



HAL
open science

Etude numérique des écoulements hydrodynamiques turbulents dans une passe à poissons

Laurent Tarrade, Rémi Manceau, Alain Texier, Laurent David, Michel Larinier

► **To cite this version:**

Laurent Tarrade, Rémi Manceau, Alain Texier, Laurent David, Michel Larinier. Etude numérique des écoulements hydrodynamiques turbulents dans une passe à poissons. 17. Congrès Français de Mécanique, Sep 2005, Troyes, France. hal-02590103

HAL Id: hal-02590103

<https://hal.inrae.fr/hal-02590103>

Submitted on 25 Apr 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Etude numérique des écoulements hydrodynamiques turbulents dans une passe à poissons

Laurent Tarrade, Rémi Manceau, Alain Texier, Laurent David, Michel Larinier

Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques (Université de Poitiers)
téléport 2, boulevard Marie et Pierre Curie, BP 30179
86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL

Résumé :

Les passes à fentes verticales permettent aux poissons de remonter les rivières au passage d'obstacles. Les ouvrages actuels ne sont pas conçus pour les petites espèces qui peuvent rester bloquées au sein de zones de recirculation. Une première phase numérique de nos travaux a permis de caractériser l'écoulement turbulent dans une passe à poissons et d'en étudier les possibles évolutions hydrauliques et géométriques.

Abstract :

The vertical slot fishways enable fishes to overcome obstructions in their upstream migration in rivers. The current structures are not conceived for the small species which can remain blocked within recirculation eddies. A first numerical work made it possible to characterize the turbulent flow in a fishway and to study this possible hydraulic and geometric evolutions.

Mots clefs :

Passé à poissons ; Fentes verticales ; Ecoulement turbulent ; Jet ; Tourbillons ; Zones de recirculation ; Analyse numérique.

1 Introduction et contexte de l'étude

Les passes à poissons sont des dispositifs hydrauliques qui facilitent la montaison du poisson vers l'amont des rivières par dissipation de l'énergie de l'écoulement. Elles offrent la possibilité au poisson de circuler d'un milieu à un autre pour assurer la survie de l'espèce. Toutefois les passes à poissons construites depuis une vingtaine d'années en France dans le cadre des différents programmes de protection ou de restauration des cours d'eau sont essentiellement destinées à assurer le passage d'un nombre limité d'espèces correspondant aux espèces considérées comme migratrices dans le code de l'Environnement, c'est-à-dire plus particulièrement le saumon, la truite de mer, l'aloise et la lamproie, espèces de grandes tailles et aux capacités de nage importantes. Il convient aujourd'hui de prendre en compte, dans le concept de restauration biologique des rivières, l'ensemble des espèces dont certaines sont de petites tailles et possèdent des capacités de nage limitées. Cela passe à la fois par la conception de nouveaux dispositifs mais aussi par l'adaptation de ceux existants à un plus grand nombre d'espèces migratrices. L'expérience montre que le comportement des poissons dans une passe (et par conséquent l'efficacité de celle-ci) est fortement lié, non seulement au champ des vitesses, mais aussi à l'intensité de la turbulence et à la dimension des tourbillons. Plusieurs observations mettent en évidence que les poissons de petites tailles ont tendance à perdre leur orientation dans des zones de forte recirculation au sein des passes dimensionnées pour des espèces de grande taille. Le but de cette étude numérique est de caractériser l'écoulement turbulent dans des passes à fentes verticales « standard » et de voir si il est possible de proposer des modifications de leurs caractéristiques géométriques et hydrauliques (taille des tourbillons, zones de recirculation) de façon à faciliter le passage des petites espèces.

2 Les écoulements dans les passes à poissons

Les passes à fentes verticales sont des canaux rectangulaires inclinés et divisés en un certain nombre de bassins séparés par des fentes verticales allant du radier jusqu'à la surface de l'eau et à travers lesquelles s'écoule l'eau d'un bassin au suivant, les poissons remontant le courant à travers ces échancrures à la hauteur souhaitée [1]. L'écoulement de surface généré est principalement composé d'un jet au passage de la fente dont l'énergie est dissipée au sein du bassin où il se déverse. Deux principaux types d'écoulement dans les passes à fentes verticales peuvent être distingués selon la pente du radier (figure 1) [4]. Dans le modèle 1, les canaux sont peu inclinés (pente d'environ 5%), le jet émanant d'une fente traverse le volume d'eau sous la forme d'un jet courbe bidimensionnel s'épanouissant dans le bassin à mesure qu'il converge vers la fente suivante. Ce flux génère deux zones principales de recirculation de part et d'autre du jet : une première A entre les petits déflecteurs (représentant 30% du volume du bassin) et une seconde B plus importante entre les deux grands déflecteurs (occupant 45% du volume total du bassin). Ainsi environ 75% du volume d'eau contenue dans le bassin forme ces régions de recirculation. La hauteur de l'eau est globalement égale sur l'ensemble des bassins. L'écoulement est donc principalement bidimensionnel, la composante verticale de la vitesse quasi-nulle peut être négligée. Dans le modèle 2, les pentes des canaux sont plus accentuées (10% et plus) et l'écoulement est alors tridimensionnel. Le jet issu de la fente plonge et se dirige presque parallèlement aux grands déflecteurs vers la paroi latérale. Une part importante de ce flux percute le mur près du radier et remonte le long de cette paroi latérale pour réapparaître à la surface alors qu'une autre partie de celui-ci se dirige vers la fente suivante. Pour ce type d'écoulement, seule une petite zone de recirculation horizontale C se forme près des grands déflecteurs (représentant 10% du volume total) tandis qu'une large zone tourbillonnaire D se crée entre les petits déflecteurs (occupant 30% du volume d'eau du bassin). Dans ce second modèle d'écoulement, seul 40% du volume d'eau dans le bassin constitue des régions de recirculation et l'écoulement est plus important au niveau du radier. Il est à noter que dans le cas d'une pente des canaux plus prononcée (20%), qui ne concerne pas cette étude et présente peu d'intérêt piscicole, un ressaut hydraulique se produit à la sortie de la fente.

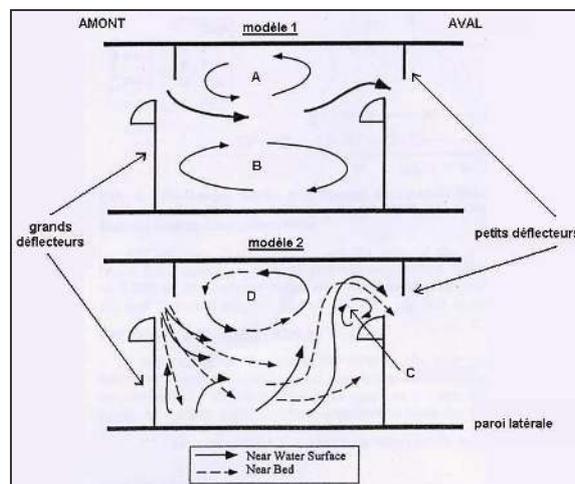


FIG. 1 – Types d'écoulements dans une passe à fentes verticales

Les vitesses maximales du jet dans le bassin peuvent être supérieures de 15% à celles dans la fente [4] et cela, à une distance de l'échancrure égale à sa largeur, près de la surface libre pour le modèle 1 et près du radier pour le modèle 2. La vitesse maximale du jet dans une fente près du radier est $V_{\max} = (2g\Delta h)^{0.5}$. Pour une pente de 5%, bien que la valeur de la vitesse dans la fente soit approximativement la même en différentes profondeurs, excepté près de la surface, la direction de cette vitesse n'est pas exactement perpendiculaire à la fente. Pour une pente de 10%, la variation de la vitesse dans l'échancrure près de la surface est plus marquée, les vecteurs vitesse ne sont pas perpendiculaires à la fente et des composantes verticales sont orientées vers le radier. L'écoulement dans la fente n'est donc pas un jet rectangulaire uniforme sortant perpendiculairement de la fente. A peu près 40% de l'eau d'un bassin a une vitesse supérieure à $0.3V_{\max}$, 15% a une vitesse supérieure à $0.5V_{\max}$ et 5% a une vitesse supérieure à $0.7V_{\max}$. En traversant un bassin par

le plus court trajet allant d'une fente à la suivante, les poissons rencontrent les conditions suivantes : vitesses décroissantes dans la gamme $V_{\max}-0.7V_{\max}$ sur une distance $0.4L$ (avec L la longueur du bassin) où le poisson « sprintera », faibles vitesses ($0.3V_{\max}$ ou moins) sur une autre distance $0.4L$ où il pourra se reposer, puis vitesses croissantes de $0.3V_{\max}$ à V_{\max} sur une distance $0.2L$ à proximité de la fente suivante.

3 Simulation numérique de l'écoulement dans une passe à fentes verticales

3.1 Caractéristiques de l'étude numérique

La passe à fentes verticales standard modélisée (figure 2), qui par la suite fera référence au sein de notre laboratoire pour les futures études expérimentales, est un bassin de longueur $L=0.75$ m et de largeur $B=0.675$ m avec une fente d'une largeur $b=0.075$ m, les deux déflecteurs formant un angle de 45° . La hauteur d'eau moyenne dans les bassins est $h=0.45$ m et le débit $Q=31$ L/s. Cette première étude numérique simule un radier horizontal (modèle d'écoulement 1 pour une pente de 5%). La géométrie est adimensionnée par la largeur de la fente b et les vitesses sont adimensionnées par la vitesse débitante (débit/section) dans la fente $V_f=0.918$ m/s. On note $V_{\max}=1.2$ m/s la vitesse maximale dans la fente. Les simulations numériques ont été menées à l'aide du logiciel commercial Star CD de la société Adapco. L'algorithme PISO a été choisi pour mener la résolution des équations moyennes de Navier Stokes et de continuité (méthode RANS). Le nombre de Reynolds (basé sur la largeur de la fente b) de l'ordre de 77000 augure d'un écoulement turbulent : les lois de parois sont appliquées dans la zone logarithmique près des parois alors que le modèle de turbulence linéaire $k-\epsilon$ standard (donc stationnaire) [2] est utilisé à l'extérieur de cette zone. La discrétisation spatiale des équations est faite par un schéma décentré amont du premier ordre (méthode des volumes finis). La convergence de la méthode est contrôlée par l'examen des résidus relatifs à chaque équation. Le critère de convergence imposé ($<10^{-6}$) est le même pour toutes les configurations testées et il est basé sur les valeurs résiduelles des composantes de la vitesse et de la pression. Le nombre d'itérations requis pour atteindre un résidu de 10^{-6} est compris entre 1500 et 2000 ce qui, sur micro-ordinateur (4 PentiumIII pro700), nécessite entre 4 et 5 jours de calcul. L'analyse numérique se limite à un calcul 2D (l'écoulement dans une passe à poissons de pente 5% est bidimensionnel [4]). Le maillage est cartésien composé d'environ 36000 cellules et affiné dans la fente, près des deux déflecteurs ainsi qu'en entrée et sortie de bassin. Les conditions limites d'entrée et de sortie sont choisies périodiques afin de retrouver en aval du bassin le débit imposé en amont et de restreindre le domaine d'étude à un seul bassin.

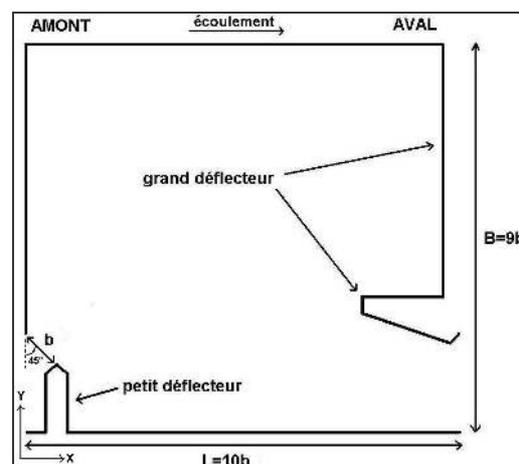


FIG. 2 – Géométrie et domaine de calcul d'une passe à fentes verticales standard

3.2 Analyse numérique dans une passe à fentes verticales « standard »

L'écoulement dans une passe à fentes verticales est, de façon schématique, composé de trois grandes régions : l'écoulement principal généré par le jet issu de la fente (environ 20% de la surface du bassin) et deux grandes zones de recirculation contrarotatives de chaque côté de ce flux principal (une première zone couvrant 60% du bassin et une seconde occupant 20%). Toutefois dans le détail cet écoulement est en fait

plus complexe puisqu'en plus des deux régions tourbillonnaires, des cellules de tailles variables sont installées dans les angles du bassin. La vitesse maximale calculée dans la fente est $V/V_f=1.2$. En entrée du bassin, le jet issu de la fente atteint une vitesse maximale V/V_f d'environ 1.3 à une distance de la fente presque égale à sa largeur (figure 3). Cette vitesse maximale dans le bassin est donc de 10% supérieure à celle chiffrée dans l'échancrure.

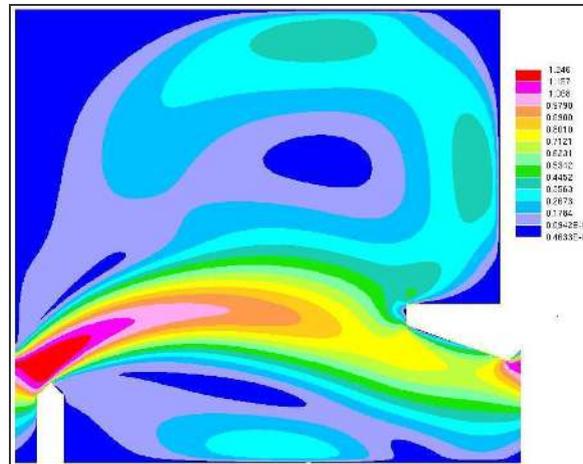


FIG. 3 – Module de la vitesse adimensionnée V/V_f dans la passe à fentes verticales standard

La structure de l'écoulement, dont la topologie est mise en évidence sur la figure 4a, est composée d'un jet issu de la fente et de 7 tourbillons de tailles variables répartis de part et d'autre de l'écoulement principal et situés dans les coins du bassin. Entre les grands déflecteurs, la première zone de recirculation, la plus grande, dont le centre est situé en $x/b=6.1$ et $y/b=6$, occupe environ 50% du bassin. Ce tourbillon généré par l'écoulement principal procure aux poissons une zone de repos (vitesses faibles) lors de la remontée de la passe. De l'autre côté du jet, une zone tourbillonnaire appelée 2, contrarotative par rapport à la précédente et de taille inférieure (représentant 15% du bassin) est engendrée près du petit déflecteur. Son centre est situé en $x/b=4.7$ et $y/b=1.5$. Une autre zone de recirculation nommée 3, plus petite (moins de 10% du bassin), contrarotative par rapport à la première est accolée à celle-ci dans le coin amont près du grand déflecteur en $x/b=1$ et $y/b=7.8$. Ce tourbillon, d'une taille non négligeable (puisque supérieure à la taille d'un petit poisson) peut être un piège pour les petites espèces qui, du fait des changements successifs de sens de recirculation, peuvent perdre leur orientation dans ces eaux tourbillonnantes. Dans une première étape d'ajustement géométrique, il conviendra d'essayer de supprimer de telles zones de recirculation afin d'éliminer ces pièges. D'autres cellules de petites dimensions sont présentes dans la partie aval du bassin près du grand déflecteur (4 et 5) et dans la partie amont près du petit déflecteur (6 et 7). Ces tourbillons générés dans les angles vifs du bassin par les recirculations principales présentent cependant moins de risques pour les poissons car ils sont de taille inférieure ou proche de celle d'un poisson.

La structure de l'écoulement générée dans la partie du bassin comprise entre les grands déflecteurs présente de fortes analogies avec les écoulements en cavité rectangulaire. Ainsi on peut assimiler le tourbillon 1 au « primary eddy » cité par Migeon [3], le tourbillon 3 au « upstream secondary eddy », le 5 au « upper secondary eddy » et le 4 au « downstream secondary eddy ». Cette analogie permet de mieux comprendre l'existence et l'évolution de ces tourbillons et d'envisager la modification de la topologie de l'écoulement dans le bassin en s'inspirant des travaux au sein de cavités.

On peut noter la présence de fortes couches de cisaillement (figure 4b) près de la fente et aux frontières du jet. Ce phénomène traduit le passage, sur une courte distance, de vitesses élevées dans le jet à des vitesses beaucoup plus faibles dans les zones de recirculation. Il existe d'importants gradients de vitesse dans ces régions du bassin. Ces zones de cisaillement peuvent représenter un piège pour les poissons qui, selon leur capacité de nage, peuvent rester bloqués dans l'écoulement recirculant sans pouvoir pénétrer le jet principal.

Il conviendra d'étudier le possible étalement de ce gradient de vitesse sur une plus vaste région entre les cellules tourbillonnaires et le jet de façon à assurer une plus douce zone de transition pour le poisson lorsqu'il traverse ces couches de cisaillement.

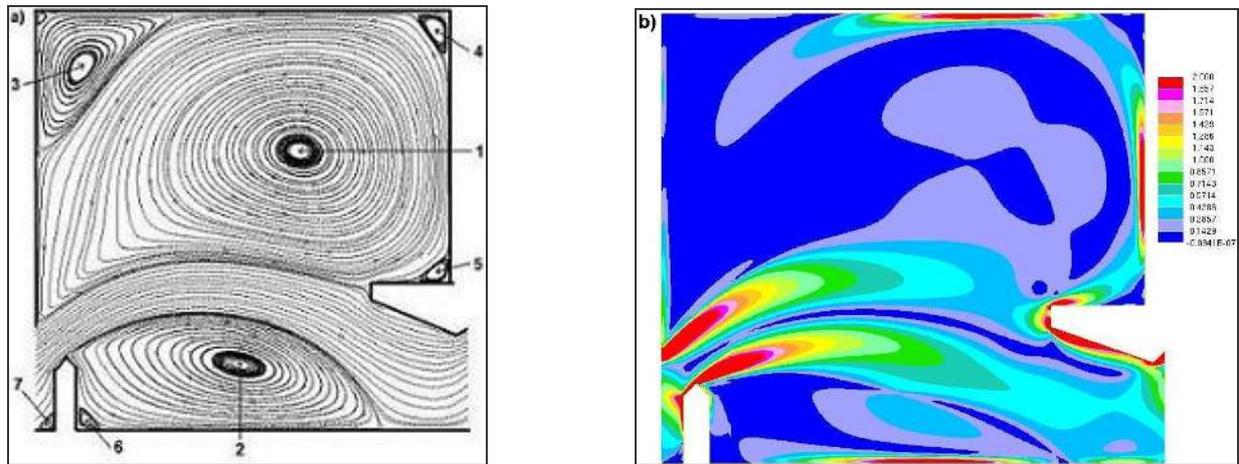


FIG. 4 – a) Lignes de courant et b) Norme du gradient de vitesse dans la passe à fentes verticales standard

La figure 5a montre des profils de vitesse adimensionnée V/V_f dans différentes sections transversales du bassin. On remarque que, dans chaque section, la vitesse maximale au sein du bassin diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la fente amont et qu'un maximum est atteint (environ 1.2) pour $x/b=1$ soit une distance équivalente à la largeur de la fente. D'une section à une autre, distantes de la largeur de l'échancrure verticale, la vitesse perd entre 5 et 10% de sa valeur et la vitesse maximale à une distance valant 7 fois la largeur de la fente vaut environ 60% de la vitesse maximale en sortie de fente. On note aussi que le jet issu de la fente s'élargit en même temps qu'il se rapproche du grand déflecteur avant de converger de nouveau vers la fente aval. Ainsi, de $x/b=1$ à $x/b=7$, le jet s'élargit d'environ 60% (à peu près 10% entre chaque section transversale). De manière analogue aux données fournies par la littérature (§1), on constate qu'un poisson remontant le courant (de l'aval vers l'amont) en passant d'une fente à l'autre par le plus court trajet (figure 5b) rencontre les conditions suivantes : vitesses décroissantes jusqu'à $0.4V_{\max}$ à la sortie de la fente aval sur une longueur de bassin de $0.4L$, faibles vitesses (moins de $0.4V_{\max}$) sur une autre distance de $0.4L$ et fortes vitesses croissantes de $0.2V_{\max}$ à V_{\max} sur une distance de $0.2L$ à proximité de la fente amont.

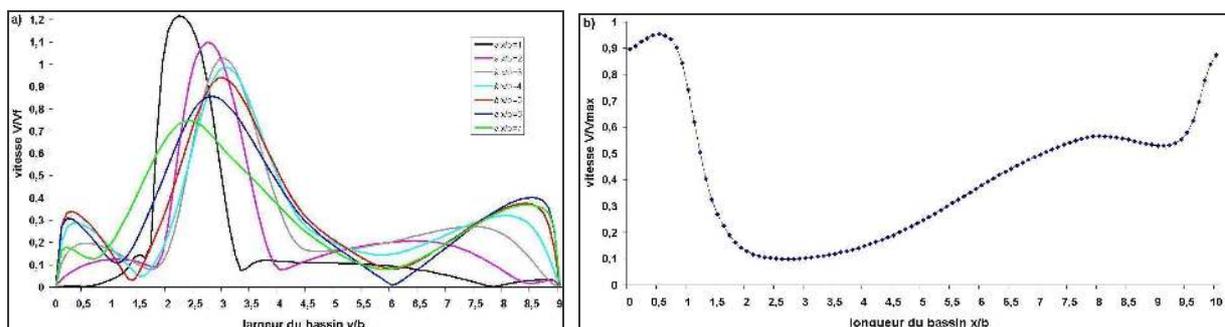


FIG. 5 – Profils de vitesse : a) V/V_f dans différentes sections x/b du bassin et b) V/V_{\max} en $y/b=1.95$

3.3 Analyse numérique de nouveaux dispositifs de passes à fentes verticales

Pour tenter de trouver des solutions (par des ajustements géométriques du bassin) aux problèmes soulevés précédemment, nous avons entrepris des simulations numériques pour différentes géométries standard tronquées. Comparativement à la géométrie de référence (figure 6A), quatre cas ont été simulés en coupant,

au prorata (voire au-delà pour la figure 6F) des tailles des tourbillons 3, 4, 5, 6, les angles dans les coins du bassin (figures 6B, C, D, E). La suppression des angles vifs se traduit par la suppression des zones de recirculation secondaires sans modifier la structure principale de l'écoulement. Les vitesses dans la fente, le jet et les cellules de recirculation principales ne sont pas affectées par la suppression d'un angle. La modification géométrique n'a pour conséquence que l'apparition de très petites cellules secondaires de tailles négligeables dans les faibles angles encore existants. Un profil de bassin semi-circulaire pourrait être envisagé [3] mais pour des raisons pratiques de modification des installations existantes, les géométries précédentes simulées numériquement seront retenues et testées expérimentalement.

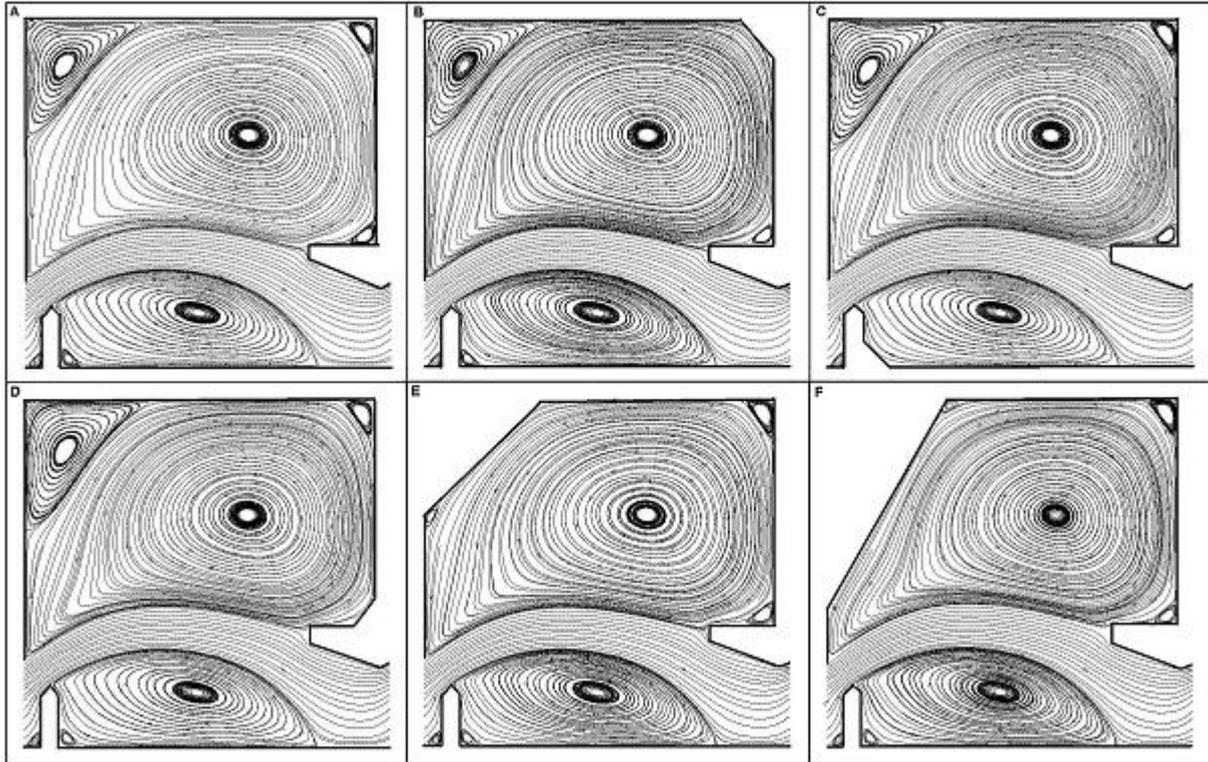


FIG. 6A à 6F – Lignes de courant dans différentes passes à fentes verticales tronquées

L'autre nécessité pour les petites espèces est de diminuer le gradient de vitesse dans les zones de fort cisaillement. Il faut développer l'épanouissement du jet dans le bassin afin d'assurer, entre les zones de recirculation et le jet, une région de transition dans laquelle le poisson passera plus progressivement des faibles aux fortes vitesses. En comparant le gradient de vitesse pour différentes géométries modifiées (changement de la forme et de l'orientation de la fente, ajout d'un déflecteur, figures 7B, C, D, E, F) à celui de la géométrie de référence (figure 7A), on constate qu'il est possible d'agir sur la direction et la vitesse du jet et donc sur le cisaillement près de la fente et dans le bassin. L'élément prépondérant influençant le flux principal est l'orientation de la fente. Pour une fente formant un angle de 60° (figure 7D), le jet a une forme curviligne dirigée vers la paroi latérale et la largeur de ce flux est augmentée, assurant un gradient de vitesse étalé lors du passage de l'écoulement recirculant à l'écoulement principal et un cisaillement progressif au franchissement de la fente. Inversement, un jet filiforme dirigé vers la fente suivante (pour un angle de fente de 30° , figure 7E) diminue la largeur du jet. La forme des déflecteurs agit aussi sur le flux principal. Un déflecteur de forme oblique (figure 7F) produit globalement les mêmes effets qu'un déflecteur de forme triangulaire formant une fente orientée à 60° . L'ajout d'un élément sur le grand déflecteur est une solution à l'épanouissement du jet. Dans le cas d'un élément de petite taille (figure 7B), l'écoulement et le gradient de vitesse ne subissent pas de modification notable. Pour un élément de grande taille (figure 7C), l'écoulement change : le flux principal est élargi et le gradient de vitesse est plus étalé au franchissement du jet. On peut ainsi modifier le cisaillement dans la fente et aux frontières du jet et assurer aux poissons des zones de transition plus vastes et un affrontement plus graduel des fortes variations des vitesses de dévalaison.

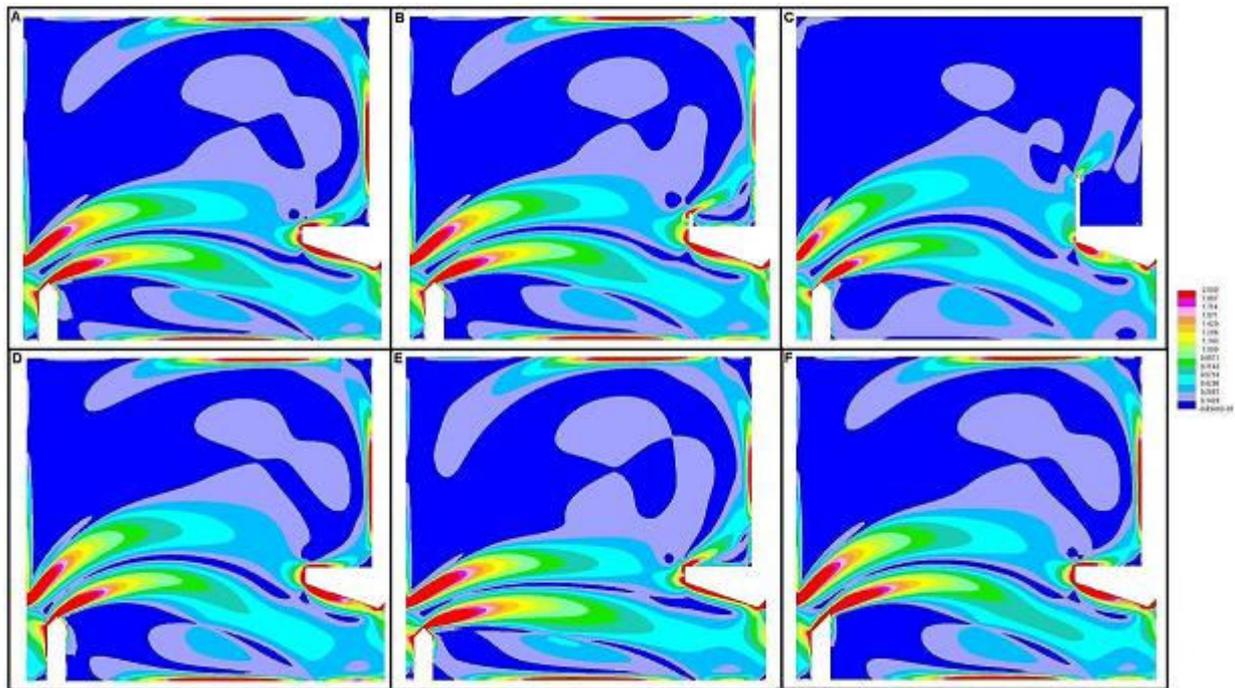


FIG. 7A à 7F – Norme du gradient de vitesse dans différentes passes à fentes verticales modifiées (légende identique à celle de la figure 4b)

4 Conclusion

L'écoulement dans une passe à poissons est composé d'un écoulement dominant (jet issu de la fente) et de deux zones principales de recirculation contrarotatives occupant la majeure partie de la surface du bassin de part et d'autre du jet. Des zones tourbillonnaires de taille plus réduite mais pour certaines non négligeable sont des pièges pour les petites espèces. En modifiant la géométrie du bassin et en particulier en tronquant ses angles, il est montré que des cellules secondaires peuvent être supprimées. En agissant sur l'angle de la fente ou sur sa taille il est possible d'influer sur l'orientation et l'épanouissement du jet. On peut ainsi étaler le cisaillement sur une plus vaste zone assurant au poisson, face aux forts gradients de vitesse, une région de transition lorsqu'il traverse l'écoulement principal.

Références

- [1] Larinier M., Porcher J.P., Travade F., Gosset C., (1998), « Passes à poissons: expertise, conception des ouvrages de franchissement », collection Mise au Point, édition Conseil Supérieur de la Pêche, 336p
- [2] Launder B.E., Spalding D.B., (1974), "The numerical computation of turbulent flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, volume 3, n°2, pp 269-289
- [3] Migeon C., (2000), « Contribution à l'analyse de l'écoulement tridimensionnel instable s'établissant à l'intérieur de cavités cylindriques », Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers
- [4] Wu S., Rajaratnam N., Katpodis C., (1999), "Structure of flow in vertical slot fishway", Journal of Hydraulic Engineering, volume 125, n°4, pp 351-360