

Influence des paramètres géométriques sur l'écoulement turbulent dans une passe à poissons à fentes verticales

Laurent Tarrade¹, Alain Texier¹, Laurent David¹ & Michel Larinier²

¹Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques, Université de Poitiers
Téléport 2, boulevard Marie et Pierre Curie, BP 30179
86962 Futuroscope Chasseneuil cedex
Laurent.Tarrade@lea.univ-poitiers.fr

²Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
Allée du Professeur Camille Soula
31400 Toulouse

Résumé :

Les passes à fentes verticales sont des structures hydrauliques permettant aux poissons de franchir des obstacles lors de leur migration vers l'amont des cours d'eau. Une étude expérimentale a été entreprise sur un modèle réduit pour caractériser les écoulements turbulents dans différentes configurations de passes à fentes verticales. Ce travail doit permettre de déterminer par la suite de quelle manière ces dispositifs peuvent être modifiés afin de faciliter le passage des petites espèces qui, aujourd'hui, ont des difficultés à franchir les bassins. Les caractéristiques de l'écoulement moyen et de la turbulence ont été étudiées par PIV et ADV pour plusieurs pentes de canal, plusieurs débits d'écoulement et largeurs de bassins. Les mesures ont permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres géométriques et hydrauliques sur la structure même des écoulements turbulents.

Abstract :

Vertical slot fishways are hydraulic structures that allow the upstream migration of fishes through engineering constructions or natural obstructions in rivers. An experimental study was undertaken on a fishway scale model to characterize the turbulent flow for various configurations of vertical slot fishways and to determine how they might be modified in order to facilitate the passage of the small species which have difficulties in rapidly passing through the pools. The characteristics of the mean flow and turbulence were studied by PIV and ADV for several channel slopes, pool widths and flow discharges. The measurements allowed to highlight the influence of the different geometric and hydraulic parameters on the structure of the turbulent flow.

Mots-clefs :

Passé à poissons ; Ecoulement turbulent ; Hydraulique

1 Introduction

Les passes à poissons à fentes verticales sont des structures hydrauliques permettant aux poissons de franchir les obstacles naturels et artificiels qui bloquent leur migration vers l'amont des cours d'eau. Elles consistent en un canal incliné composé de plusieurs bassins reliés par des fentes verticales par lesquelles l'eau s'écoule vers l'aval. La structure de l'écoulement est très importante puisqu'elle permet de guider les poissons lors de leur montaison tout en assurant la dissipation de l'énergie du jet par mélange dans le bassin. Mais les ouvrages construits depuis plusieurs années en France n'assurent le passage que de certaines espèces migratrices de grandes tailles (telles le saumon, la truite de mer...). Les bassins dimensionnés pour ces grands migrateurs sont inadaptés aux petits poissons qui ont des difficultés à les franchir rapidement et

peuvent rester bloqués par les importants cisaillements fluides et les zones de recirculation. L'augmentation du temps de séjour des poissons dans les bassins peut remettre en cause l'efficacité du dispositif de franchissement. La Directive Cadre Européenne sur l'Eau prévoit que l'ensemble des espèces résidentes des cours d'eau doit être pris en considération dans le concept de restauration de la connectivité biologique des rivières, dont certaines de petites tailles ont des capacités de nage limitées. Cela passe principalement par l'adaptation des dispositifs déjà existants à un plus grand nombre d'espèces.

L'expérience montre que le comportement des poissons dans une passe à poissons est fortement lié au champ de vitesses mais aussi à l'intensité de la turbulence et à la dimension des tourbillons. Suite à une étude numérique (Tarrade *et al.*, 2005), ce travail a pour but de caractériser expérimentalement l'écoulement dans différentes configurations de passes à fentes verticales en faisant varier la pente du canal, la largeur des bassins et le débit d'écoulement afin de mettre en évidence l'influence des différents paramètres géométriques et hydrauliques sur la structure de l'écoulement turbulent.

2 Dispositif expérimental et moyens de mesure

L'étude a été réalisée sur un modèle physique de passe à fentes verticales conçu au sein du laboratoire à une échelle géométrique de 1/4 par rapport à la réalité (FIG 1). Le modèle est composé de cinq bassins, les mesures portant sur le troisième afin de travailler sur un écoulement symétrique. La similitude utilisée est celle de Froude qui donne une échelle des vitesses de 1/2, une échelle des énergies de 1/4 et une échelle des débits de 1/32. Toutes les dimensions et grandeurs sont par la suite exprimées à l'échelle 1/1. Le prototype modélisé a une fente de largeur $b = 0.3$ m, des bassins de longueur $L = 3$ m. La largeur des bassins est ajustable à l'aide d'une paroi amovible : $B = 2.7, 2.3, 2$ et 1.7 m. Par un axe de rotation, le radier peut être incliné : $I = 5\%, 10\%$ et 15% , les parois étant parfaitement verticales pour une pente de 10% . Les trois pentes génèrent respectivement trois hauteurs de chute $\Delta h = 0.15, 0.3$ et 0.45 m et trois vitesses maximales théoriques $V_{th} = (2g\Delta h)^{1/2} = 1.71, 2.42, 2.97$ m/s. Les débits d'étude sont $Q = 576, 736$ et 864 L/s. L'axe X est dans la direction longitudinale de l'écoulement et l'axe Y est dans la direction transversale. Le plan XY est parallèle au radier du canal.

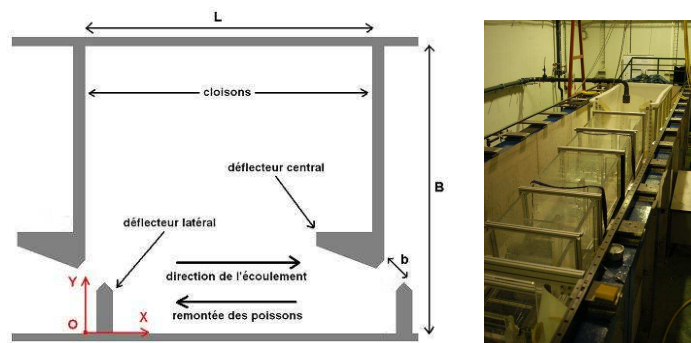


FIG 1 - Caractéristiques géométriques d'un bassin de passes à fentes verticales

Les mesures de vitesse ont été effectuées par Vélocimétrie par Imagerie de Particule (PIV) dans deux plans parallèles au radier ($Z = 8$ et 60 cm à l'échelle réelle) et dans le plan vertical passant par l'axe médian des fentes ($Y = 55$ cm). L'écoulement a été ensemencé de particules micro-sphériques de polyamide 12 de diamètre moyen $5 \mu\text{m}$. Le plan lumineux d'épaisseur 1.5 mm a été réalisé à partir d'un laser Nd-Yag Quanta-Ray de la société Spectra-Physics (2×200 mJ) de longueur d'onde 532 nm et de fréquence 10 Hz. Deux caméras CCD FlowMaster ImagerIntense de la société LaVision (codées en 12 bits et de résolution de 1376×1040 pixels²) ont été utilisées afin d'enregistrer les images de l'écoulement décalées d'un temps Δt compris

entre 3500 et 4900 μ s. Les doublets d'image sont séparés de 200 ms. Les deux caméras sont placées parallèlement de façon à visualiser la totalité du bassin. Le calcul d'inter-corrélation a été effectué par le logiciel FlowManager de la société Dantec sur des fenêtres d'analyse finale de 32×32 pixels². Les vecteurs instantanés ont été traités à l'aide d'un filtre local médian. Pour chaque caméra et chaque configuration, 845 champs de vitesses instantanés ont été obtenus, moyennés puis interpolés afin d'obtenir le champ complet (FIG 2a).

Par ailleurs des mesures tridimensionnelles de vitesse ont été réalisées sur un maillage de pas 30 cm (pleine échelle, FIG 2b) par une vélocimétrie acoustique par effet Doppler (ADV). La sonde 16-MHz MicroADV de la société SonTek est constituée d'une tige rigide de 40 cm au bout de laquelle est monté le système acoustique (un émetteur au milieu de trois récepteurs acoustiques). Les récepteurs sont orientés vers le bas de façon à intersecter un volume d'environ $0,09 \text{ cm}^3$ localisé à 5 cm sous l'émetteur central. La fréquence d'acquisition est de 50 Hz avec une résolution de 0.01 cm/s et une précision de mesure de 1%. Les vitesses obtenues ont ensuite été filtrées par un seuillage de l'accélération et de l'espace-phase.

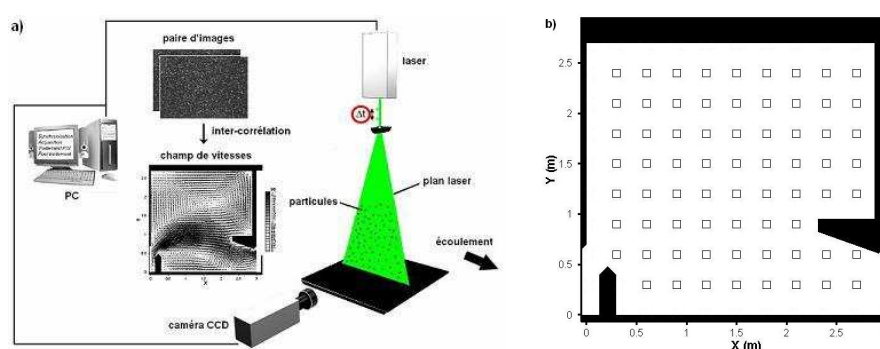


FIG 2 - a) Principe de la PIV et b) Points de mesure par ADV

3 Résultats et discussion

Deux topologies d'écoulement existent selon la largeur du bassin et la pente du canal. Le premier modèle d'écoulement se produit lorsque la largeur du bassin est $B = 2.7$ m. Le jet issu de la fente pénètre dans le bassin sous forme d'un jet courbe qui converge vers la fente suivante en générant d'une part une grande zone de recirculation occupant environ 50% de la surface du bassin entre les cloisons des déflecteurs centraux et d'autre part une zone tourbillonnaire située de l'autre côté du jet entre les déflecteurs latéraux, contrarotative par rapport à la précédente et de taille inférieure (FIG 3a). Le second modèle d'écoulement existe lorsque la largeur du bassin est $B = 2$ et 1.7 m. Dans ce cas le jet prend une forme très incurvée qui va impacter directement sur la paroi latérale opposée. Un tourbillon de taille importante et d'intense vorticité se crée dans la partie convexe du jet entre les déflecteurs latéraux. La forme incurvée du jet sépare le tourbillon qui existait entre les cloisons des déflecteurs centraux pour le premier modèle d'écoulement en deux cellules tourbillonnaires. La première est située dans le coin amont du bassin et la seconde le long du déflecteur central (FIG 3b). La largeur $B = 2.3$ m génère l'un ou l'autre modèle selon la pente du canal. Lorsque la pente est $I = 5$ ou 10% , la topologie est similaire au premier modèle d'écoulement : deux grandes recirculations de part et d'autre du jet dont celle entre les cloisons des déflecteurs centraux est caractérisée par un point singulier. Lorsque la pente du canal est $I = 15\%$, la topologie est identique au second modèle d'écoulement, c'est-à-dire composée d'un jet incurvé et de trois cellules tourbillonnaires dont une très importante localisée entre les déflecteurs latéraux. Finalement l'écoulement dans une passe à poissons se réduit à seulement deux topologies d'écoulement distinctes selon la largeur des bassins et la pente du radier. Cependant pour les deux modèles, les tourbillons peuvent représenter des pièges pour les petites espèces, qui par nature affrontent le courant, et du fait des

changements successifs de sens de recirculation et de la taille des vortex peuvent perdre leur orientation dans ces eaux tourbillonnantes.

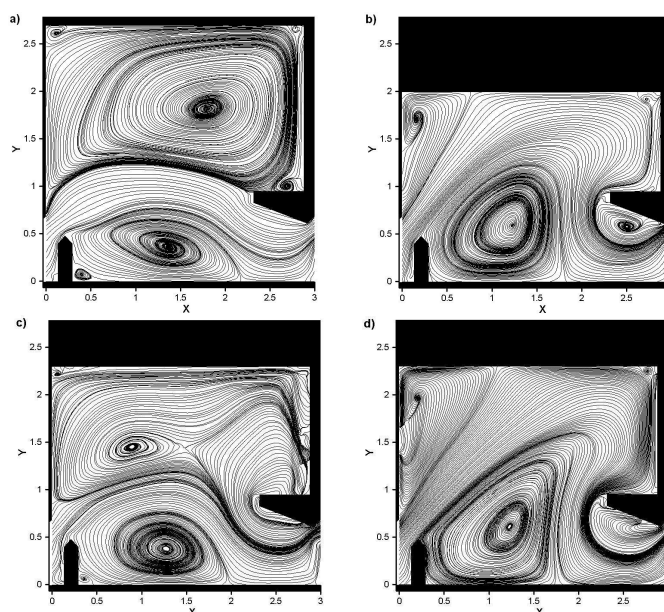


FIG 3 - Lignes de courant pour $Z = 0.6$ m, $Q = 736$ L/s :

a) $I = 10\%$, $B = 2.7$ m, b) $I = 10\%$, $B = 2$ m, c) $I = 5\%$, $B = 2.3$ m, d) $I = 15\%$, $B = 2.3$ m

La pente influe aussi très largement sur les grandeurs cinématiques de l'écoulement. Plus la pente est élevée, plus la vitesse et l'énergie cinétique turbulente sont importantes. Ainsi entre 5 et 15%, ces grandeurs peuvent être multipliées par trois en sortie de fente (FIG 4a), zone de vitesse maximale, alors que ce différentiel est atténué au fur et à mesure que le jet pénètre dans le bassin, les valeurs n'étant alors multipliées que par deux au milieu du bassin. Les profils de vitesse mettent clairement en valeur les très importants cisaillements situés en bordure du jet (FIG 4a). Les valeurs maximales de l'énergie cinétique turbulente sont atteintes aux frontières de l'écoulement principal, où les fluctuations de vitesses turbulentes dues au battement du jet sont les plus importantes (FIG 4b). Ce fort cisaillement constitue un obstacle important pour les poissons lorsqu'ils doivent pénétrer dans le flux principal et franchir la fente. Au fur et à mesure que le jet pénètre dans le bassin, le cisaillement est atténué. Les gradients de vitesse diminuent entre le jet et les zones de recirculation et les écarts de valeur entre les différentes pentes sont réduits. L'énergie turbulente devient alors relativement constante sur toute la largeur du jet.

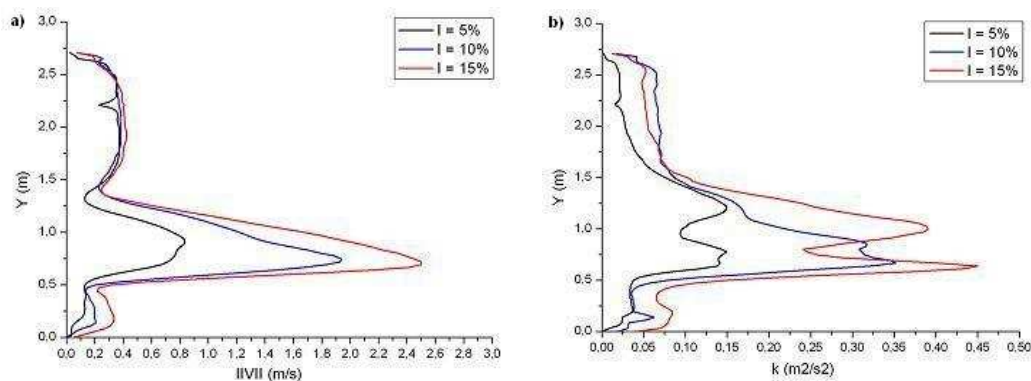


FIG 4 - Vitesse et énergie turbulente pour $B = 2.7$ m, $Z = 0.6$ m, $Q = 736$ L/s :

a) $\|V\|$ en $X = 0.5$ m et b) k en $X = 0.5$ m

Une variation de débit ne modifie pas les topologies d'écoulement. La vitesse et l'énergie cinétique turbulente ne subissent pas de modification notable. En effet en sortie de fente, les profils de vitesse sont quasiment identiques pour les trois débits. Au milieu du bassin, quelques variations existent mais ne permettent pas d'affirmer que le débit influe sur les vitesses (FIG 5a). Il a une influence légèrement plus importante sur l'énergie turbulente près de la fente puisque de faibles différences se produisent entre les profils d'énergie des trois débits. Au milieu du bassin ces légères différences perdurent (FIG 5b). Finalement on constate que le débit ne modifie pas significativement la topologie de l'écoulement ni ses grandeurs cinématiques. Une variation de débit se traduit principalement par une élévation ou une diminution du niveau d'eau.

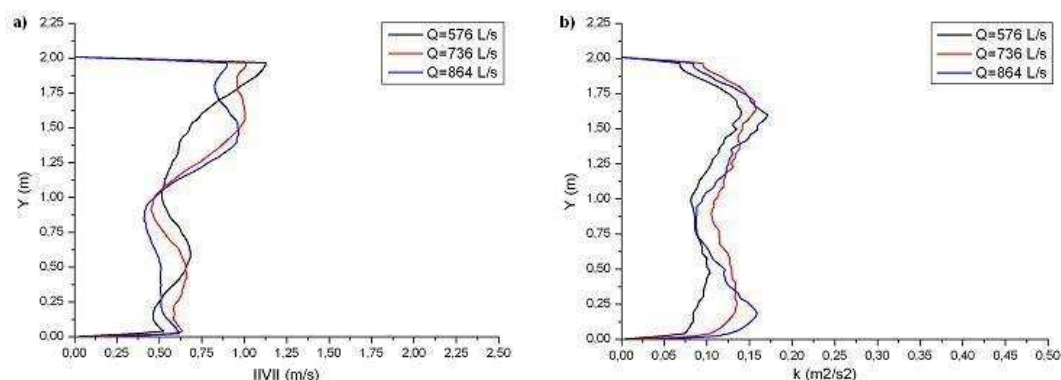


FIG 5 - Vitesse et énergie turbulente pour $I = 10\%$, $B = 2$ m, $Z = 0.6$ m :

a) $\|V\|$ en $X = 1.5$ m et b) k en $X = 1.5$ m

Les profils de vitesse dans le jet ont été tracés perpendiculairement à la ligne de vitesse maximale qui caractérise le cœur du jet issu de la fente avec une forme quasi-symétrique. La valeur maximale de la vitesse n'est pas atteinte dans la fente mais à une distance égale à la largeur de celle-ci (Wu *et al.*, 1999) et elle est égale à la vitesse maximale théorique ($= (2g\Delta h)^{1/2}$). Une fois le maximum atteint, les vitesses diminuent au fur et à mesure que l'écoulement pénètre dans le bassin et le jet s'élargit de manière dissymétrique sous l'action des recirculations qui entraînent l'écoulement principal afin de dissiper son énergie (FIG 6).

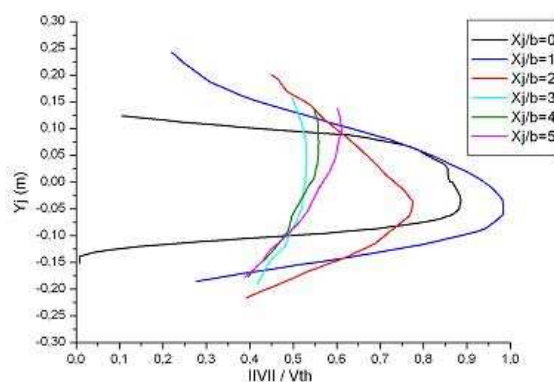


FIG 6 - Vitesse $\|V\|/V_{th}$ dans le jet pour $I = 10\%$, $B = 2.7$ m, $Z = 0.6$ m, $Q = 736$ L/s

Dans les recirculations, les profils verticaux de vitesse sont similaires le long de la colonne d'eau. La composante verticale est très faible et contribue peu au module de la vitesse (FIG 7a et b) caractérisé par la composante longitudinale. L'écoulement est alors quasi-bidimensionnel (Puertas *et al.*, 2004). Dans le jet, cette bidimensionnalité est moins évidente. Les vitesses

différent selon la hauteur d'eau (FIG 7c). La composante longitudinale reste cependant prépondérante. En dehors du jet, considérer l'écoulement comme relativement bidimensionnel est acceptable.

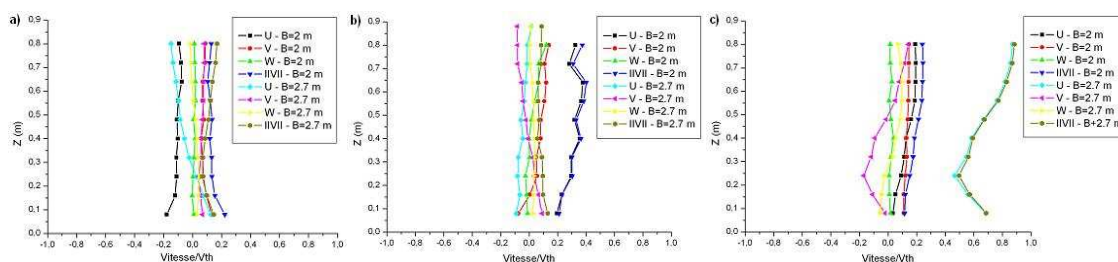


FIG 7 - Vitesse pour $I = 10\%$, $Q = 736$ L/s en :
 a) $X = 0.9$ m, $Y = 0.3$ m, b) $X = 1.8$ m, $Y = 1.8$ m, c) $X = 1.2$ m, $Y = 0.9$ m

Les densités spectrales d'énergie adimensionnées par les vitesses fluctuantes ont été comparées à la loi de Kolmogorov (pente en $-5/3$) qui caractérise les structures turbulentes dans la zone inertielle. Dans les recirculations, la composante verticale a une pente en $-5/3$. Les composantes longitudinales et transversales ne suivent pas cette loi et apparaissent comme plus énergétiques, leur apport énergétique étant semblable. Dans le jet, les spectres des trois composantes sont éloignés de la pente en $-5/3$ et sont plus énergétiques que dans les cellules tourbillonnaires : ces structures turbulentes produisent de l'énergie.

5 Conclusion

L'écoulement dans les passes à fentes verticales se limite à deux topologies distinctes selon la largeur des bassins et la pente du canal. L'inclinaison du radier a une influence importante sur la vitesse et l'énergie turbulente qui croissent avec la pente. Le débit ne modifie pas les deux modèles d'écoulement et a une faible influence sur les grandeurs cinématiques. Il agit principalement sur la hauteur d'eau. L'écoulement est quasi-bidimensionnel dans les recirculations, les fortes valeurs de la composante verticale de vitesse étant atteintes dans le jet. Le jet possède une énergie très supérieure à celle des cellules tourbillonnaires qui dissipent mieux l'énergie.

Références

- Tarrade, L., Manceau, R., Texier, A., David, L. & Larinier M. 2005 Etude numérique des écoulements hydrodynamiques turbulents dans une passe à poissons. *Actes du 17^{ème} Congrès Français de Mécanique*. Troyes, France
- Puertas, J., Peña, L. & Teijeiro, T. 2004 An experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*. **130** (1), 10-23
- Wu, S., Rajaratnam, N., & Katopodis, C. 1999 Structure of flow in vertical slot fishway. *Journal of Hydraulic Engineering*. **125** (4), 351-360