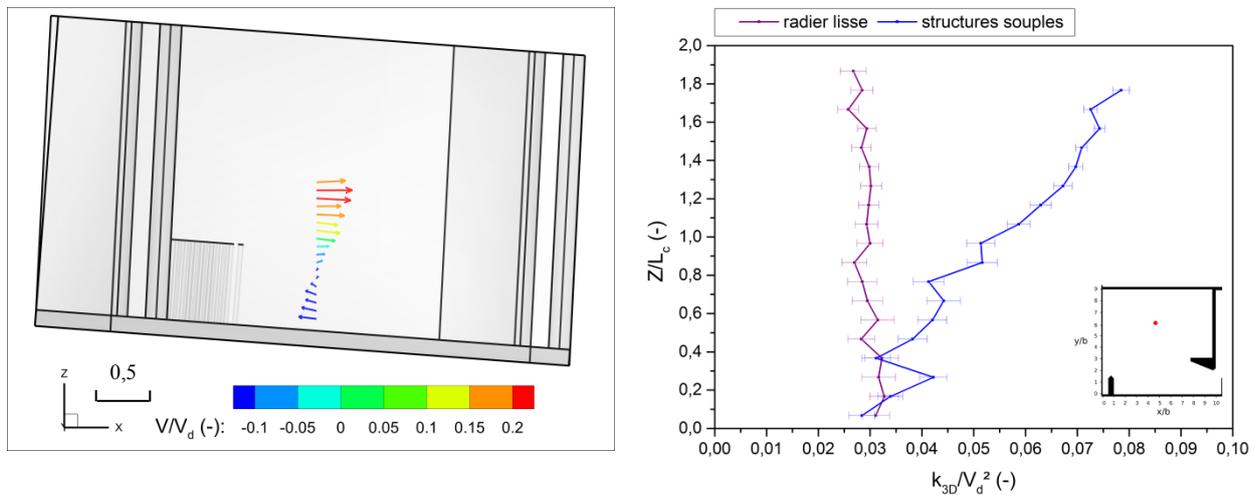


Figure VI-5. Evolution de la vitesse moyenne (a) et de l'énergie cinétique turbulente (b) pour le profil D' dans la configuration *structures souples* et $B/b=9$.

VI.2.2 Influence des structures souples en petite largeur ($B/b=6,67$)

La figure VI-6 permet de mettre en évidence l'influence des structures souples à la fois sur la topologie moyenne de l'écoulement et sur l'énergie cinétique turbulente.

Les structures souples ont également un impact sur la topologie de l'écoulement en petite largeur de bassin ($B/b=6,67$). Dans la configuration *radier lisse* (Figure VI-6 a), le jet sort de la fente amont avec une vitesse et une énergie cinétique turbulente importantes. Contrairement à l'écoulement généré en grande largeur, il n'est pas orienté vers l'aval mais principalement vers la paroi opposée à la fente. Le jet contourne ensuite le déflecteur central puis ressort par la fente aval en générant une grande zone de recirculation sur sa droite. En passant devant ce déflecteur, le jet, essentiellement dirigé sur l'axe transversal, génère un décollement et une zone de recirculation sur la plus grande face biseautée du déflecteur. Dans la configuration *structures souples* (Figure VI-6 b), la trajectoire du jet n'est pas évidente. Sur le profil B, il existe deux zones pour lesquelles la vitesse moyenne est visiblement plus importante. La première se situe à mi-bassin ($Y/b \cong 3$) et la deuxième près de la paroi opposée à la fente ($Y/b \cong 6$). Sur ce profil, le changement de signe de la vitesse longitudinale en $Z/b \cong 1$ permet de supposer qu'une zone de recirculation existe dans la partie inférieure du bassin. Sur le profil E, une vitesse transversale importante est observée pour Y/b compris entre 6 et 7, et correspond à la vitesse maximale mesurée en prenant en compte les 3 profils (B, D et E). Par ailleurs, cette partie du profil est soumise à une fluctuation moyenne assez importante.

De manière générale, les structures souples diminuent la vitesse moyenne $\|V\|_{2D}/V_d$ ainsi que l'énergie cinétique turbulente de l'écoulement. Elles modifient également la topologie, avec un écoulement orienté davantage vers la paroi opposée à la fente pour $X/b < 3$ (Profil F, Figure VI-6 b).

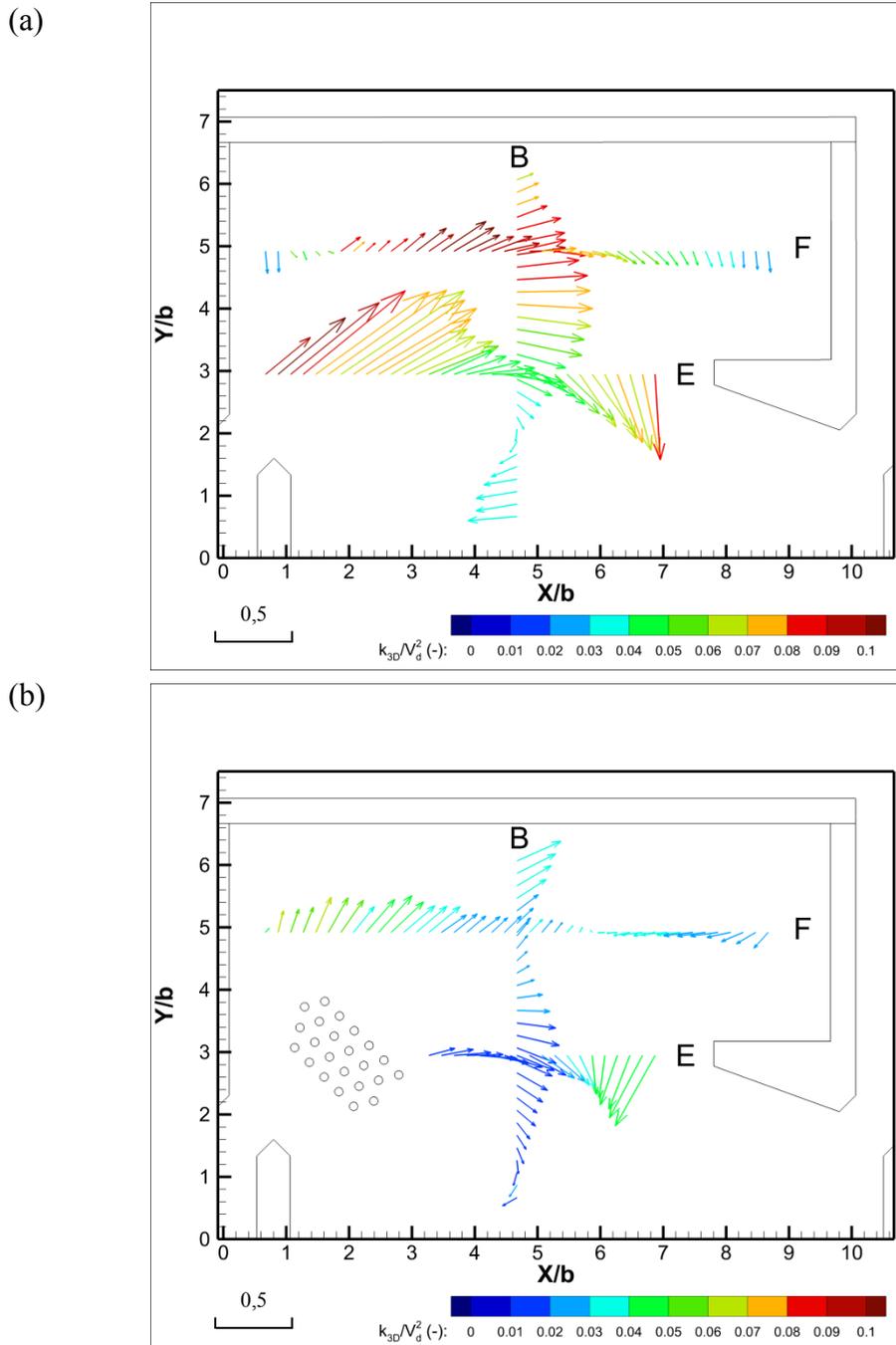


Figure VI-6. Profils de vitesses moyennes colorés en fonction de l'énergie cinétique turbulente pour $B/b=6,67$ en $Z/L_c=1$. a) configuration *radier lisse* ; b) configuration *structures souples*.

La composante de vitesse verticale moyenne a été associée aux vecteurs tracés sur le plan $Z/L_c=1$ (Figure VI-7). Dans la configuration *radier lisse* (Figure VI-7 a), le jet pénètre dans le bassin avec une vitesse verticale W/V_d proche de 0 ($W/V_d \cong 0,03$). L'écoulement est globalement dirigé vers la zone supérieure droite du bassin ($X/b > 7$ et $Y/b > 3$) et impacte la paroi centrale, générant une élévation locale du niveau d'eau et une vitesse W/V_d positive suite au blocage de la vitesse U/V_d et au confinement latéral. Ces effets combinés engendrent alors une forte vitesse verticale lors du contournement du déflecteur central. Dans la configuration *structures souples* (Figure VI-7 b), il existe une zone de forte vitesse verticale au centre du bassin ($X/b \cong 5$ et $Y/b \cong 3$). Le long du profil E, dans un premier temps, la composante de vitesse longitudinale est positive et dominante ($X/b < 5$). Elle diminue ensuite significativement jusqu'à devenir négative, tandis que

la vitesse transversale augmente. En ce qui concerne la vitesse verticale, elle change de signe aux alentours de $X/b=8$, ce qui laisse supposer une rotation d'axe horizontal. Sur le profil B, il est observé une vitesse verticale importante et dirigée vers le bas en $Y/b>6$.

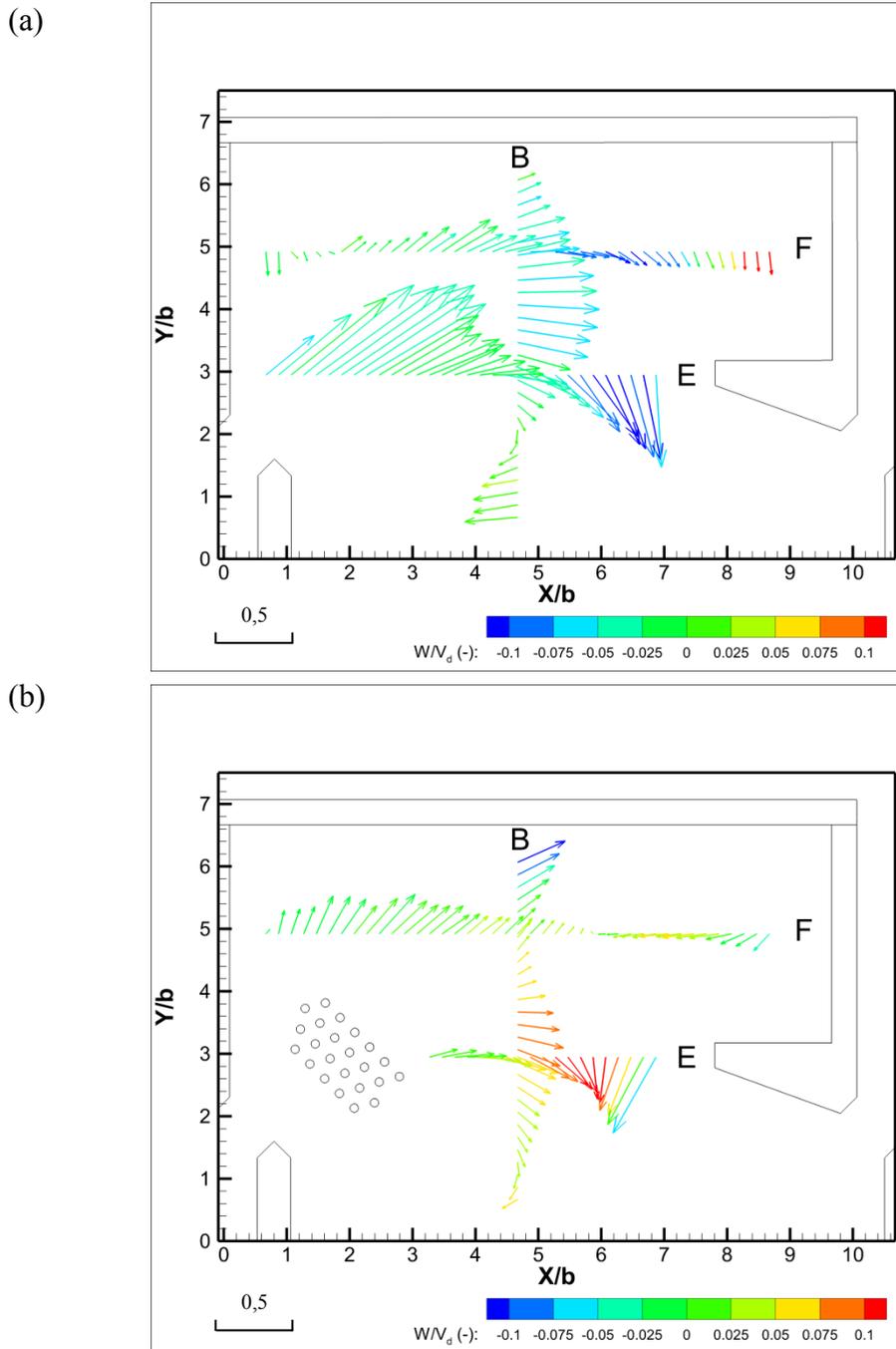


Figure VI-7. Profils de vitesses moyennes colorés en fonction de la vitesse verticale W/V_d pour $B/b=6,67$ en $Z/L_c=1$. a) configuration radier lisse ; b) configuration structures souples.

De manière identique à ce qui a été proposé pour analyser l'écoulement sur la colonne d'eau pour la grande largeur de bassin ($B/b=9$), les profils verticaux de vitesses moyennes et d'énergie cinétique turbulente en D et D' ont été tracés respectivement sur les figures VI-8 et VI-9. Au niveau du profil D (Figure VI-8), sur toute la colonne d'eau, l'écoulement est dirigé en grande partie vers le haut, dans le sens de la pente et vers la paroi située du côté de la fente. La composante de vitesse transversale diminue progressivement du radier à la surface libre alors que les composantes verticales et longitudinales sont maximales au cœur de l'écoulement. L'énergie cinétique turbulente est approximativement constante sur la colonne d'eau et est en moyenne divisée par deux. Sur le profil D' (Figure VI-9), la vitesse verticale est nulle sur toute la hauteur. En revanche, les vitesses longitudinales et transversales subissent des variations importantes. V/V_d est négative près du radier et positive près de la surface libre et atteint des valeurs

importantes. La vitesse longitudinale est faible dans la zone de sillage derrière les structures puis est soumise à un gradient important à partir de $Z/L_c=1$. L'énergie cinétique turbulente est approximativement constante et divisée par 4 par rapport à la configuration sans structures souples entre le radier et $Z/L_c=1$. À partir de $Z/L_c=1$ jusqu'à la surface libre, elle augmente cette fois ci jusqu'à atteindre une valeur équivalente à celle obtenue dans la configuration *radier lisse*.

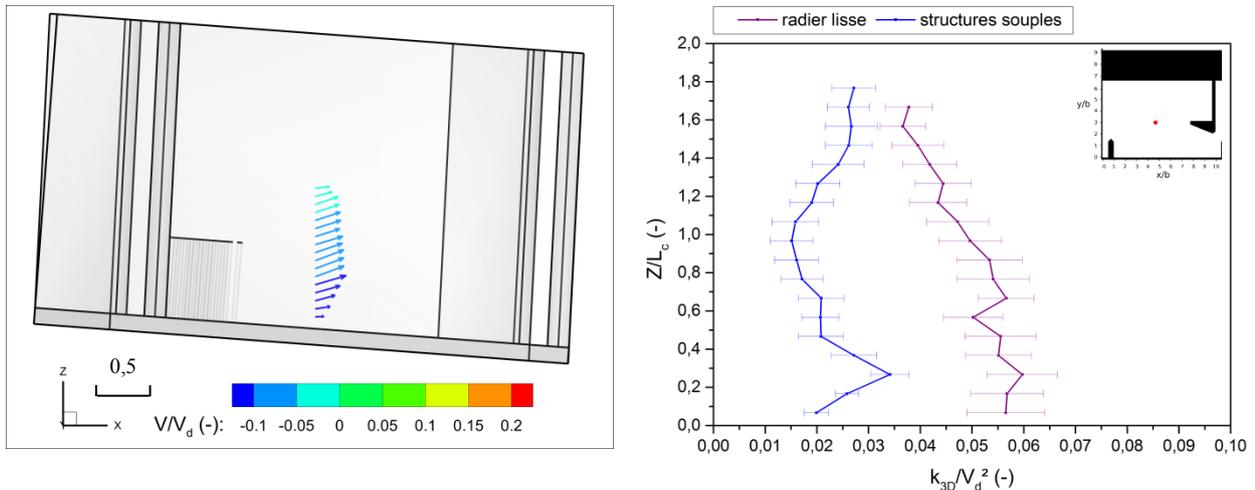


Figure VI-8. Evolution de la vitesse moyenne (a) et de l'énergie cinétique turbulente (b) pour le profil D dans la configuration *structures souples* et $B/b=6,67$.

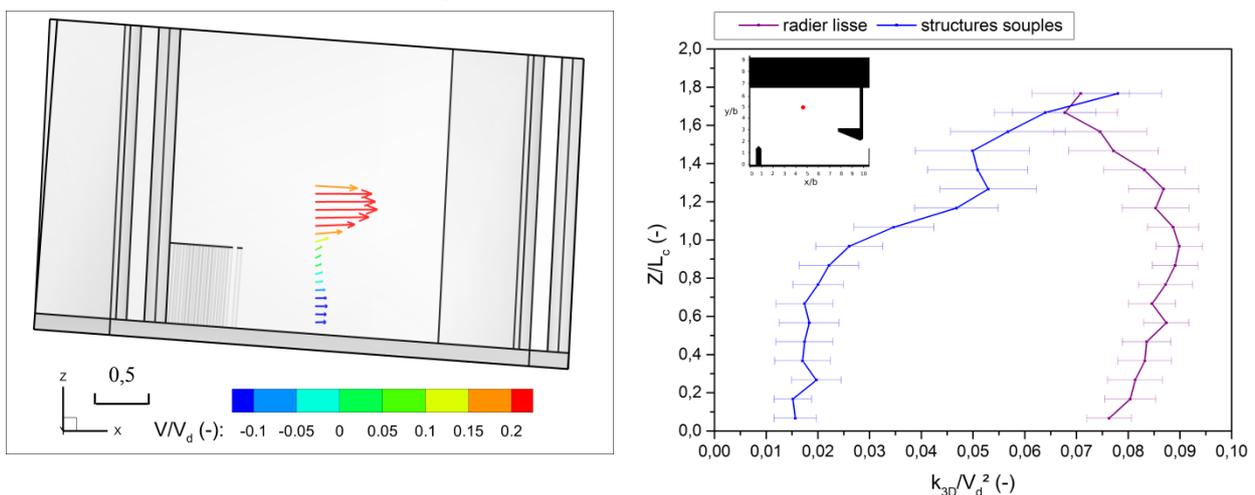


Figure VI-9. Evolution de la vitesse moyenne (a) et de l'énergie cinétique turbulente (b) pour le profil D' dans la configuration *structures souples* et $B/b=6,67$.

Globalement, la combinaison de toutes ces informations permet de dire que l'écoulement est fortement tridimensionnel. Le passage du jet à travers les structures souples génère une zone de sillage s'étendant du radier jusqu'à la hauteur des structures. Dans cette région, l'énergie cinétique turbulente et les vitesses moyennes sont faibles. Au-dessus des structures, le jet est animé d'une vitesse importante, ce qui génère un gradient de vitesse sur Z et qui fait plonger le jet au niveau de la paroi opposée à la fente. Ce dernier remonte ensuite au milieu du bassin avant de sortir par la fente aval.

VI.3 Analyse de l'interaction fluide/structure

Une simulation numérique couplée fluide/structures de l'écoulement dans la passe à poissons en présence des structures souples, a été réalisée. L'écoulement a été simulé par une modélisation URANS 3D en surface libre avec la méthode de volume de fluide (VOF). Les contraintes, les déformations et les déplacements des structures ont été calculées sous l'hypothèse d'un comportement linéaire et élastique du matériau. Le couplage fort existant entre l'écoulement et les structures a nécessité d'utiliser une technique de déformation de maillage (morphing). Ainsi le fluide exerce une pression sur chacune des structures, ce qui les déforme générant une rétroaction des structures sur le fluide. L'équation du mouvement est résolue pour chaque cylindre, permettant ainsi de prendre en compte la dynamique du mouvement. L'étude numérique qui suit, a été réalisée pour une largeur de bassin $B/b=9$, une pente $s=7,5\%$ et un débit $Q^A=4,8$.

VI.3.1 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

De manière à connaître les limites de la modélisation, les profils de vitesses et d'énergie turbulente obtenus de manière numérique, ont été comparés aux profils obtenus expérimentalement par l'ADV (Figure VI-10). Sur le profil B, les composantes transversales et verticales de vitesse moyenne sont du même ordre de grandeur et de même signe en numérique et en expérimental.

En revanche, la vitesse longitudinale atteint des valeurs deux fois plus importantes. De plus, en simulation numérique, le sens de l'écoulement est inversé près de la paroi opposée à la fente ce qui n'est pas observé expérimentalement.

Le profil d'énergie cinétique turbulente est relativement bien modélisé entre $Y/b=0,5$ et $Y/b=5,5$, puis il s'écarte du profil expérimental. En $Y/b=8$, k_{3D}/V_d^2 modélisée est 4 fois plus faible que celle mesurée. Les mêmes remarques peuvent être faites en ce qui concerne les profils D et E. La vitesse U/V_d de l'écoulement modélisé est globalement deux fois plus importante que la vitesse mesurée expérimentalement. En revanche, les vitesses V/V_d et W/V_d suivent approximativement les courbes expérimentales, particulièrement sur le profil E. L'énergie cinétique turbulente est en moyenne 4 fois plus faible. Cette caractéristique est valable également pour les profils D' et F. Sur le profil F les vitesses moyennes obtenues numériquement sont proches de celles mesurées expérimentalement pour des valeurs de X/b comprises entre $5 < X/b < 8$. Au-delà de $X/b=8$, les vitesses verticales et transversales subissent une grande augmentation et atteignent respectivement le double et le quadruple des valeurs attendues.

D'une manière générale, la simulation surestime les vitesses moyennes. La vitesse longitudinale est la plus affectée car elle est augmentée d'un facteur 2. L'énergie cinétique turbulente modélisée est, quant à elle, sous-estimée d'un facteur 4. En revanche, le sens de variation des vitesses est globalement respecté, signe que la topologie est relativement bien modélisée.

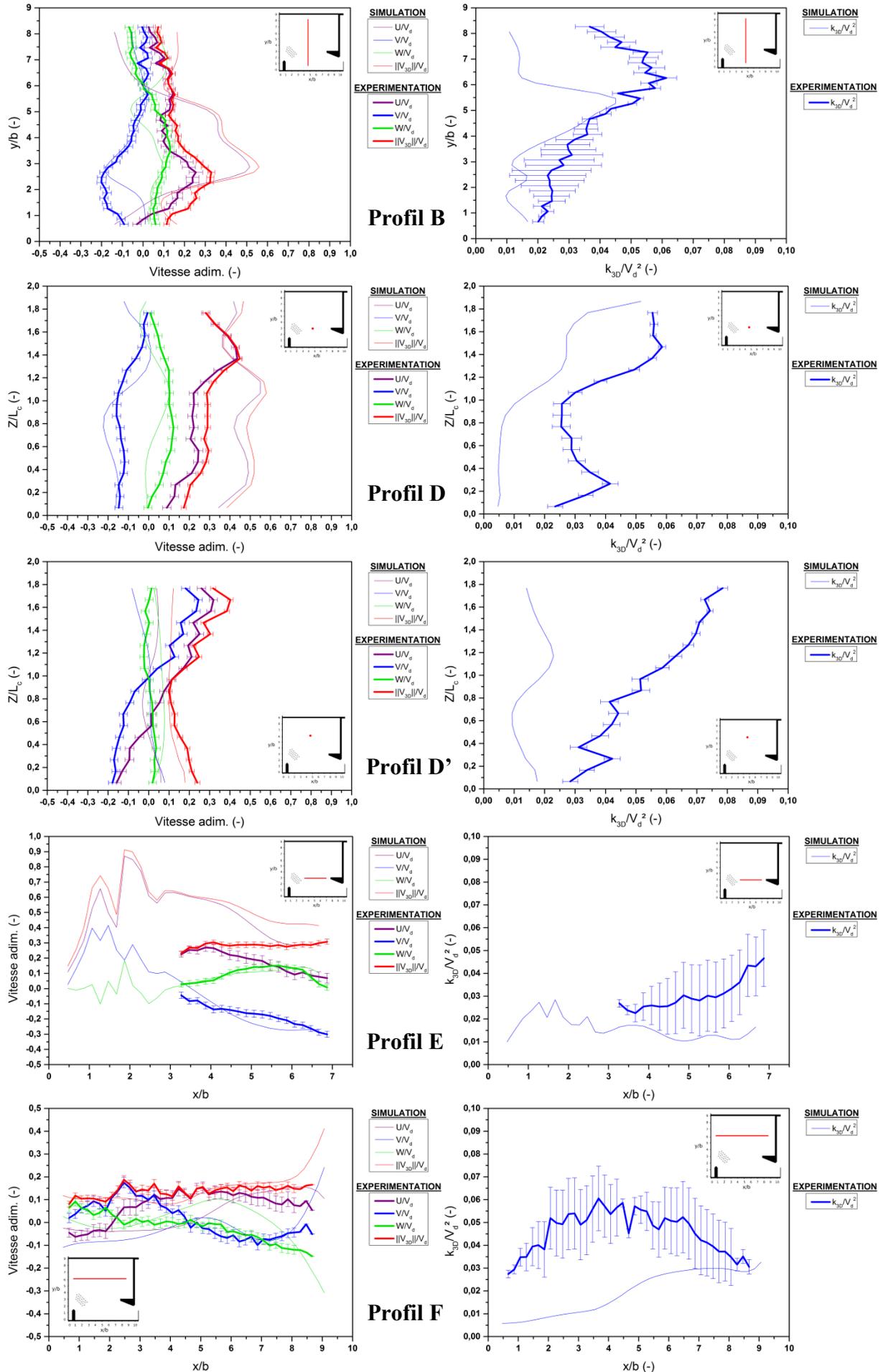


Figure VI-10. Comparaison des profils de vitesses (à gauche) et d'énergie cinétique turbulente (à droite) obtenus numériquement et expérimentalement. De haut en bas : profils B, D, D', E et F.

VI.3.2 Analyse de l'écoulement et du comportement des structures pour la grande largeur de bassin ($B/b=9$)

Les cylindres ont été numérotés (Figure VI-11) pour faciliter la description.

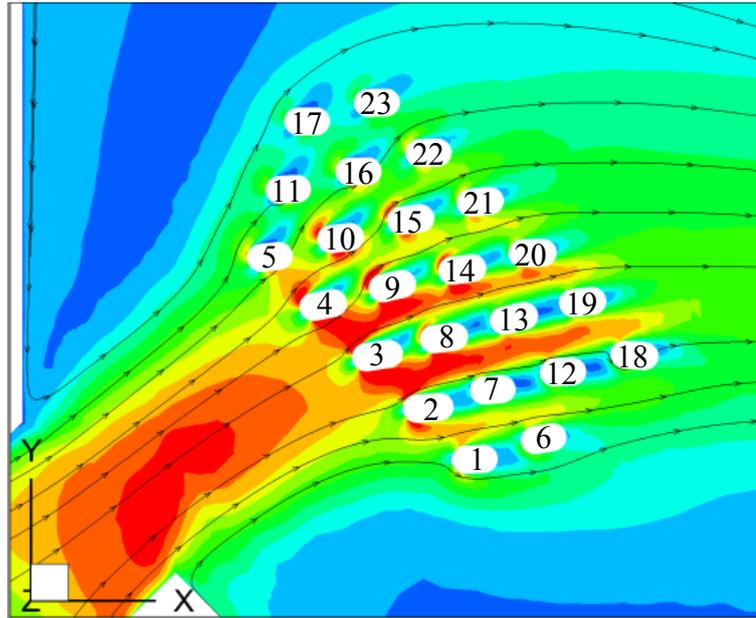


Figure VI-11. Champs de vitesse moyens en configuration *structures souples* pour $B/b=9$. Zoom sur l'écoulement qui traverse la canopée de cylindre à $Z/L_c=0,5$, avec le numéro de chaque cylindre.

Afin de visualiser la variation de la topologie moyenne de l'écoulement sur la colonne d'eau, les champs de vitesses ont été extraits à différents niveaux (Figure VI-12).

Tout d'abord, il est observé sur tous les plans une augmentation significative, de 10% environ, de la vitesse du jet au fur et à mesure que l'écoulement se propage dans les bassins. En revanche, la distribution spatiale des vitesses reste semblable.

Dans le plan $Z/L_c=0,5$, le jet traverse la canopée de cylindres. Les vitesses les plus importantes sont observées entre les cylindres 2-3 et 3-4. Ces deux intervalles sont au départ de deux allées formées par les cylindres situés à l'aval (7-12-18, 8-13-19 et 9-14-20), qui vont guider l'écoulement et l'orienter directement vers la fente aval. Les zones de sillages sont par ailleurs clairement visibles avec des zones de très faibles vitesses derrière les cylindres.

Sur les deux autres plans, le jet se diffuse davantage dans les bassins. À $Z/L_c=1$, il a encore une trajectoire courbe identique à celle observée à $Z/L_c=0,5$, mais il se propage également en partie dans la zone supérieure du bassin. À $Z/L_c=1,5$, la trajectoire du jet est beaucoup plus droite. Le jet est dirigé, en moyenne, vers la paroi du déflecteur central. L'écoulement dans le volume d'eau situé à $Z>L_c$ atteint des vitesses plus importantes que lorsque $Z<L_c$, notamment près des fentes.

La figure VI-13 présente l'isocontour de vitesse pour $\|V\|_{3D}/V_d=0,7$, associé au taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. L'écoulement qui passe à travers les structures souples est fortement ralenti et le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente y est élevé. En revanche, au-dessus de ces dernières, l'écoulement de contournement a une vitesse plus importante et le jet se propage plus loin dans le bassin. En ce qui concerne ϵ , il est équivalent au taux de dissipation existant dans le jet avant le passage au travers des structures.

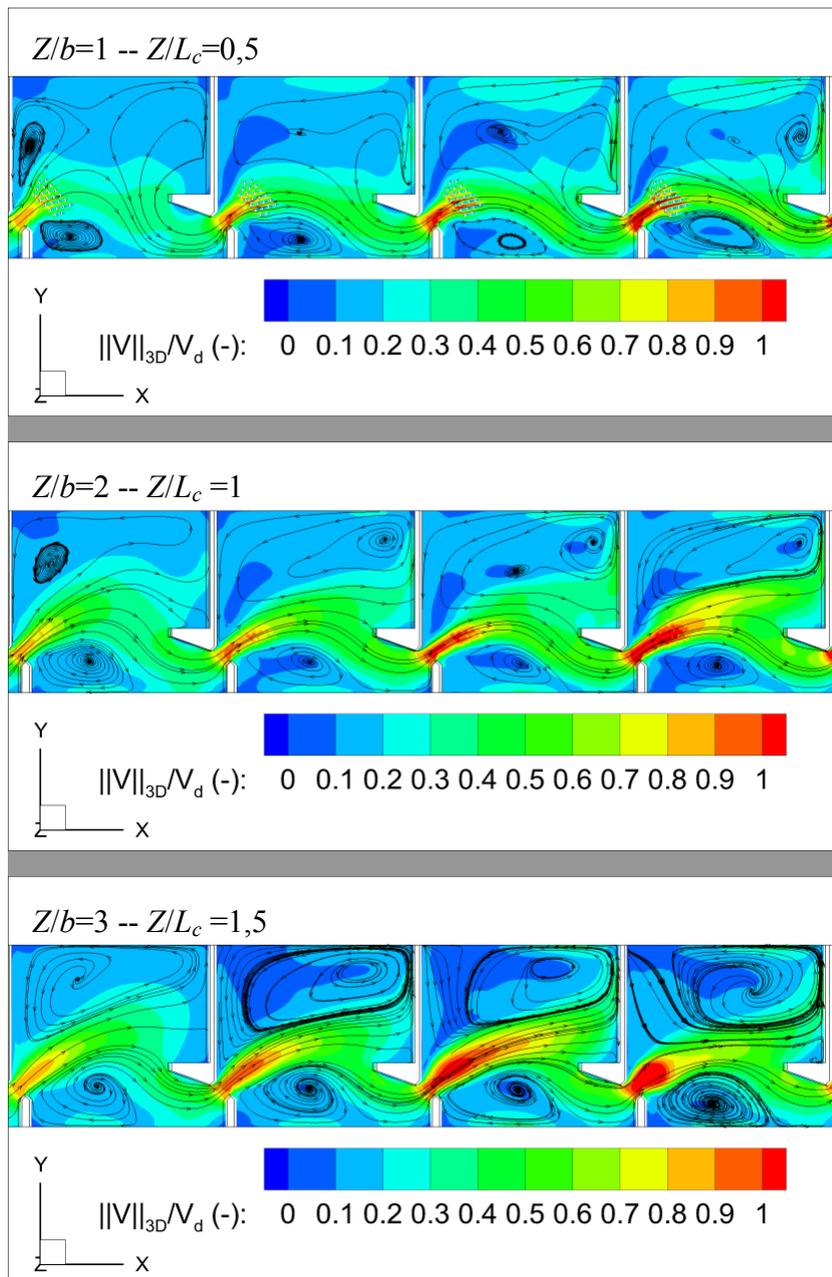


Figure VI-12. Champs de vitesse moyens en configuration *structures souples* pour $B/b=9$. Plans de coupe horizontaux à $Z/b=1$; 2 et 3 équivalent respectivement à $Z/h_r=0,5$; 1 et 1,5.

La vitesse est donc élevée au-dessus des structures et plus faible derrière ces dernières à cause de l'effet de sillage, ce qui génère un gradient de vitesse sur Z .

La figure VI-14 représente ce qui s'apparente à des « lignes de courant » en trois dimensions déterminées à partir du champ moyen de vitesse. Au regard de leur trajectoire, la tridimensionnalité de l'écoulement est importante. Lorsqu'il atteint la paroi du déflecteur central, le jet plonge vers le radier avec une vitesse verticale W/V_d élevée. Il génère ainsi une structure dont l'axe est orienté globalement suivant Y . Cette structure s'étend ensuite transversalement, entraînée vers la fente aval. De l'autre côté du cœur tourbillonnaire, la vitesse verticale est également élevée mais positive. Cette caractéristique a été observée sur les profils de vitesses expérimentaux réalisés avec la sonde ADV.

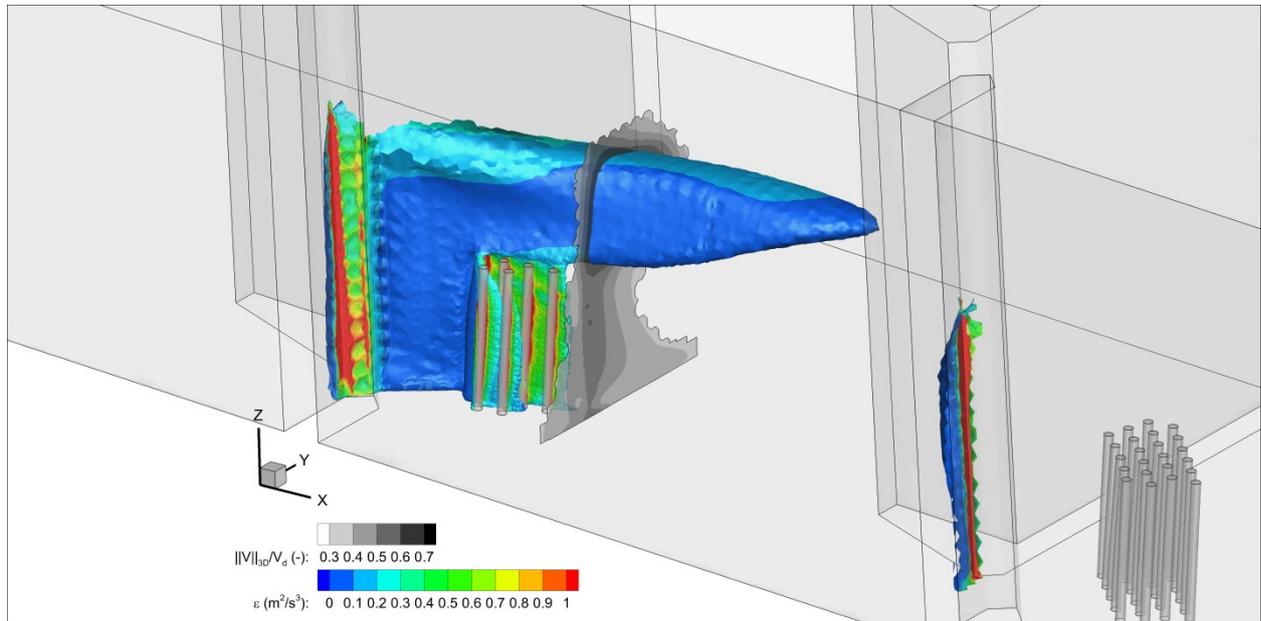


Figure VI-13. En couleur : Isocontours de vitesse $\|V\|_{3D}/V_d=0,7$ et taux de dissipation ; en niveau de gris : $\|V\|_{3D}/V_d$ sur un plan transversal situé à une distance égale à 4 fois le diamètre d'un cylindre derrière les structures.

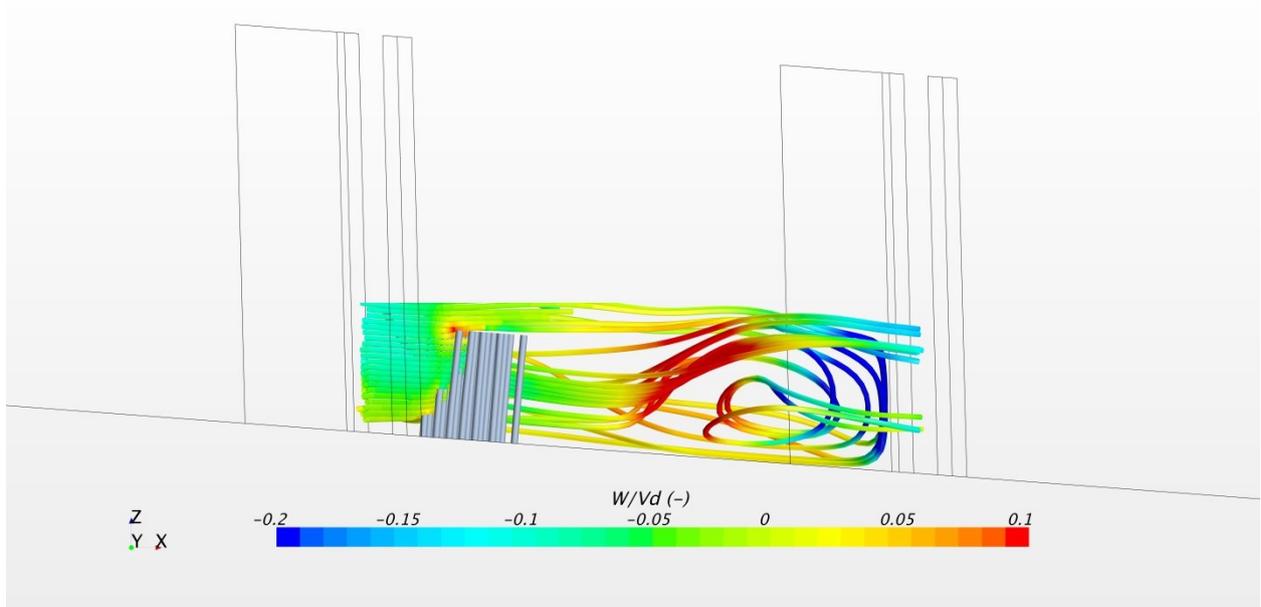


Figure VI-14. « Lignes de courant » en 3D du champ moyen et vitesse verticale dans la configuration structures souples et $B/b=9$.

Les cylindres, soumis à la force de l'écoulement, subissent une déformation, variable sur leur longueur, autour de laquelle ils oscillent. Cette déformation permet le stockage, sous la forme d'énergie potentielle élastique, d'une partie de l'énergie cinétique communiquée par le fluide à la structure. Cette énergie potentielle est ensuite à son tour restituée au fluide sous la forme d'énergie cinétique pour tenter de ramener la structure à sa position d'origine. Sous l'effet des déformations, une partie de l'énergie transportée par le fluide est alors dissipée en chaleur. La déformation moyenne d'une structure est donc globalement une représentation de l'énergie moyenne cédée par le fluide à la structure, tandis que les fluctuations vont plutôt correspondre à l'énergie reçue puis réémise par la structure sous l'effet de la turbulence et des instationnarités de l'écoulement.

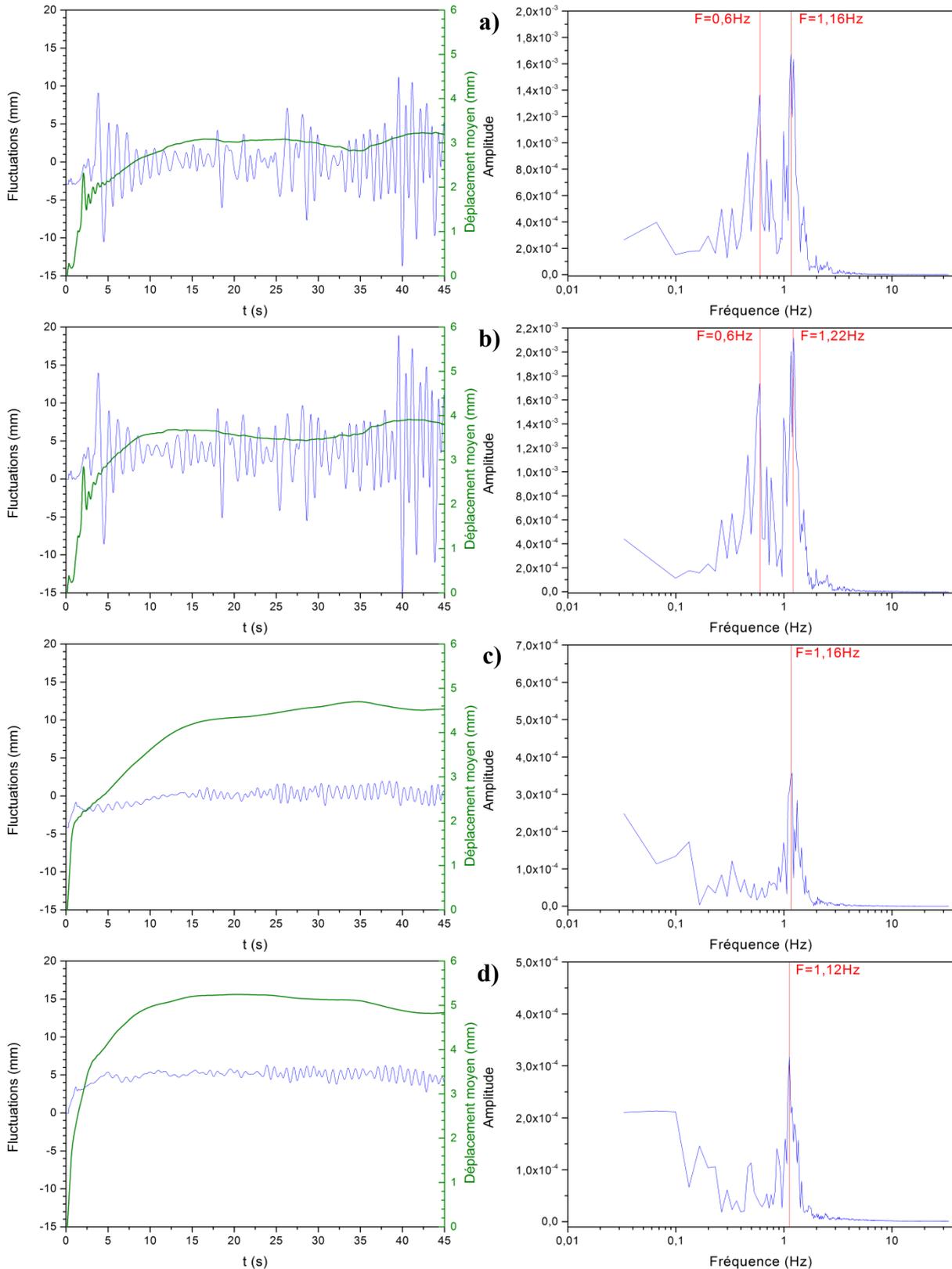


Figure VI-15. Evolution de la valeur moyenne et de la fluctuation du déplacement au sommet du cylindre 3 et spectres associés en fonction des bassins : a) bassin 1 b) bassin 2 c) bassin 3 et d) bassin 4.

Sur la figure VI-15, une forte disparité est constatée, que ce soit au niveau de l'amplitude de la fluctuation ou de la valeur du déplacement moyen. Le déplacement moyen du cylindre 3 augmente en fonction du bassin d'observation. Il est égal à 3,1 mm dans le bassin 1 et à 5,1 mm dans le bassin 4. Par ailleurs, la fluctuation quant à elle, diminue. Entre le premier et le dernier bassin, elle passe respectivement de 3,4 mm à 0,6 mm. L'analyse de l'écoulement a montré que la vitesse dans la fente augmentait d'environ 10% de bassin en bassin, ce qui se retrouve sur l'énergie emmagasinée par la déformation moyenne des cylindres.

Des FFT (Fast Fourier Transform) ont été effectuées sur les 20 dernières secondes d'enregistrement des déplacements, lorsque le déplacement moyen est atteint. Deux fréquences caractéristiques, relativement basses, sont observées ($F=0,6$ Hz et $1,16$ Hz) sur le cylindre 3 des deux premiers bassins. La plus haute fréquence est également présente sur les deux derniers bassins.

Des mesures réalisées dans un canal au sein du laboratoire ont permis de caractériser la fréquence d'oscillation d'un cylindre (C_c : Cylindre canal) composé du même matériau (UR3558) (Figure VI-16). La longueur du cylindre était de 400 mm (2,7 fois plus grande que celle des cylindres insérés dans la passe C_p) et le diamètre était de 16 mm (1,6 fois plus grand). L'écoulement amont était uniforme et la vitesse débitante était égale à $0,68$ m/s. Le nombre de Reynolds de l'écoulement autour du plus grand cylindre ($R_e=10880$) est équivalent au nombre de Reynolds autour du cylindre dans la passe ($R_e=10000$). Le déplacement en tête de cylindre (flèche) a été mesuré grâce à une caméra rapide (réglée à 250 Hz) et valait 68 mm.



Figure VI-16. Installation expérimentale utilisée pour mesurer l'amplitude des déformations et la fréquence d'oscillation des cylindres souples. De gauche à droite : canal expérimental à surface libre (12 m de long avec une largeur et une hauteur de 1 m, débit max 1800 m³.h⁻¹), caméra rapide LaVision et image instantanée d'un cylindre dans l'écoulement.

En faisant une similitude dimensionnelle sur le calcul de la flèche (théorie des poutres, ici en console), la flèche calculée pour C_p atteint 11 mm. Par ailleurs, la fréquence d'oscillation du cylindre dans cette configuration a été mesurée et valait environ 9,9 Hz. D'autre part, une étude paramétrique, menée sur 4 valeurs de vitesses débitantes et 3 raideurs de matériau différentes, a permis de montrer que l'augmentation de la raideur engendrait une augmentation de la fréquence et une diminution du déplacement moyen. L'augmentation de la vitesse de l'écoulement augmente également la fréquence d'oscillation du cylindre mais augmente le déplacement moyen (Tableau 20).

Cylindre UR3558 $E=92$ MPa			Cylindre UR3569 $E=509$ MPa		Cylindre RIM867 $E=1693$ MPa	
Vitesse débitante (m.s ⁻¹)	F (Hz)	Déplacement moyen (mm)	F (Hz)	Déplacement moyen (mm)	F (Hz)	Déplacement moyen (mm)
0,68	9,9	68,3	11,7	8,9	14,9	3,7
0,51	8,3	51,8	11,1	6,4	14,7	3,5
0,42	7,9	40,8	10,3	4,9	13,4	2,9
0,39	6,7	25,0	9,9	3,4	11,6	2,3

Tableau 20 : Fréquences d'oscillation et déplacements moyens mesurés pour un cylindre (C_c) dans le canal de l'Institut P' (Figure VI-16), pour différents débits et différents matériaux.

Les valeurs mesurées dans le canal ne sont pas comparables à celles mesurées dans la passe à poissons car dans cette dernière les cylindres sont disposés en rangées et leur interaction est non négligeable. Cependant, ces manipulations permettent d'apporter un éclaircissement sur le comportement de cylindres flexibles de raideurs variables dans un écoulement à surface libre. D'autre part, l'augmentation du déplacement moyen avec la vitesse de l'écoulement est retrouvée par l'analyse de la simulation numérique.

Le tracé du déplacement moyen de chacun des cylindres du bassin 3 est donné sur la figure VI-17. Il est à noter que la répartition du déplacement moyen des cylindres sur chacune des rangées ressemble à celle de la vitesse dans le jet présenté dans le paragraphe V.4.2 . Les plus grands déplacements sont observés sur les cylindres 3 et 4 de chaque rangée. D'autre part, le déplacement moyen maximal rencontré sur chaque rangée diminue significativement, à l'image de l'énergie cinétique du jet.

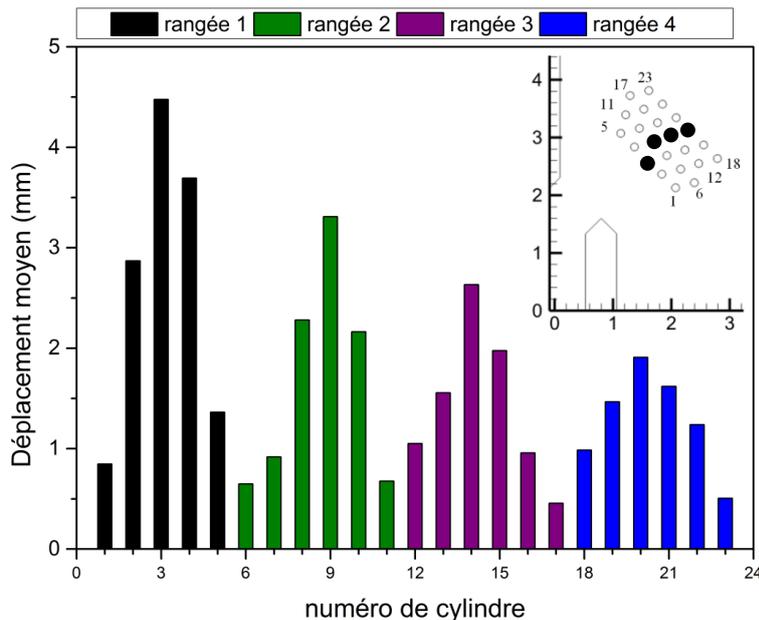


Figure VI-17. Déplacements moyens des cylindres du bassin 3. Les couleurs représentent chacune des quatre rangées de cylindres, la rangée 1 étant la rangée la plus en amont. Les points noirs sur la figure en haut à droite représentent les cylindres qui subissent le plus de déformation sur chacune des rangées.

VI.4 Influence des structures souples sur le comportement des poissons

Afin d'étudier l'influence des structures souples sur le comportement des poissons, une campagne expérimentale de mesures avec des truites arc-en-ciel a été menée. Les résultats présentés ici sont issus du travail de Vaillé (2016), stagiaire biologiste en master 2. Deux configurations ont été testées : une configuration avec et sans structures souples en grande largeur de bassin ($B/b=9$) et une en petite largeur ($B/b=6,67$).

L'analyse des données a été effectuée de manière identique à celle présentée dans l'analyse du comportement des truites dans la passe à poissons en présence de seuils (cf. paragraphe IV.5). Ainsi, pour les structures souples, seule une synthèse des principaux résultats obtenus est proposée.

Il convient par ailleurs de préciser que les résultats, significatifs ou non, issus de ces manipulations ont été obtenus dans des conditions expérimentales de laboratoire qui peuvent influencer le comportement des poissons.

VI.4.1 Identification des zones de stabulations

Les zones de stabulations ont été définies suite à la visualisation du comportement des poissons dans chacune des configurations. Ces zones sont représentées sur la figure VI-18 dans la configuration structures souples pour chacune des deux largeurs de bassins. La seule différence ayant été notée entre la configuration radier lisse et structures souples concerne l'apparition de la

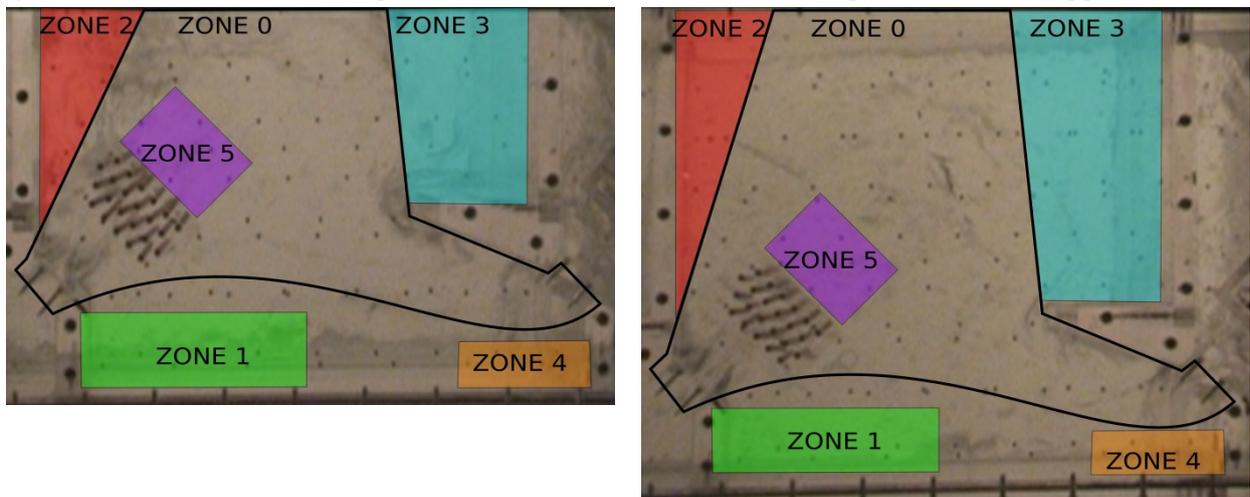


Figure VI-18. Positions des zones de stabulations en présence de structures souples. À gauche dans le cas de la petite largeur de bassin ($B/b=6,67$), à droite pour la grande largeur ($B/b=9$).

zone de stabulation 5 derrière les structures. À l'instar de ce qui a été fait pour l'étude des macro-rugosités, la vue latérale du bassin d'observation a été découpée en deux zones : une zone haute et une zone basse délimitées par la hauteur des structures souples (Figure VI-19). L'analyse de l'écoulement a montré que la vitesse et l'énergie cinétique turbulente était plus faible dans la zone basse, il convient donc de connaître le comportement du poisson vis-à-vis de ce changement.

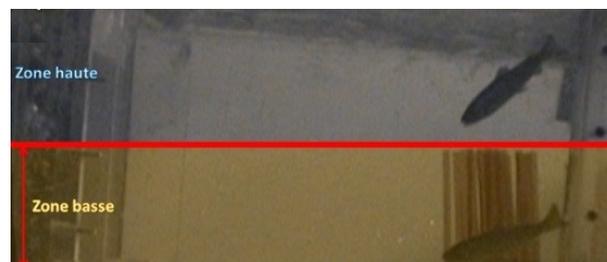


Figure VI-19. Zones de stabulations verticales définies dans le bassin de mesure dans les configurations $B/b=6,67$ et 9.

Les visualisations de la vue latérale et de la vue de dessous du bassin étant parfaitement synchronisées, l'association de la position verticale du poisson avec sa position horizontale a été effectuée. Ainsi, la position du poisson sur la colonne d'eau, lorsqu'il était dans chacune des zones de stabulation horizontales, a pu être comparée dans les configurations avec et sans les structures souples dans l'écoulement.

VI.4.2 Synthèse sur les indices généraux

Pour les deux largeurs de bassins étudiées, les résultats des tests statistiques montrent qu'aucune différence significative n'existe sur les indices généraux entre les configurations *radier lisse* et *structures souples*.

Des tendances ont toutefois été notées, notamment sur l'efficacité totale qui semble diminuer en petite largeur de bassin ($B/b=6,67$) pour les plus grands individus, lorsque les structures souples sont insérées dans l'écoulement.

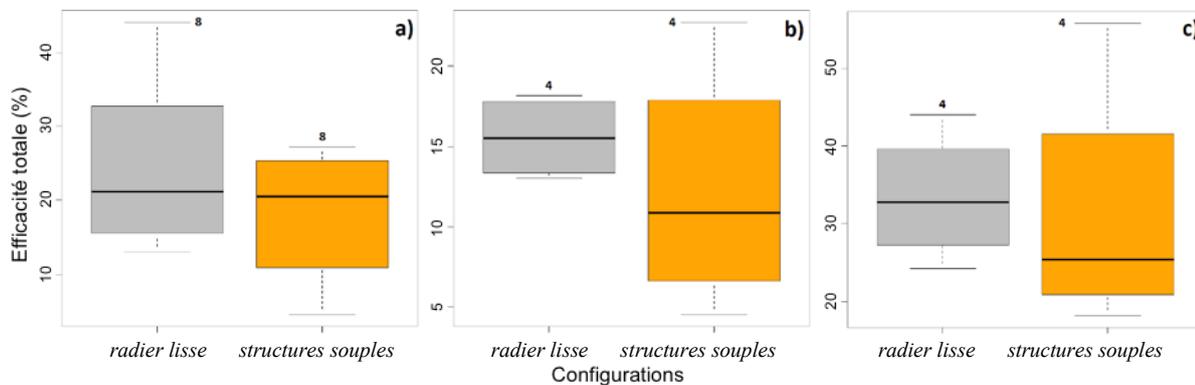


Figure VI-20. Efficacité totale en fonction des configurations pour a) toutes les tailles, b) les lots d'individus de grande taille et c) les lots d'individus de petite taille. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons (Vaillé, 2016).

La visualisation du comportement des poissons au passage de la fente amont semble indiquer que les plus grandes truites ne disposaient pas de l'espace nécessaire pour se retourner et se diriger face au jet. Cette gêne peut être à l'origine de cette tendance à la baisse de l'efficacité totale.

VI.4.3 Synthèse sur les temps de stabulation

L'analyse des résultats n'a montré aucune différence sur le temps total de stabulation des poissons dans le bassin entre les configurations, que ce soit en grande largeur de bassin ou en petite. Cependant des différences significatives ont été remarquées sur le temps de stabulation dans la zone haute pour les deux largeurs de bassins entre la configuration *radier lisse* et *structures souples* ($W = 20.8$, $p\text{-value} < 0,01$) (Figure VI-21).

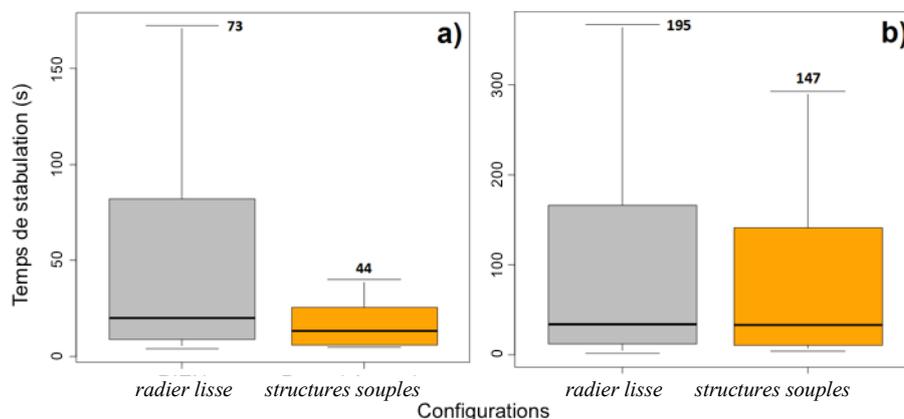


Figure VI-21. Temps de stabulation en fonction des configurations pour $B/b=6,67$ pour a) la zone haute et b) la zone basse. Les numéros au-dessus des boîtes représentent le nombre d'échantillons (Vaillé, 2016).

Dans la configuration *radier lisse*, les truites utilisent les zones de repos indifféremment dans la zone haute ou dans la zone basse (l'écoulement est quasi-bidimensionnel). En revanche, dans la configuration *structures souples*, l'écoulement est fortement tridimensionnel et les grandeurs cinématiques (vitesse et énergie cinétique turbulente) sont plus importantes dans la zone haute que dans la zone basse. Les truites ont donc tendance à utiliser plus souvent la zone basse pour se reposer.

VI.4.4 Synthèse sur les trajectoires

La présence de structures souples modifie la première zone traversée par les poissons (Fisher, $p\text{-value} < 0,03$). Lorsque les poissons entrent dans le bassin 3 par la fente aval ($n = 218$), la plupart d'entre eux cherchent à quitter le jet vers la zone 1 dans la configuration *radier lisse* et vers les zones 1 ou 4 dans la configuration *structures souples*. L'introduction des structures souples n'affecte pas de manière significative la dernière zone occupée par les poissons avant de quitter le bassin (zone 1 ou 2) (Fisher, $p\text{-value} > 0,05$).

Les individus ont tendance à se diriger le plus souvent de la zone 1 vers la zone 2 dans la configuration *radier lisse* (48%), ce pourcentage baisse à 14% dans la configuration *structures souples*. D'autre part, 24% des individus qui passent dans la zone 1 en présence des structures se dirigent ensuite vers la zone 5.

Après un passage dans la zone 2, les individus privilégient la zone 3 dans les deux types de configurations (configuration *radier lisse* : 48% ; configuration *structures souples* : 32%). Le passage de la zone 2 à la zone 1 est plus souvent privilégié en configuration *radier lisse* (19%) qu'en présence de structures souples (9%). Par ailleurs, 26% des individus qui passent dans la zone 2 en présence de structures souples se dirigent ensuite dans la zone 5.

Après un passage dans la zone 3, les individus privilégient la zone 2 dans les deux types de configurations (configuration *radier lisse* : 74% ; configuration *structures souples* : 49%). Lorsque les structures souples sont présentes dans l'écoulement, 32% des individus qui passent dans la zone 3 vont ensuite dans la zone 5.

VI.5 Conclusion

Ce chapitre était consacré à l'étude de l'insertion de structures souples dans une passe à poissons à fentes verticales. L'influence des structures souples sur l'écoulement a été analysée d'un point de vue hydraulique et cinématique par des mesures expérimentales et des simulations numériques. Des tests biologiques ont également été réalisés avec des truites de pisciculture pour caractériser l'effet des structures souples sur le comportement des poissons et sur l'efficacité du dispositif.

L'étude hydraulique a montré que lorsque les structures souples sont introduites dans les bassins de la passe à poissons, le coefficient de débit augmente en fonction du débit, contrairement à la configuration *radier lisse* pour laquelle la variation est négligeable. L'augmentation du niveau d'eau dans les bassins entraîne une plus forte submersion des structures, ce qui réduit leur influence relative sur la perte de charge. Il a également été noté que la pente réduisait la valeur du C_d . En revanche, la largeur des bassins n'a plus une influence significative sur le coefficient de débit, ce qui entraîne pour les faibles largeurs de bassin une diminution significative du C_d entre la configuration *radier lisse* et *structures souples*.

Des profils de vitesses ont été réalisés expérimentalement à l'aide d'une sonde ADV pour deux largeurs de bassins ($B/b=6,67$ et 9), afin de quantifier l'influence de l'ajout des structures souples sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement. Ces mesures ont permis de montrer que la topologie de l'écoulement était différente de la topologie en configuration *radier lisse*. L'écoulement devient tridimensionnel, avec des vitesses verticales négatives et positives importantes. Cependant, les profils réalisés dans un plan parallèle au radier à $Z/L_c=1$ montrent que l'énergie cinétique turbulente et les vitesses moyennes sont globalement réduites. Les profils verticaux réalisés ont permis de représenter l'évolution de la vitesse moyenne et de l'énergie cinétique turbulente sur la colonne d'eau. Globalement, la zone située dans le sillage des structures souples ($Z/L_c < 1$) est une zone de faible vitesse et où l'énergie cinétique turbulente est réduite par rapport à la zone où $Z/L_c > 1$.

La simulation numérique couplée fluide/structures URANS réalisée pour $B/b=9$, offre des résultats plutôt proches des mesures expérimentales en terme de topologie d'écoulement. En revanche, elle surestime les vitesses d'un facteur 2 et sous-estime l'énergie cinétique turbulente d'un facteur 4. L'écoulement dans différents plans parallèles au radier a été analysé. La vitesse est globalement réduite dans le bassin pour $Z/L_c < 1$. En revanche, au-dessus des structures le jet est soumis à une forte vitesse et pénètre plus loin dans les bassins, créant un fort gradient de vitesse sur l'axe Z . La représentation des lignes de courant du champ moyen de vitesse permet de visualiser la topologie de l'écoulement en 3D. Un tourbillon d'axe transversal se crée au niveau de la paroi du déflecteur central et génère de fortes vitesses verticales. En ce qui concerne les

structures souples, une étude de leur déformation moyenne et de leur oscillation en réponse à la sollicitation de l'écoulement a été proposée. La déformation des cylindres dépend de la force à laquelle ils sont soumis, *a fortiori* de la vitesse de l'écoulement. Les cylindres les plus sollicités dans chacune des quatre rangées du bassin 3 ont été identifiés.

En ce qui concerne les expérimentations visant à montrer l'influence des structures souples sur le comportement des poissons, aucune différence significative (dans les conditions expérimentales du laboratoire), n'a été décelée entre la configuration *radier lisse* et *structures souples* sur les indices généraux. En revanche, avec les structures souples, les poissons utilisent les zones de stabulations de manière préférentielle dans la partie basse de l'écoulement plutôt que dans la partie haute. Par ailleurs, certains poissons ont été gênés dans leur tentative de montaison par le manque d'espace autour des structures souples.

Chapitre 7

AMELIORATION DU DIMENSIONNEMENT DES PASSES A POISSONS A FENTES VERTICALES : LOIS DE PREDICTION DU COEFFICIENT DE DEBIT

Sommaire

VII. AMELIORATION DU DIMENSIONNEMENT DES PASSES A POISSONS A FENTES VERTICALES : LOIS DE PREDICTION DU COEFFICIENT DE DEBIT.....	201
VII.1 Démarche générale	204
VII.2 Estimation de la topologie de l'écoulement.....	205
VII.3 Estimation du débit adimensionné Q^*	206
VII.4 Conclusion	210

Le chapitre précédent a mis en évidence que l'ajout de seuils ou de macro-rugosités modifiaient de manière importante les caractéristiques hydraulique d'une passe à poissons à fentes verticales. Dans la démarche générale de conception d'un dispositif de franchissement, la première étape consiste à déterminer les espèces de poissons présentes dans le cours d'eau au niveau de l'obstacle à franchir. Les espèces à prendre en compte, communément qualifiées d'« espèces cibles », sont ensuite définies ainsi que leur période de migration en fonction du contexte écologique (zonation piscicole, habitats...) et réglementaire (classement du cours d'eau, espèces protégées...). Les poissons ne migrant pas dans toutes les conditions de débit, il s'agit donc ensuite de définir la gamme de débit pour laquelle le dispositif de franchissement doit être opérationnel (débits de fonctionnalité), qui peut correspondre à une partie voire à la totalité du débit réservé fixé par la législation. Pour cela, des relevés réguliers des débits et des niveaux d'eau à l'amont et à l'aval de l'obstacle sont effectués. L'analyse de ces différentes données permet ensuite de choisir le type de passe à poissons le plus adapté aux espèces cibles. La passe à poissons à fentes verticales est un type de passe très souvent choisi en France car elle est particulièrement adaptée aux sites présentant de grandes fluctuations de niveaux d'eau amont et/ou aval (Larinier *et al.*, 1998). Elle est considérée comme étant multi-espèces et donc peu sélective par rapport à une passe à échancrure et jets plongeants qui n'est adaptée qu'aux salmonidés par exemple. C'est après cette première étape que la phase de dimensionnement hydraulique commence.

Afin que les résultats hydrauliques exposés dans ce manuscrit puissent être directement utilisables par l'ingénieur en charge de la conception d'une passe à poissons à fentes verticales, des lois de comportement hydraulique ont été établies. Elles doivent permettre d'estimer la valeur du coefficient de débit en fonction des paramètres connus lors de la phase de dimensionnement. Dans le cas d'une passe à poissons à fentes verticales, le dimensionnement s'effectue de la manière suivante :

En premier lieu, la hauteur de chute Δh , qui détermine la vitesse dans les bassins, est fixée en fonction de l'espèce cible possédant la capacité de nage la plus faible. Elle définit également le nombre de bassins du dispositif, la somme des Δh entre chacun des bassins devant être égale à celle générée par l'obstacle à franchir. La puissance volumique dissipée P_v , qui donne une information sur l'aération et la turbulence dans les bassins, est ensuite fixée en fonction de la plus petite espèce à faire franchir. Elle est de l'ordre de 150 W.m^{-3} pour les aloses et 200 W.m^{-3} pour les salmonidés. Sa formulation est rappelée ci-après (eq.VII-1) :

$$P_v = \frac{\rho g Q \Delta h}{BLZ_0} \quad (\text{eq.VII-1})$$

avec ρ la masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}), g l'accélération de la pesanteur (m.s^{-2}), Q le débit ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), Δh la hauteur de chute entre les bassins (m), B et L respectivement la largeur et la longueur d'un bassin (m) et Z_0 la hauteur d'eau moyenne à mi-bassin (m).

À partir de la connaissance de la gamme de débits à faire transiter et de la hauteur de chute, il est alors possible de déduire le volume d'eau nécessaire dans les bassins (V_b) pour atteindre le critère de puissance volumique dissipée désiré, en fonction des conditions hydrauliques du cours d'eau. Vient alors la phase de dimensionnement géométrique de la passe à poissons. Dans un premier temps, les différentes dimensions (longueur et largeur des bassins, largeur de fentes) sont choisies à partir des recommandations prescrites par l'ONEMA. Ces recommandations sur les différentes dimensions caractéristiques laissent une certaine marge de manœuvre aux concepteurs, en définissant des intervalles admissibles à l'intérieur desquels le fonctionnement biologique de la passe est considéré comme optimal. La longueur et la largeur des bassins habituellement préconisées se situent respectivement autour de $L/b=10$ et $B/b=7$ à 9 . L'évaluation du volume d'eau nécessaire et des dimensions des bassins permet alors de déterminer la hauteur d'eau moyenne ($Z_0=V_b/(B.L)$) à atteindre dans chaque bassin. Dans une

seconde phase, la largeur de la fente (b) est estimée et dépend du type et de la taille des poissons à faire passer. Les largeurs de fentes préconisées par [Larinier et al. \(1998\)](#) sont de l'ordre de 0,3 m pour les grands salmonidés et 0,45 m pour l'aloise. Enfin, il s'agit de calculer le débit (Q_{pred}) qui transitera par la passe à poissons en prenant en compte les pertes de charge et les différentes données fixées et calculées (largeur de fente, hauteur de chute, hauteur d'eau moyenne). En négligeant les pertes de charges, le débit qui transite dans la passe serait simplement égal à la section d'écoulement dans la première fente multipliée par la vitesse de l'écoulement induite par la hauteur de chute. Or, les pertes de charges générées ne sont pas négligeables et le recours à l'utilisation d'un coefficient de correction, appelé coefficient de débit (C_d) devient nécessaire (eq.VII-2) :

$$Q_{pred} = C_d \cdot b \cdot H_1 \sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{eq.VII-2})$$

avec Q_{pred} le débit estimé dans la passe à poissons ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), b la largeur de fente (m), H_1 la charge sur la fente (m), Δh la hauteur de chute entre les bassins (m), g l'accélération de la pesanteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

$$H_1 = Z_0 + \frac{\Delta h}{2} - h_s \quad (\text{eq.VII-3})$$

avec Z_0 la hauteur d'eau à mi-bassin (m) et h_s la hauteur du seuil (m).

Dans le cas où le débit estimé Q_{pred} est différent du débit désiré initialement Q , cela signifie que les trois paramètres Z_0 , Δh et b associés au coefficient de débit ne permettent pas d'atteindre le débit désiré Q . Il est alors nécessaire d'adapter certains de ces paramètres et un processus itératif commence. La hauteur de chute, qui définit la vitesse de l'écoulement dans la fente, est fixée en fonction de la capacité de nage de l'espèce cible la plus faible, elle ne doit en règle générale pas être modifiée. Il faut alors modifier la section de l'écoulement dans la première fente. Il s'agit alors de faire varier la largeur de la fente b (en respectant l'intervalle de préconisation) ou modifier la consigne sur Z_0 . Dans ce dernier cas, la puissance volumique dissipée étant fixée, faire varier Z_0 implique de faire varier la largeur B ou la longueur L de bassin pour garder un volume d'eau V_b constant. En règle générale, la longueur est conservée égale à 10 fois la largeur de fente et un changement de largeur est préféré. Dans le cas où le débit Q_{pred} est trop important et que la variation des paramètres ne permet pas d'atteindre le débit désiré Q , un seuil peut être inséré au pied de la première fente pour diminuer la section de l'écoulement et ainsi réduire le débit. Il peut ensuite être utilisé pour augmenter le niveau d'eau dans les bassins pour compenser un déséquilibre de hauteur de chute.

Au cours du dimensionnement, il est essentiel que le critère sur la puissance volumique dissipée soit en permanence respecté sur toute la gamme de débit de fonctionnalité. Il s'agit alors de vérifier le fonctionnement de la passe (lignes d'eau, débits à transiter...) en fonction des différentes conditions hydrauliques du cours d'eau. Pour cela, le fonctionnement hydraulique de la passe est étudié pour plusieurs conditions de débit : en condition d'étiage (débit minimum), au module (débit moyen interannuel) et à deux ou trois fois le module.

L'ONEMA met à disposition des concepteurs ayant suivi une formation adaptée, un logiciel de dimensionnement de passe à poissons : Cassiopée©. Grâce à ce logiciel et en respectant les préconisations d'usage, l'utilisateur peut notamment calculer le nombre de bassins de sa passe à poissons, le volume d'eau nécessaire dans chacun d'entre eux, la hauteur d'eau moyenne et calculer le débit Q_{pred} . Pour obtenir ce dernier, l'utilisateur doit fixer le coefficient de débit. La valeur par défaut est fixée à $C_d=0,65$ dans le logiciel et ne dépend d'aucun paramètre. Or comme cela a été montré dans ce manuscrit, le coefficient de débit varie en fonction de la pente, de la largeur des bassins, de la hauteur des seuils, de la topologie, de la densité de macro-rugosités et également du débit. Cette mauvaise estimation du coefficient de

débit peut mener à un mauvais fonctionnement hydraulique, impactant directement l'efficacité biologique de l'ouvrage. Actuellement, en pratique, l'utilisateur fixe le coefficient de débit en fonction de la largeur des bassins en se basant sur les résultats publiés par Wang *et al.* (2010).

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode de dimensionnement qui prend en compte les différentes conditions géométriques et hydrauliques de la passe à poissons à dimensionner, pour améliorer la prédiction du débit qui transitera dans la passe.

VII.1 Démarche générale

Les paramètres qui ont été pris en compte sont la pente (s), la largeur des bassins (B), le débit (Q), la hauteur des seuils (h_s) et la densité de macro-rugosités (d_r). Chaque paramètre a été adimensionné : la largeur des bassins et la hauteur des seuils ont été adimensionnées par la largeur de la fente (b) et le débit par l'équation ci-dessous (Rajaratnam *et al.*, 1986) :

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot s \cdot b^5}} \quad (\text{eq. VII-4})$$

Cet adimensionnement est particulièrement intéressant car il permet d'obtenir une relation linéaire entre le débit adimensionné (Q^*) et la hauteur d'eau adimensionnée par la largeur de fente ($\frac{Z_0}{b}$) dans une configuration *radier lisse*. Ainsi, le but de la démarche qui est présentée ici est de retrouver une relation linéaire en déduisant les contributions des paramètres hydrauliques et géométriques d'influence. Dans ce manuscrit, l'analyse de l'influence des seuils, des macro-rugosités et des différents paramètres géométriques des bassins, sur les caractéristiques hydrauliques d'une passe à poissons a été effectuée. Elle a montré que la hauteur des seuils, la densité de macro-rugosités, la largeur des bassins, la pente, le débit et la topologie d'écoulement avaient des effets non négligeables sur le coefficient de débit. Le principal intérêt de l'utilisation de ce coefficient, c'est qu'il ne devait dépendre initialement que de la forme du déflecteur central et du profil de la fente. L'objectif étant de tendre vers une uniformité concernant la géométrie générale des passes à poissons à fentes verticales, ce coefficient devait donc rester approximativement constant. Cette condition n'étant pas respectée, le recours à l'utilisation du coefficient de débit perd de son intérêt. Le débit adimensionné Q^* a donc été utilisé ici, de par ses propriétés intéressantes de linéarité par rapport à $\frac{Z_0}{b}$.

Il s'agit donc de prendre en compte tous ces paramètres dans la démarche visant à estimer la relation hauteur/débit. La méthode suivante est proposée :

- 1- **Détermination des conditions hydrauliques à respecter** (Q , Δh , P_v). Elles dépendent des caractéristiques du cours d'eau et des espèces cibles.
- 2- **Dimensionnement des caractéristiques géométriques des bassins** (b , L/b , B/b , h_s/b , d_r).
- 3- **Adimensionnement du débit et de la hauteur d'eau** (Q^* et Z^*) pour prendre en compte les paramètres d'influence.
- 4- **Estimation de la topologie de l'écoulement**. La topologie de l'écoulement a une influence sur la relation qui lie la hauteur d'eau au milieu des bassins au débit qui transite dans la passe. Elle doit donc être prise en compte lors du dimensionnement.
- 5- **Estimation du débit adimensionné** Q^*_{pred} en fonction de Z^* . Pour chaque topologie d'écoulement (type 1, transitoire, type 2), Q^*_{pred} a été relié, par une relation linéaire, à la hauteur d'eau adimensionnée Z^* .
- 6- **Itération** (retour à l'étape 2 pour adapter les paramètres géométriques des bassins), jusqu'à ce que $Q^*_{pred} \approx Q^*$.

VII.2 Estimation de la topologie de l'écoulement

Lorsqu'il arrive à l'étape du calcul de Q^* , le concepteur a déjà fait une première estimation de toutes les caractéristiques géométriques de sa passe. Il connaît donc la largeur des bassins B , la pente s (à partir de la connaissance de la longueur du bassin L et de la hauteur de chute Δh), la hauteur du seuil h_s ou la densité de macro-rugosités d_r qu'il souhaite éventuellement utiliser. Comme cela a été montré dans ce manuscrit, la topologie de l'écoulement modifie la relation qui lie la hauteur d'eau au milieu des bassins au débit. Cette topologie doit donc être prise en compte dans la détermination de Q^* et dépend de B , s , Q^* , h_s et d_r . La démarche proposée pour déterminer la topologie de l'écoulement consiste à déterminer la largeur de bassin B à partir de laquelle l'écoulement change de topologie. La figure VII-1 est un exemple des cas retenus, avec entourés en vert les cas utilisés pour déterminer la topologie de type 1 et en rouge ceux pour la topologie de type 2. Une régression non linéaire est effectuée pour retrouver la dernière plus petite valeur de B pour laquelle l'écoulement est de type 1 en fonction de s , Q^* , h_s et d_r . Une deuxième régression non linéaire permet de retrouver la plus grande valeur de B pour laquelle l'écoulement est de type 2. Ainsi, si la largeur de bassin fixée initialement par le concepteur est supérieure à celle obtenue par la première régression, la topologie sera de type 1. Si elle inférieure à celle obtenue par la deuxième régression, elle sera de type 2. Enfin, si elle se situe entre les deux, la topologie sera transitoire.

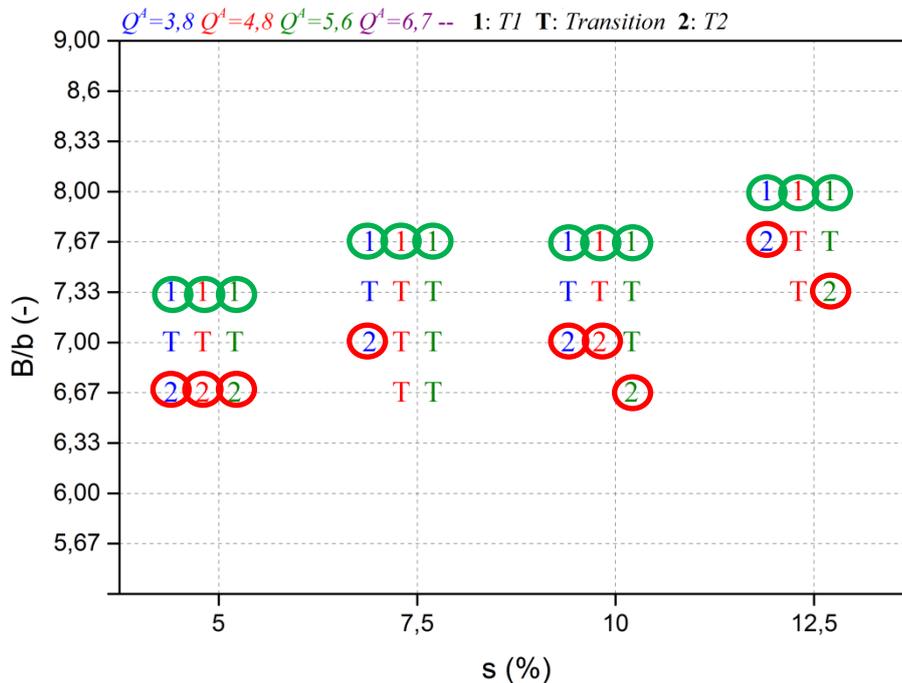


Figure VII-1. Exemple des cas retenus pour établir la loi de prédiction de la largeur limite en topologie de type 1 (entourés en vert) et de type 2 (entourés en rouge).

Une fonction non linéaire a été utilisée pour ajuster la variable dépendante (la largeur de bassin B) aux variables indépendantes (le débit adimensionné Q^* , la pente s , la hauteur du seuil h_s et la densité de macro-rugosités d_r).

$$\left(\frac{B}{b}\right)_{T1 \text{ ou } T2} = C_1 \cdot Q^{*C_2} \cdot S^{C_3} \cdot C_4^{(h_s/b)} \cdot C_5^{(d_r)} \quad (\text{eq.VII-5})$$

À partir des données et à l'aide du logiciel Statgraphics, les cinq coefficients ont été déterminés pour chacune des topologies (type 1 ou type 2) :

Coefficients	Type 1	Type 2
C_1	7,344	13,157
C_2	0,062	-0,019
C_3	0,043	0,049
C_4	1,155	1,177
C_5	1,373	0,606

Tableau 21 : Coefficients de la régression non-linéaire sur la largeur des bassins pour les topologies de type 1 et 2.

Le coefficient de détermination R^2 correspond au pourcentage de la variabilité de la variable endogène (dépendante) qui est expliquée par le modèle. Il est dans ce cas égal à 68% pour l'estimation de la largeur des bassins pour la topologie de type 1 et de 84,6% pour l'estimation du type 2. L'écart-type entre les largeurs prédites et les largeurs obtenues par la régression en topologie de type 1 est $\Delta B/b=0,21$, correspondant à une erreur moyenne relative de 2,6%. En ce qui concerne la topologie de type 2, l'écart-type est $\Delta B/b=0,24$ soit une erreur moyenne relative de 3,4%. La dispersion des largeurs prédites par les deux régressions est mise en évidence sur la figure VII-2.

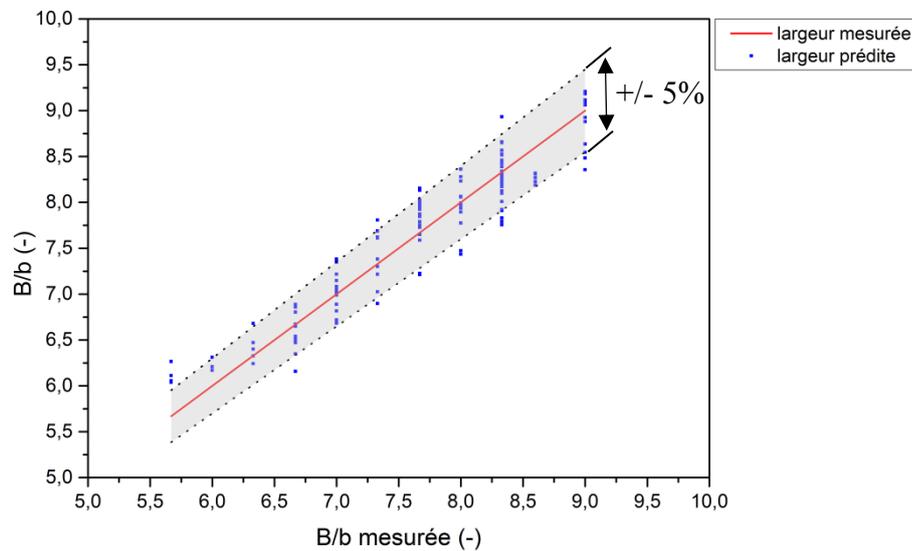


Figure VII-2. Largeurs de bassin prédites en fonction des largeurs mesurées pour la détection de la topologie de type 1 et de type 2.

La grande majorité (80%) des largeurs minimales obtenues en topologie de type 1 et des largeurs maximales obtenues en topologie de type 2 sont comprises dans un intervalle de confiance de +/- 5% autour des largeurs mesurées.

VII.3 Estimation du débit adimensionné Q^*_{pred}

Grâce à l'étape précédente, il est possible de connaître la topologie de l'écoulement lorsque la largeur des bassins est fixée. La topologie obtenue (type 1, transitoire ou type 2) va déterminer le choix de la formule à utiliser pour prédire la nouvelle valeur du débit adimensionné (Q^*_{pred}).

Le but de la démarche est de créer une loi permettant de déterminer le débit adimensionné en s'affranchissant du débit.

Les données expérimentales sont tout d'abord séparées en trois : une catégorie concernant toutes les configurations pour lesquelles l'écoulement est de type 1, une autre pour la topologie transitoire et enfin une dernière pour la topologie de type 2.

Pour cela, l'expression proposée par Rajaratnam *et al.* (1986) a été utilisée. Ces auteurs ont montré qu'il existe une relation linéaire entre le débit adimensionné Q^* et la hauteur d'eau relative moyenne $\frac{Z_0}{b}$. Cependant, la modification de la largeur des bassins, l'insertion d'un seuil en pied de fente et la présence des macro-rugosités a une influence sur Z_0 . La variation de Z_0 entraîne alors une dispersion des valeurs prédites de Q^* (Q^*_{pred}) et la qualité de la régression linéaire se détériore. Pour obtenir à nouveau cette linéarité, l'influence de chaque paramètre sur la variation de la hauteur d'eau a été prise en compte. La hauteur d'eau adimensionnée Z^* a ainsi été définie pour intégrer l'ajout d'un seuil, de macro-rugosités et de la variation de largeur des bassins sur la hauteur d'eau moyenne (eq.VII-6) :

$$Z^* = Z_0 \cdot \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{b} \right) - \left[\left(\frac{h_s}{B} \right)^\alpha + \left(\frac{h_s}{b} \right)^\beta \right] - \left[\left(\frac{d_r \cdot h_r}{B} \right)^\gamma + \left(\frac{d_r \cdot h_r}{b} \right)^\delta \right] \quad (\text{eq.VII-6})$$

avec Z_0 la hauteur d'eau à mi-bassin (hauteur d'eau moyenne) (m), B la largeur d'un bassin (m), b la largeur d'une fente (m), h_s la hauteur d'un seuil, d_r (-) et h_r (m) respectivement la densité et la hauteur des macro-rugosités.

Cette adimensionnalisation de la hauteur d'eau moyenne dans les bassins permet d'obtenir une variation linéaire de Q^*_{pred} en fonction de Z^* (eq.VII-7) :

$$Q^*_{pred} = c \cdot Z^* + d \quad (\text{eq.VII-7})$$

Pour que cette relation redevienne linéaire, l'influence (théorique) de chaque paramètre sur la hauteur d'eau moyenne dans les bassins a été retranchée. Ainsi Z^* correspond à un adimensionnement de Z_0 par la variation de hauteur d'eau engendrée par les dispositifs insérés dans la passe à poissons.

La variable Z^* a été définie à partir des constatations et des hypothèses suivantes :

- 1- Sans dispositif à l'intérieur de la passe à poissons (*radier lisse*), la hauteur d'eau dans les bassins diminue lorsque la largeur des bassins diminue. La hauteur d'eau est considérée comme étant inversement proportionnelle à la largeur des bassins. Elle est ajoutée à $\frac{Z_0}{b}$, et non pas retranchée, pour compenser la variation de hauteur d'eau générée par la variation de largeur de bassin (eq.VII-8) :

$$Z^*_{(radier\ lisse)} = \frac{Z_0}{b} + \frac{Z_0}{B} \quad (\text{eq.VII-8})$$

- 2- Lorsqu'un seuil est ajouté dans la passe à poissons, la hauteur d'eau augmente approximativement d'une valeur égale à la hauteur du seuil. Il est également considéré que cette hauteur varie de manière inversement proportionnelle à la largeur de bassin (eq.VII-9) :

$$Z^*_{(seuil)} = Z^*_{(radier\ lisse)} - \frac{h_s}{b} - \frac{h_s}{B} \quad (\text{eq.VII-9})$$

- 3- Pour la passe munie de rugosités de fond, la hauteur d'eau ajoutée par la présence des cylindres a été retranchée à la hauteur d'eau mesurée avec les rugosités de fond et est considérée comme variant de manière inversement proportionnelle à la largeur des bassins (eq.VII-10) :

$$Z^*_{(rugosités)} = Z^*_{(radier\ lisse)} - \frac{d_r \cdot h_r}{b} - \frac{d_r \cdot h_r}{B} \quad (\text{eq.VII-10})$$

Il convient alors de préciser que l'équation (eq.VII-6) n'a pas été établie en considérant la présence à la fois d'un seuil et de macro-rugosités dans l'écoulement. L'influence de la prise en compte, ou non, de la topologie a également été évaluée en réalisant une seule régression linéaire sur toutes les données. Les coefficients α , β , γ , δ , c et d des équations eq.VII-et 7 sont données dans le tableau ci-après (Tableau 22) :

Coefficients	Type 1	Transition	Type 2	Indifférent
α	0,18	0,05	0,47	0,53
β	1,6	1,68	1,05	0,98
γ	1,05	3,12	1,35	0,68
δ	0,61	0,13	0,92	0,69
c	3,13	3,16	3,32	3,14
d	0,56	2,16	0,45	1
R^2 (%)	99,2	98,3	99,1	97

Tableau 22 : Coefficients de la régression linéaire sur le débit adimensionné en fonction de la topologie.

Les résultats obtenus pour la prédiction du débit adimensionné (Q^*_{pred}) sont montrés sur la figure VII-3. Les valeurs prédites sont tracées en fonction des valeurs mesurées. La figure VII-3 a) et b) présente les résultats obtenus avec et sans prise en compte de la topologie de l'écoulement.

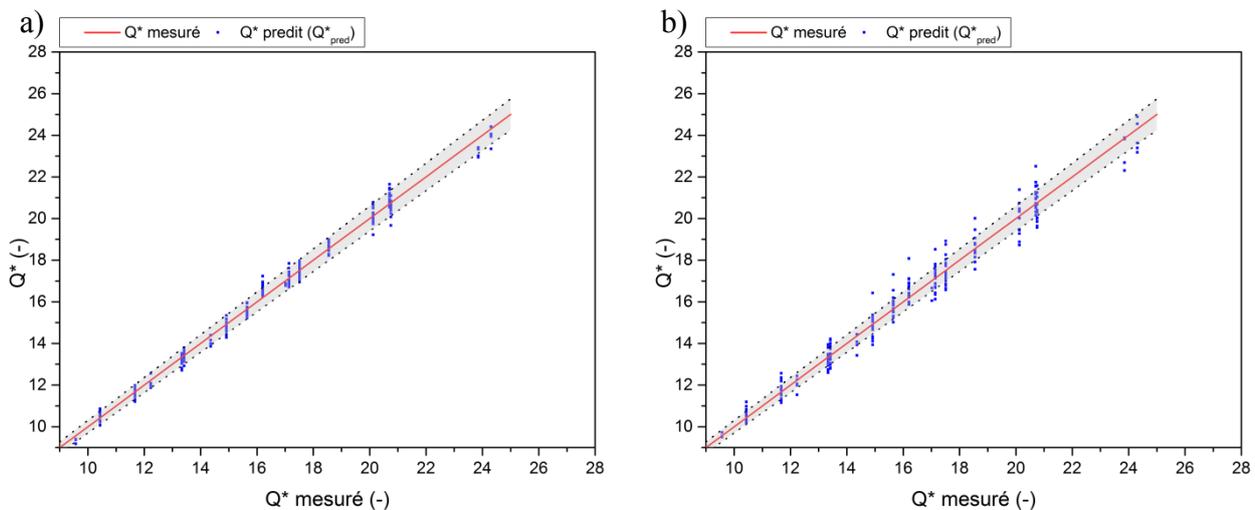


Figure VII-3. Débit adimensionné Q^* prédit en fonction de Q^* mesuré. a) avec prise en compte de la topologie de l'écoulement ; b) sans prise en compte de la topologie de l'écoulement

Les régressions linéaires obtenues pour Q^*_{pred} pour chaque topologie offrent une bonne concordance avec les données expérimentales. Le coefficient R^2 est égal à 97% lorsque la topologie n'est pas prise en compte et vaut 99,2%, 98,3% et 99,1% pour la prédiction de Q^* respectivement pour la topologie de type 1, transitoire et type 2. Par ailleurs, l'erreur moyenne relative commise par l'approximation linéaire est plus faible lorsque les topologies sont prises en compte avec 87% des points qui se situent dans un intervalle d'erreur de $\pm 3\%$ contre 62% lorsqu'elles ne sont pas dissociées. Ces résultats ont été obtenus à partir d'une base de données totalisant 284 cas.

Pour une estimation précise du débit adimensionné, il faut donc utiliser de préférence l'équation (eq.VII-6) avec les coefficients adaptés (Tableau 22) en fonction de la topologie de l'écoulement.

Le logigramme de la figure VII-4 permet de rappeler de manière schématique les différentes étapes de la démarche de dimensionnement.

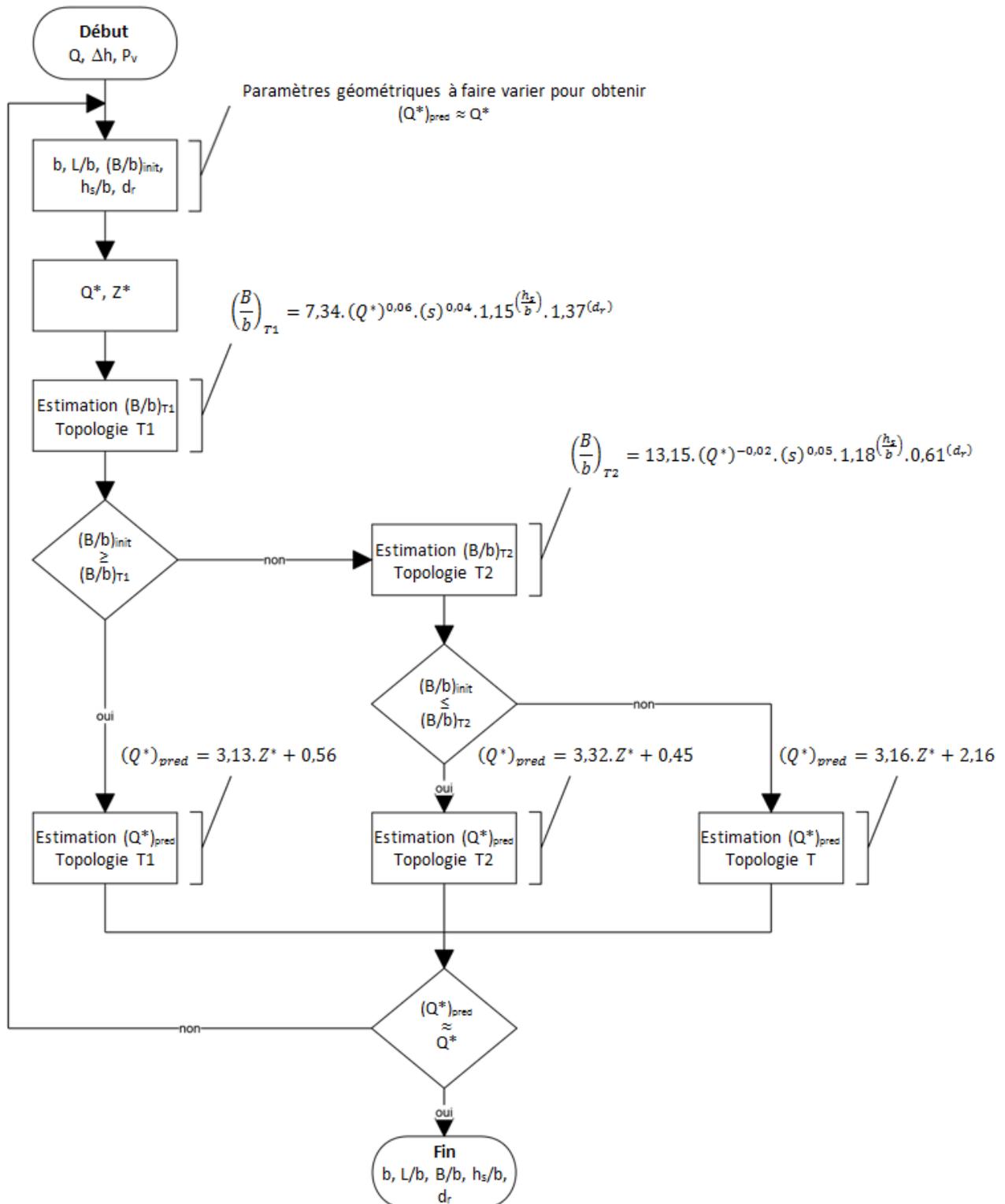


Figure VII-4. Logigramme de la démarche de dimensionnement.

Le calcul de Z^* ne suppose pas de connaître le débit Q . Il dépend uniquement de la hauteur d'eau moyenne dans chacun des bassins et de la configuration géométrique de la passe à poissons. À partir des régressions permettant de trouver Q^*_{pred} à partir de Z^* , le débit Q_{pred} peut alors être estimé (à partir de la définition de Q^*) :

$$Q_{pred} = Q^*_{pred} \cdot \sqrt{g \cdot s \cdot b^5} \quad (\text{eq.VII-11})$$

La figure VII-5 permet de comparer les débits prédits avec les formules de la littérature en fonction des débits mesurés et les débits prédits avec la méthode exposée ici.

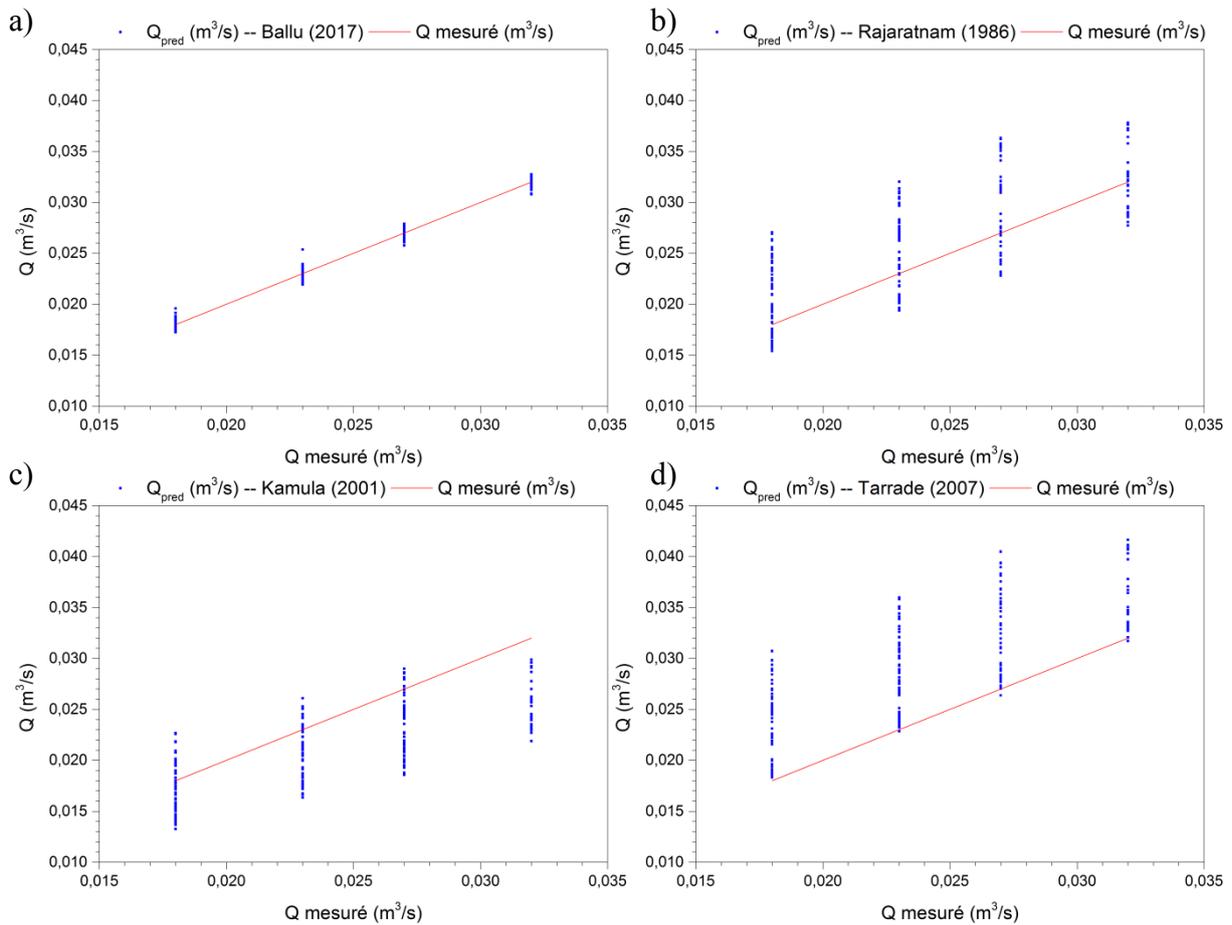


Figure VII-5. Comparaison entre les débits Q_{pred} en fonction des débits mesurés Q obtenus par les formules proposées dans cette thèse et ceux de la littérature. a) présente étude ; b) Rajaratnam *et al.* (1986) ; c) Kamula (2001) ; d) Tarrade (2007).

Les formules de la littérature ne prennent pas en compte les variations de largeur des bassins ou la présence de dispositifs complémentaires. Il en résulte des erreurs importantes sur la prédiction du débit, qui sont réduites grâce à la prise en compte de tous les facteurs d'influence : les seuils, les macro-rugosités et la largeur des bassins et la pente. L'erreur maximale relative obtenue sur le débit est réduite ainsi à 10% et l'erreur moyenne sur l'ensemble des configurations atteint 1,6%.

VII.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle méthode de dimensionnement des passes à poissons à fentes verticales est proposée. Elle permet de prendre en compte les différents facteurs (topologie de l'écoulement, présence d'un seuil, largeur des bassins, pente) qui modifient la perte de charge dans les bassins et donc la relation hauteur/débit. Les formules proposées sont facilement intégrables dans les logiciels classiques de dimensionnement de passe à poissons et permettront à la fois de prédire la topologie de l'écoulement et le débit qui transitera dans la passe. Les problèmes de dimensionnement devraient donc être réduits, au bénéfice à la fois du concepteur et de l'efficacité biologique de l'ouvrage.

CONCLUSION GENERALE

Le travail de thèse qui a été mené avait quatre objectifs principaux. Le premier visait à comprendre et à caractériser, d'un point de vue hydraulique et hydrodynamique, l'effet de l'insertion de deux types d'éléments qui sont couramment insérés dans les passes à poissons à fentes verticales : les seuils et les macro-rugosités. Le second objectif était de fournir une méthode permettant d'améliorer le dimensionnement des passes à poissons par la prise en compte de la modification des conditions hydrauliques induites par la présence de ces deux éléments. Le troisième objectif visait à proposer une solution technique qui permette d'adapter les conditions d'écoulement au franchissement des petites espèces de poissons. La solution qui a été proposée, dont l'influence sur les caractéristiques de l'écoulement a été étudiée, consiste à insérer une série de structures flexibles dans les bassins, à l'aval des fentes. Le quatrième et dernier objectif était de caractériser l'influence des seuils, des macro-rugosités et des structures flexibles sur le comportement des poissons dans une passe à fentes verticales et sur l'efficacité du dispositif.

L'étude de chacun des obstacles a été menée en définissant une démarche systématique. Par définition, cette démarche permet d'aborder tous les aspects d'un problème complexe en le divisant en sous-systèmes reliés entre eux. Ainsi, pour comprendre de manière globale l'impact de la présence des seuils, des macro-rugosités et des structures souples dans les passes à poissons à fentes verticales, une analyse des caractéristiques hydrauliques, hydrodynamiques et biologiques du dispositif a été menée.

Etant donnée la difficulté que constitue la réalisation de mesures expérimentales dans une passe à l'échelle réelle, l'étude a été effectuée à partir du modèle réduit de passe à poissons à fentes verticales du laboratoire de l'Institut P' de l'Université de Poitiers-CNRS. Ce modèle est construit sur la base des caractéristiques géométriques moyennes des passes à poissons à fentes verticales construites en France, réduite à l'échelle 1/4 en similitude de Froude. Sa grande modularité, notamment la possibilité de faire varier la pente, la largeur des bassins et le débit, ainsi que la possibilité d'y insérer des seuils, des macro-rugosités et des structures souples a rendu possible la réalisation de mesures paramétriques représentatives de l'ensemble des configurations géométriques des passes à poissons à fentes verticales qui existent en France.

Les résultats exposés dans ce travail de thèse sont issus de plusieurs campagnes expérimentales. Les coefficients de débits et les topologies d'écoulement ont été mesurés respectivement dans 454 et 284 configurations différentes, ce qui offre une base de données suffisante pour pouvoir établir des tendances et calculer des statistiques. Les profils de vitesses réalisés dans le modèle de la passe à poissons de l'Institut P' de l'Université de Poitiers caractérisent finement l'écoulement turbulent en totalisant 2698 points de mesures pour 15 configurations. Les expérimentations avec les poissons ont donné lieu au visionnage et à l'analyse de 24 heures de vidéos pour l'étude des seuils, 144 heures pour l'étude des macro-rugosités et 48 heures pour l'étude des structures flexibles, soit un total de 240 heures d'acquisition (7 configurations testées et 9 espèces de poissons). Ces nombreuses heures d'acquisition ont générées suffisamment de données pour permettre l'utilisation fiables des tests d'hypothèses statistiques. En ce qui concerne le numérique, l'écoulement a été simulé dans 7 configurations différentes. Les six premières ont été effectuées à la fois en URANS et en LES. La dernière, qui modélise l'interaction fluide-structure a été calculée uniquement en URANS. Ces simulations ont permis une analyse volumique de l'écoulement instationnaire à surface libre. Elles ont été calculées sur une machine de calcul dotée de 58 processeurs Intel Xeon de 16 cœurs en hyper-threading et

plus de 1,4 To de mémoire vive. Le temps de simulation total atteint 50 jours avec une utilisation moyenne de 110 cœurs par simulation.

La caractérisation hydraulique du dispositif a été effectuée à partir de mesures expérimentales de niveau d'eau dans chacun des bassins du modèle et ont été réalisées avec des sondes acoustiques. Ces mesures ont permis d'évaluer, pour différentes configurations géométriques, l'influence de la hauteur de seuils, de la densité de macro-rugosités et de la présence de structures flexibles, sur un paramètre essentiel utilisé lors de la phase de dimensionnement d'un dispositif de franchissement : le coefficient de débit (C_d). Le C_d est représentatif de la perte de charge dans les bassins et permet de relier la hauteur d'eau moyenne dans ces derniers au débit qui transite dans le dispositif. De l'évaluation précise du coefficient de débit, dépend le respect d'un des principaux critères de dimensionnement d'une passe à poissons à fentes verticales : la puissance volumique dissipée P_v . Cette puissance, calculée à partir du débit et du volume d'eau dans les bassins, est un indicateur global du niveau d'agitation dans les bassins, plus sa valeur est élevée, plus la difficulté de passage des migrateurs augmente ($P_v \leq 150 \text{ W.m}^{-3}$ pour les espèces comme les aloses et $P_v \leq 200 \text{ W.m}^{-3}$ pour les salmonidés) (Larinier *et al.*, 1998). L'analyse des coefficients de débits obtenus dans différentes configurations de passe à poissons a permis de mettre en évidence que la présence des seuils, des macro-rugosités et des structures flexibles avait un impact sur la valeur du C_d . Plus particulièrement, l'augmentation de la hauteur des seuils et de la densité de macro-rugosités entraîne une diminution du coefficient de débit. Il est également diminué lorsque les structures flexibles sont insérées dans l'écoulement, mais de manière plus prononcée lorsque la largeur des bassins est faible. Par ailleurs, les mesures de vitesses, effectuées avec un vélocimètre acoustique à effet Doppler (ADV), ont permis de dresser une cartographie de la topologie de l'écoulement en fonction de la hauteur des seuils, de la densité de macro-rugosités et des paramètres géométriques de la passe à poissons. De manière synthétique, ces mesures ont mis en évidence que l'augmentation de la hauteur des seuils favorisait la génération d'une topologie de type 2 (la plus défavorable pour les poissons) et que l'augmentation de la densité de macro-rugosités favorisait la topologie transitoire. En ce qui concerne l'écoulement en présence de structures flexibles, les topologies observées étaient trop différentes pour pouvoir les identifier aux topologies décrites dans la littérature sur les passes à poissons à fentes verticales. L'analyse couplée des topologies d'écoulement et de l'ensemble des coefficients de débit mesurés a montré qu'un changement de topologie entraînait une variation significative du C_d . Ainsi, le coefficient de débit s'avère être un paramètre très sensible à la fois aux différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques des passes à poissons à fentes verticales mais également à la présence d'éléments couramment insérés : les seuils et les macro-rugosités. Il se révèle également être moins évident à évaluer empiriquement qu'un autre paramètre utilisé dans la littérature : le débit adimensionné Q^* . La propriété de linéarité qui lie Q^* à la hauteur d'eau moyenne dans les bassins a été utilisée pour proposer une nouvelle méthode de prédiction du débit dans les passes à poissons à fentes verticales. Elle permet d'améliorer la précision du dimensionnement par la prise en compte des caractéristiques géométriques du dispositif (pente, largeur de bassins), de la hauteur des seuils et de la densité des macro-rugosités.

L'influence de la présence de seuils, de macro-rugosités et de structures flexibles sur les caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement au sein d'une passe à poissons a été étudiée pour deux largeurs de bassins ($B/b=6,67$ et $B/b=9$) et une pente $s=7,5\%$. L'utilisation d'une sonde ADV a permis d'avoir accès aux trois composantes de la vitesse de l'écoulement et de mettre en évidence l'effet de la hauteur des seuils, de la densité de macro-rugosités et de la présence des structures flexibles sur les profils de vitesses moyennes et d'énergies cinétiques turbulentes pour $B/b=6,67$ et 9. Des simulations numériques 3D instationnaires à surface libre Unsteady Reynolds-Average Navier Stokes (URANS) et Large Eddy Simulation (LES) de l'écoulement dans les mêmes configurations de passe à poissons ($B/b=6,67$ et 9) avec des seuils et des macro-rugosités ont été réalisées. Une simulation couplée fluide/structure a également été effectuée pour modéliser à la fois l'écoulement dans les bassins avec les structures flexibles et les déformations de ces dernières. Ces simulations donnent accès aux grandeurs caractéristiques

de l'écoulement turbulent et instationnaire dans le volume de chacun des bassins. Après avoir caractérisé les écoulements, des expérimentations avec plusieurs espèces de poissons de capacités de nage et de tailles différentes ont été menées dans la passe à poissons du laboratoire. Elles ont permis de caractériser le comportement des poissons vis-à-vis de l'écoulement dans le dispositif en fonction des différents obstacles insérés.

En synthèse, l'augmentation de la hauteur des seuils accroît la tridimensionnalité de l'écoulement et entraîne dans certains cas une variation progressive de la topologie de l'écoulement. Les valeurs moyennes spatiales des grandeurs clés de l'écoulement considérées dans la littérature comme ayant un impact fort sur le comportement des poissons (vorticité, vitesse moyenne, énergie cinétique turbulente), sont plus faibles en présence de seuils dans les fentes. Cette caractéristique s'explique notamment par l'accroissement du volume de dissipation et du changement de topologie de l'écoulement. En revanche, le volume occupé par les zones les plus favorables pour les poissons est globalement réduit et concentré près du radier, sur une hauteur équivalente à la hauteur de seuil. Cette zone plus calme derrière le seuil est utilisée par les poissons comme zone de repos. Ils s'y retrouvent parfois piégés, notamment les poissons dotés d'une faible capacité de nage, en raison du gradient vertical de vitesse important généré par le décollement du jet au passage du seuil (effet barrière). L'insertion de seuils aux pieds des fentes des passes à poissons à fentes verticales peut donc porter préjudice au franchissement des espèces, notamment les plus petites. En ce qui concerne les macro-rugosités, à une distance $Z/h_r=3$ (position du plan de mesure), la variation de densité de macro-rugosités s'est avérée n'influencer significativement ni les vitesses moyennes ni l'énergie cinétique turbulente de l'écoulement, que ce soit en grande largeur de bassin ($B/b=9$) ou en petite largeur ($B/b=6,67$). En revanche, l'analyse de l'écoulement simulé en LES pour une densité de macro-rugosités $d_r=15\%$, $s=7,5\%$ et $Q^4=4,8$ a montré qu'il existait une région plus calme au fond des bassins, appelée sous-couche rugueuse, dans laquelle l'écoulement est ralenti et où les grandeurs caractéristiques de la turbulence sont diminuées. De plus, en grande largeur de bassin, les propriétés instationnaires de l'écoulement sont semblables à celles observées dans une configuration sans macro-rugosités. L'écoulement de sillage, généré derrière les macro-rugosités, permet de créer des zones susceptibles de servir d'abris pour les poissons, à condition que ces derniers aient suffisamment d'espace pour s'y réfugier. Les expérimentations qui ont été menées avec plusieurs espèces de poissons, dont des espèces benthiques, n'ont pas permis de mettre en évidence (dans les conditions expérimentales du laboratoire) un gain significatif d'efficacité dû à la présence de macro-rugosités. Cependant, la taille légèrement trop importante des individus ne leur permettait pas de nager entre les macro-rugosités et donc de tirer profit de ces régions des bassins où l'écoulement pourrait leur être certainement plus favorable (présence de nombreux abris). Pour permettre le passage des petites espèces à travers le dispositif de franchissement, il est nécessaire d'adapter les grandeurs cinématiques de l'écoulement à leur capacité de nage. L'insertion de structures souples dans le jet à l'entrée des bassins, entraîne une réduction globale de l'énergie cinétique turbulente et de la vitesse moyenne dans les bassins. Ces structures créent une large région de sillage, utilisée par les poissons comme zone de stabulation. Par ailleurs, dans toute la région basse des bassins qui part du radier jusqu'en haut des structures souples, les grandeurs cinématiques de l'écoulement sont fortement réduites, notamment grâce à l'augmentation de la dissipation du jet à la traversée du bloc de structures. En revanche, dans la partie haute, l'écoulement est plus intense, la trajectoire décrite par le jet redevient similaire à celle observée dans une configuration sans structure flexible. En conséquence, les poissons utilisent davantage la région basse des bassins, plus calme que la région haute. Cependant la présence des structures, telles qu'elles ont été placées dans les bassins et dans les conditions expérimentales du laboratoire, n'améliore pas de manière significative l'efficacité du dispositif de franchissement. En particulier, l'analyse des vidéos réalisées pendant les expériences a montré que certains poissons avaient été gênés dans leur tentative de franchissement par le manque d'espace disponible entre les structures souples et les parois des bassins.

En conclusion, une méthode de dimensionnement des passes à poissons à fentes verticales a été proposée, basée sur des lois empiriques obtenues à partir de données expérimentales. Cette

méthode prend en compte la présence de seuils ou de macro-rugosités et permet d'améliorer la précision du dimensionnement hydraulique des passes à poissons à fentes verticales. L'influence des caractéristiques géométriques de ces dernières, de l'insertion de seuils, de macro-rugosités et de structures souples a été mis en évidence, à la fois sur les caractéristiques de l'écoulement et sur le comportement des poissons. Il serait cependant intéressant d'étudier certains points qui méritent d'être approfondis. Des expérimentations avec des espèces benthiques d'une taille compatible avec l'espace entre les macro-rugosités pourraient être entreprises pour savoir si les sillages formés derrière ces dernières peuvent servir d'abris à ces espèces et améliorer significativement l'efficacité du dispositif. Des mesures de vitesses d'écoulement dans une passe à poissons à l'échelle 1 munie de macro-rugosités pourraient également être réalisées et comparées à celles effectuées dans le modèle de passe à poissons du laboratoire pour évaluer les effets d'échelles. Il s'agirait ensuite de poursuivre l'étude entamée sur les structures souples, en optimisant leur position dans les bassins, de manière à ce qu'elles ne constituent pas une gêne pour les poissons et qu'elles permettent le franchissement des petites espèces en réduisant suffisamment les grandeurs cinématiques de l'écoulement. Pour cela, l'analyse de l'écoulement à partir de simulations numériques 3D instationnaires à surface libre couplées fluide/structures pourrait être menée, en URANS ou en LES en fonction de la qualité des résultats.

BIBLIOGRAPHIE

A

- Ackerman, J. D., & Okubo, A.** (1993). Reduced Mixing in a Marine Macrophyte Canopy. *7*, 305-309.
- Agelinchaab, M., & Tachie, M. F.** (2008, June). PIV Study of Separated and Reattached Open Channel Flow Over Surface Mounted Blocks. *Journal of Fluids Engineering*, *130*, 061206--061206-9.
- An, R., Li, J., Liang, R., & Tuo, Y.** (2016). Three-dimensional simulation and experimental study for optimising a vertical slot fishway. *Journal of Hydro-environment Research*, *12*, 119-129.

B

- Baki, A. B., Zhu, D. Z., & Rajaratnam, N.** (2014). Mean Flow Characteristics in a Rock-Ramp-Type Fish Pass. *Journal of Hydraulic Engineering*, *140*, 156-168.
- Baki, A. B., Zhu, D. Z., & Rajaratnam, N.** (2015). Turbulence Characteristics in a Rock-Ramp-Type Fish Pass. *Journal of Hydraulic Engineering*, *141*, 04014075.
- Barton, A. F., Keller, R. J., & Katopodis, C.** (2009). Verification of a numerical model for the prediction of low slope vertical slot fishway hydraulics. *Australasian Journal of Water Resources*, *13*, 53-60.
- Bazin, H. E.** (1898). *Experiences nouvelles sur l'écoulement en deversoir: exécutées à Dijon de 1886 à 1895*. Dunod.
- Beach, M. H.** (1984). *Fish pass design. Criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers.*, Fisheries and Food, Lowestoft, Fish. Res. Tech. Rep. 78, 45p. Technical report, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Directorate of fisheries research.
- Bermúdez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., & Balairón, L.** (2010). Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. *Ecological Engineering*, *36*, 1355-1364.
- Besem, F. M., Thomas, J. P., Kielb, R. E., & Dowell, E. H.** (2016). An aeroelastic model for vortex-induced vibrating cylinders subject to frequency lock-in. *Journal of Fluids and Structures*, *61*, 42-59.
- Bourtal, B.** (2012). *Modification de l'écoulement turbulent au sein de passes à poissons à fentes verticales par l'insertion d'obstacles*. Ph.D. dissertation, Université de Poitiers.
- Bousmar, D., Zorzan, G., Gillet, A., Delhoule, L. J., Bagnée, A., & De Greef, J. C.** (2014, August). Refurbishing an old fish pass: Physical and numerical modeling. *River Flow 2014*. 2427-2435.

C

- Calluau, D., Cornu, V., Bourtal, B., Dupuis, L., Refin, C., Courret, D., et al.** (2012, September). Scale effects of turbulence in vertical slot fishways : field and laboratory measurement investigation. Vienne.
- Calluau, D., Pineau, G., Texier, A., & David, L.** (2014). Estimation of the turbulent features of flow in vertical slot fishway: improvements on fishway design criteria. Porto.
- Calluau, D., Pineau, G., Texier, A., & David, L.** (2014). Modification of vertical slot fishway flow with a supplementary cylinder. *Journal of Hydraulic Research*, 52, 614-629.
- Cassan, L., & Laurens, P.** (2016). Design of emergent and submerged rock-ramp fish passes. *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.*, 45.
- Cassan, L., Tran, D. T., Courret, D., Laurens, P., & Dartus, D.** (2014, May). Hydraulic Resistance of Emergent Macroroughness at Large Froude Numbers: Design of Nature-Like Fishpasses. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 140, pp. 1--9.
- Castro, I. P.** (2007). Rough-wall boundary layers: mean flow universality. *Journal of Fluid Mechanics*, 585, 469-485.
- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Van der Vinne, G. V.-C., & Pena, E.** (2007). Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 160-172.
- Cea, L., Puertas, J., & Pena, L.** (2007). Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV. *Experiments in Fluids*, 42, 333-348.
- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., & others.** (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 130.
- Chang, W., Lien, H., Tsai, W., Lai, J., Guo, W., & Hu, T.** (2009). 3D Flow Simulations In A Pool-weir-type Fishway In The Tonghou River. Vancouver.
- Chassaing, P.** (2000). *Turbulence en mécanique des fluides: analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur*. Cépaduès-Éditions.
- Cheng, H., & Castro, I. P.** (2002). Near Wall Flow over Urban-like Roughness. *Boundary-Layer Meteorology*, 104, 229-259.
- Chorda, J., Maubourguet, M.-M., Roux, H., Larinier, M., Tarrade, L., & David, L.** (2010). Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 48, 141-151.
- Clay, H. C.** (1961). *Design of fishways and other fish facilities*. Department of Fisheries of Canada.
- Cornu, V., Baran, P., Damien, C., & David, L.** (2012). Effects of various configurations of vertical slot fishways on fish behaviour in an experimental flume. Vienne.

D

- Dejoan, A., Jang, Y.-J., & Leschziner, M. A.** (2005, Mars). Comparative LES and Unsteady RANS Computations for a Periodically-Perturbed Separated Flow Over a Backward-Facing Step. *Journal of Fluids Engineering*, *127*, 872-878.
- Detert, M.** (2008). *Hydrodynamic Processes at Water-Sediment Interface of Streambeds*. Ph.D. dissertation, University Fridericiana, Karlsruhe (Germany).
- Devos, P.** (2012, Septembre). Biostatistiques : petits effectifs. *Cours de Master Recherche Biologie Santé*. Université de Lille. Récupéré sur <http://193.51.50.30/master/coursMaster2012-PDevos.pdf>
- Dunn, C., Lopez, F., & Garcia, M. H.** (1996). *Mean Flow and Turbulence in a Laboratory Channel with Simulated Vegetation (HES 51)*. Tech. rep.

F

- Fadai-Ghotbi, A.** (2007, April). *Modélisation de la turbulence en situation instationnaire par approches rans et hybride rans-les. Prise en compte des effets de paroi par pondération elliptique*. Theses, Université de Poitiers.
- Flack, K. A., Schultz, M. P., & Shapiro, T. A.** (2005). Experimental support for Townsend's Reynolds number similarity hypothesis on rough walls. *Physics of Fluids*, *17*.
- Florens, E.** (2010). *Couche limite turbulente dans les écoulements à surface libre : étude expérimentale déffets de macro-rugosités*. Ph.D. dissertation.
- Florens, E., Eiff, O., & Moulin, F.** (2013). Defining the roughness sublayer and its turbulence statistics. *Experiments in Fluids*, *54*, 1500.
- Fuentes-Pérez, J. F., Sanz-Ronda, F. J., de Azagra Paredes, A. M., & García-Vega, A.** (2014). Modeling Water-Depth Distribution in Vertical-Slot Fishways under Uniform and Nonuniform Scenarios. *Journal of Hydraulic Engineering*, *140*, 06014016.

G

- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., & Cabot, W. H.** (1991). A dynamic subgrid scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids A*, *3*, 1760-1765.
- Ghisalberti, M., & Nepf, H. M.** (2002). Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *107*, 3-1--3-11.
- Goring, D., & Nikora, V.** (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, *128*, 117-126.

H

Haefner, J. W., & Bowen, M. D. (2002). Physical-based model of fish movement in fish extraction facilities. *Ecological Modelling*, 152, 227-245.

Heimerl, S., Hagemeyer, M., & Ehteler, C. (2008). Numerical flow simulation of pool-type fishways: new ways with well-known tools. *Hydrobiologia*, 609, 189-196.

Hotchkiss, R. H. (2002). *Turbulence investigation and reproduction for assisting downstream migrating juvenile salmonids, Part 1*. Tech. rep., Bonneville Power administration, Portland.

I

iPLESP (2015). BiostaTGV. À partir de : <http://marne.u707.jussieu.fr/biostatgv/?module=tests#main>

J

Jameson, A. (1991). Time dependent calculations using multigrid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings. Honolulu: 10th Computational Fluid Dynamics Conference.

Järvelä, J. (2002). Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants. *Journal of Hydrology*, 269, 44-54.

JCGM. (2008, Septembre). Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. 132. (B. I. des Poids et Mesures (BIPM), Ed.) Retrieved from <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html>

Jiménez, J. (2004). Turbulent flows over rough walls. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, 173-196.

Jones, W. P., & Launder, B. E. (1972). The prediction of laminarisation with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 301-314.

K

Kamula, R. (2001). *Flow Over Weirs with Application to Fish Passage Facilities*. Oulun yliopisto.

Khan, L. A. (2006). A Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) Model Analysis of Free Surface Hydrodynamics and Fish Passage Energetics in a Vertical-Slot Fishway. *North American Journal of Fisheries Management*, 26, 255-267.

Kouwen, N., & Li, R.-M. (1980). Biomechanics of vegetative channel linings. *Journal of the Hydraulics Division*, 106.

Kouwen, N., & Unny, T. E. (1973). Flexible roughness in open channels. *Journal of the Hydraulics Division*, 99.

L

Laccarino, G., Ooi, A., Durbin, P. A., & Behnia, M. (2003, April). Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24, 147-156.

- Lacey, R. W., Neary, V. S., Liao, J. C., Enders, E. C., & Tritico, H. M.** (2012). The ipos framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. *River Research and Applications*, 28, 429-443.
- Larinier, M., Courret, D., & Gomes, P.** (2006). *Guide technique pour la conception des passes à poissons "naturelles"*. Tech. rep., GHAPPE TOULOUSE.
- Larinier, M., Porcher, J. P., Travade, F., & Gosset, C.** (1998). *Passes à poissons. Expertise, conception des ouvrages de franchissement*. (M. au point, Ed.)
- Liggett, J. A.** (1994). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill.
- Liu, M., Rajaratnam, N., & Zhu, D. Z.** (2006). Mean Flow and Turbulence Structure in Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 765-777.
- Luhar, M., & Nepf, H. M.** (2016). Wave-induced dynamics of flexible blades. *Journal of Fluids and Structures*, 61, 20-41.
- Luhar, M., Rominger, J., & Nepf, H.** (2008). Interaction between flow, transport and vegetation spatial structure. *Environmental Fluid Mechanics*, 8, 423.

M

- Macdonald, R. W.** (2000). Modelling The Mean Velocity Profile In The Urban Canopy Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 97, 25-45.
- Macdonald, R. W., Griffiths, R. F., & Hall, D. J.** (1998). An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, 32, 1857-1864.
- Mallen-Cooper, M., Zampatti, B., Stuart, I., & Baumgartner, L.** (2008). *Innovative Fishways – Manipulating turbulence in the vertical slot design to improve performance and reduce cost*. Tech. rep., Fishway Consulting Services. Sydney, South.
- Manes, C., McEwan, I., & Pokrajac, D.** (2007, August). Double-Averaged Open-Channel Flows with Small Relative Submergence. *Journal of Hydraulic Engineering*, --.
- Marriner, B. A., Baki, A. B., Zhu, D. Z., Thiem, J. D., Cooke, S. J., & Katopodis, C.** (2014). Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway. *Ecological Engineering*, 63, 88-101.
- Michaud, M.** (2015). *Etude de l'impact de rugosités de fond sur le comportement de différentes espèces piscicole dans un dispositif expérimental de franchissement piscicole à fentes verticales (échelle ¼)*. Tech. rep., Université de Poitiers-CNRS.
- Moulin, F., Peltier, Y., Bercovitz, Y., Eiff, O., Beer, A., Pen, C., et al.** (2008). Experimental study of the interaction between a turbulent flow and a river biofilm growing on macrorugosities. *Freshw. Biol*, 36, 249-263.
- Musall, M., Schmitz, C., Oberle, P., Nestmann, F., Henning, M., & Weichert, R.** (2014, August). Analysis of flow patterns in vertical slot fishways. In *River Flow 2014* (pp. 2421-2426--). CRC Press.

N

- Nepf, H. M., & Vivoni, E. R.** (2000). Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105, 28547-28557.
- Nicoud, F., & Ducros, F.** (1999). Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 62, 183-200.
- Nikora, V. a., McLean, S., Dittrich, A., & Aberle, J.** (2002). Zero-plane displacement for rough-bed open-channel flows., (pp. 83-92). Louvain-la-Neuve, Belgique.
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., & Walters, R.** (2007, August). Double-Averaging Concept for Rough-Bed Open-Channel and Overland Flows: Theoretical Background. -.

O

- Odeh, M.** (2003, #may#). Discharge Rating Equation and Hydraulic Characteristics of Standard Denil Fishways.

P

- Pavlov, D. S., Lupandin, A. I., & Skorobogatov, M. A.** (2000). The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish. *Journal of Ichthyology*, 20, S232-S261.
- Pettersson, L. B., & Brönmark, C.** (1999). Energetic Consequences of an Inducible Morphological Defence in Crucian Carp. *Oecologia*, 121, 12-18.
- Piomelli, U., & Balaras, E.** (2002). Wall-layer models for large-eddy simulations. *Annual review of fluid mechanics*, 34, 349-374.
- Pokrajac, D., Campbell, L. J., Nikora, V., Manes, C., & McEwan, I.** (2007). Quadrant analysis of persistent spatial velocity perturbations over square-bar roughness. *Experiments in Fluids*, 42, 413-423.
- Powers, D., Orsborn, J. F., Bumstead, T. W., Klinger-Kingsley, S., & Mih, W. C.** (1985). Fishways: An assessment of their development and design. *Bonneville Power Administration*.
- Puertas, J., Pena, L., & Teijeiro, T.** (2004). Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, 10-23.
- Py, C., De Langre, E., & Moulia, B.** (2006, December). A frequency lock-in mechanism in the interaction between wind and crop canopies. *Journal of Fluid Mechanics*, 568, 425-449.

R

- Rajaratnam, N.** (1976). *Turbulent jets* (Vol. 5). Elsevier.
- Rajaratnam, N., & Muralidhar, D.** (1969). Flow below deeply submerged rectangular weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 7, 355-374.

- Rajaratnam, N., der Vinne, G. V., & Katopodis, C.** (1986). Hydraulics of Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112, 909-927.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., & Paccagnan, R.** (1992). Field studies of fishways in Alberta. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19, 627-638.
- Raupach, M. R., Antonia, R. A., & Rajagopalan, S. S.** (1991). Rough-Wall turbulent boundary layers. *Applied Mechanics Reviews*, 44, 25.
- Remon, E.** (2006, December). *Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution*. Theses, Université Jean Monnet, Saint-Etienne.
- Rotach, M. W.** (1999). On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmospheric Environment*, 33, 4001-4008.
- Rouzes, M.** (2015, March). *Etude expérimentale de l'hydrodynamique d'un écoulement turbulent sur fond rugueux en situation naturelle et/ou à faible submersion*. Ph.D. dissertation.

S

- Schlichting, H., & Gersten, K.** (2000). *Boundary-Layer Theory - 8th Revised and Enlarged Edition*. Berlin: Springer.
- Shamloo, H., & Aknooni, S.** (2012). 3D-Numerical Simulation of the Flow in Pool and Weir Fishways. *2nd International Conference on Environmental and Water Resources Engineering*. Langkawi Kedah, Malaysia
- Silva, A. T., Katopodis, C., Santos, J. M., Ferreira, M. T., & Pinheiro, A. N.** (2012). Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow . *Ecological Engineering*, 44, 314-328.
- Silva, A. T., Santos, J. M., Ferreira, M. T., Pinheiro, A. N., & Katopodis, C.** (2011). Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway. *River Research and Applications*, 27, 360-373.
- Skogerboe, G. V., Hyatt, M. L., & Austin, L. H.** (1967). *Design and Calibration of Submerged Open Channel Flow Measurement Structures: Part 4 - Weirs*. Tech. rep., Utah State University.
- Smagorinsky, J.** (1963). General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, 91, 99-164.
- Sontek.** (1997). *Pulse Coherent Doppler Processing and the ADV Correlation Coefficient*. Tech. rep.
- Souli, M., & Sigrist, J.-F.** (2009). *Interaction fluide-structure : modélisation et simulation numérique*. (H. science, Ed.) Lavoisier.
- Standen, E. M., Hinch, S. G., Healey, M. C., & Farrell, A. P.** (2002). Energetic costs of migration through the Fraser River Canyon, British Columbia, in adult pink (*Oncorhynchus gorbuscha*) and sockeye (*Oncorhynchus nerka*) salmon as assessed by EMG telemetry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59, 1809-1818.

Statsoft. (2015, Janvier). Tests de Levene et Brown-Forsythe d'homogénéité des Variances (HV). Retrieved from <http://www.statsoft.fr/concepts-statistiques/glossaire/t/tests-levene.html>

T

Tarrade, L. (2007). *Etude des écoulements turbulents dans les passes à poissons à fentes verticales. Adaptation aux petites espèces.* Rapport de thèse "Mécanique des Milieux Fluides", Université de Poitiers.

Tarrade, L., Pineau, G., Calluau, D., Texier, A., David, L., & Larinier, M. (2011). Detailed experimental study of hydrodynamic turbulent flows generated in vertical slot fishways. *Environmental Fluid Mechanics*, 11, 1-21.

Tarrade, L., Texier, A., David, L., & Larinier, M. (2008, September). Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia*, vol. 609, pp. 177-188.

Tarrade, L., Texier, A., David, L., Pineau, G., & Larinier, M. (2006). An experimental study of turbulent flow in vertical slot fishways. *12th International Symposium on Flow Visualization*. Gottingen.

V

Vaillé, G. (2016). *Etude de l'impact de la rugosité de fond dans une passe à bassins à fentes verticales sur le franchissement de salmonidés de petite taille.* Tech. rep., Université de Poitiers-CNRS.

Velasco, D., Bateman, A., Redondo, J. M., & DeMedina, V. (2003). An Open Channel Flow Experimental and Theoretical Study of Resistance and Turbulent Characterization over Flexible Vegetated Linings. *Flow, Turbulence and Combustion*, 70, 69-88.

Villemonte, J. R. (1947). Submerged-weir discharge studies. *Engineering News Record*.

Vogel, S. (1994). *Life in Moving Fluids: The Physical Biology of Flow*. Princeton University Press.

Voulgaris, G., & Trowbridge, J. H. (1998). Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15, 272-289.

W

Wang, R., David, L., & Larinier, M. (2010, February). Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*.

Webb, B. P. (1971). The Swimming Energetics of Trout. *Journal of Experimental Biology*, 55, 521-540.

White, L. J. (2003). *Advancements in the engineering and scientific basis of the design of fishways : with an emphasis on the Murray-Darling basin Australia.* Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne.

Wu, S., & Rajaratnam, N. (1996, July). Submerged Flow Regimes of Rectangular Sharp-Crested Weirs. --.

Wu, S., Rajaratnam, N., & Katopodis, C. (1999). Structure of Flow in Vertical Slot Fishway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 351-360.

X

Xu, T., & Sun, S. (2009). Numerical Simulation of Flow Structure in a Vertical Slot Fishway. Vancouver.