

Optimisation de la forme des décanteurs lamellaires par la modélisation hydrodynamique 3D

A CFD approach for shape optimization of lamellar settlers

José Vazquez*, Antoine Morin**, Matthieu Dufresne*, Jonathan Wertel*

*Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg, Institut de mécanique des fluides et des solides de Strasbourg, Equipe « Hydraulique urbaine »

IMFS, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

jvazquez@engees.u-strasbg.fr

**Hydroconcept, ZA Trappes Elancourt, 46 Avenue des Frères Lumière, 78190 Trappes, France

RÉSUMÉ

L'objectif de cet article est l'optimisation du fonctionnement hydraulique tridimensionnel d'un décanteur lamellaire à flux croisés. Le critère d'optimisation choisi consiste à avoir une répartition du débit la plus homogène possible entre les lames. La modélisation 3D complète de l'ouvrage permet de montrer la répartition des vitesses, la localisation des zones de recirculations, de turbulences et les chemins préférentiels d'écoulement à l'amont, à l'aval, et entre les lames du décanteur. Plus précisément, ce sont les géométries d'alimentation et de sortie qui sont testées afin de satisfaire au mieux le critère d'optimisation. L'optimisation des formes de l'ouvrage a montré que la tranquillisation et la répartition des flux est beaucoup plus importante sur la partie amont que sur la zone aval. Sans dispositif d'entrée particulier, un pourcentage très élevé (80%) du débit passe dans 20% des lames. La répartition est médiocre et le décanteur ne peut donner les performances qui sont attendues compte tenu de la faible surface de décantation active mise en jeu. La création de chicanes, de siphons ou de parois plongeantes permet de diminuer la vitesse à l'amont des lames. En modifiant peu à peu la géométrie, nous avons obtenu un modèle de décanteur lamellaire permettant d'homogénéiser au maximum la vitesse à travers les lames. Deux géométries sont recommandées (cas 7 et 8).

ABSTRACT

The aim of this paper is the optimization of the geometry of a cross-flow lamellar settler. The optimization criterion is the velocity distribution in the lamella structure: the more homogeneous the velocity distribution is, the more efficient the settler is. The velocity distribution, the location of the recirculation and turbulence zones, the preferential flow paths (upstream of the structure, downstream and between the lamellae) are investigated using three-dimensional computational fluid dynamics. More precisely, this study investigates the influence of the geometry of the inlet and the outlet of the lamellar settler on the hydraulic behavior. The results show that without any specific baffle or siphon, 80% of the discharge is concentrated in 20% of the transversal area of the lamellae, which would be responsible for a very poor settling efficiency. Eight geometries involving baffles and siphons have been studied in order to optimize the velocity distribution: two of them are recommended (cases 7 and 8).

KEYWORDS

Lamellar settlers, shape optimization, turbulence model, CFD

INTRODUCTION

Les décanteurs lamellaires décrits dans cet article, sont des ouvrages destinés au traitement des eaux de ruissellement polluées. Le procédé de traitement est la séparation gravimétrique entre deux lames juxtaposées et inclinées par rapport à un plan horizontal. Dans ce type de décanteur, l'effluent brut pénètre horizontalement sur l'un des flancs du bloc lamellaire. L'eau circule horizontalement entre les lames tandis que les particules plus denses que l'eau chutent. Les eaux claires sortent de l'autre côté de la structure lamellaire (voir figure 1).

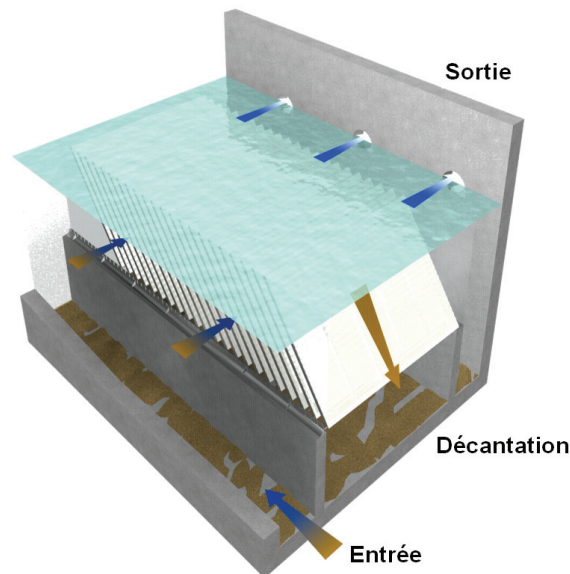


Figure 1 : Décanteur lamellaire à flux croisés

Depuis les années 1990, de nombreux auteurs (Chebbo 1992, Chocat 1997, Ashley *et al.* 2004) ont montré que les matières polluantes entraînées par les eaux de ruissellement étaient majoritairement fixées sur de fines particules véhiculées en suspension. Selon ces auteurs, environ 80 % de la masse de ces particules ont un diamètre inférieur à 100 microns ; le diamètre médian des particules avoisine les 30 microns. Les vitesses de chute habituellement retenues pour le calcul du nombre de lames qui équipent les décanteurs sont donc très faibles. En pratique, cela signifie qu'il faut mettre en œuvre des surfaces de décantation très importantes pour pouvoir séparer ces très fines particules. Le calcul du nombre de lames conduit donc à des ouvrages de grandes dimensions. Malheureusement cela ne facilite pas la répartition de l'eau dans la totalité de la structure lamellaire. Or, l'une des hypothèses utilisée pour le calcul du nombre de lames est la répartition homogène de l'eau entre toutes les lames. C'est l'une des clés du bon fonctionnement d'un décanteur lamellaire. Ce problème est d'ailleurs signalé par Chocat (1997) dans son "Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement". Celui-ci explique en effet que : pour les "décanteurs à courants croisés, si leur principe permet théoriquement de construire des ouvrages très compacts et de faible hauteur, les problèmes d'équirépartition hydraulique du débit sur les lamelles sont particulièrement difficiles à résoudre et aucune solution réellement satisfaisante à l'échelle industrielle n'a pu être dégagée."

La modélisation tridimensionnelle 3D est un outil particulièrement performant pour permettre la connaissance fine du champ de vitesse dans un ouvrage hydraulique. Les outils CFD (Computational Fluid Dynamics) sont aujourd'hui suffisamment validés par rapport à l'expérimental pour permettre des études d'optimisation de forme dans le but d'atteindre un comportement hydraulique précis. Le code retenu pour cette étude est Fluent (2001), déjà utilisé pour l'étude des déversoirs d'orage (Lipeme-Kouyi 2004) et des bassins d'orage (Stovin *et al.* 1994, Adamsson *et al.* 2003, Dufresne *et al.* 2009).

L'objectif principal de cette étude est l'optimisation du fonctionnement hydraulique tridimensionnel d'un décanteur lamellaire à flux croisés. Le critère d'optimisation consiste à avoir une répartition du débit la plus homogène possible entre les lames. La modélisation 3D complète de l'ouvrage va permettre de montrer comment se répartissent les vitesses, de localiser les zones de recirculations, de turbulences, et les chemins préférentiels d'écoulement à l'amont, à l'aval, et entre les lames du décanteur. Plus précisément, ce sont les géométries d'alimentation et de sortie qui seront testées afin de satisfaire au mieux le critère d'optimisation précédemment défini.

1 PRINCIPE DE MODELISATION ET METHODE DE COMPARAISON

Le code de calcul utilisé pour la modélisation 3D est le logiciel Fluent®. Il utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations de Reynolds. Le modèle de turbulence utilisé pour nos simulations est le modèle RSM – Reynolds Stress Model (voir par exemple Versteeg & Malalasekera 1995). Les conditions aux limites sont du type Dirichlet à l'entrée (vitesse imposée) et à la sortie (sortie de fluide à la pression atmosphérique). La surface libre a été modélisée par un plan de symétrie, approche couramment utilisée avec succès lorsque la surface libre est horizontale (Stovin *et al.* 1994, Adamsson *et al.* 2003, Dufresne *et al.* 2009).

La construction du maillage constitue la première étape de toute simulation numérique. Cette construction concerne non seulement le nombre de mailles mais aussi leur taille et leur forme. Typiquement, on densifie le maillage dans les zones où de forts gradients sont attendus. Inversement, dans les zones où les gradients sont probablement faibles, des mailles plus grandes peuvent être utilisées. Concernant la forme, on privilégie les mailles hexaédriques. Cependant, dans le cas de géométries complexes, de telles mailles ne sont pas toujours utilisables ; des cellules tétraédriques peuvent alors, par exemple, être utilisées. Pour obtenir des résultats de simulation corrects, le maillage doit être construit avec le plus grand soin. Le choix du nombre de mailles constitue un compromis entre le temps de calcul et la qualité des résultats. En général, on constate que les résultats n'évoluent plus de façon significative au delà d'un certain nombre de mailles. Construire un maillage plus fin n'est donc pas nécessaire. Si la concordance avec les expériences est malgré tout mauvaise, il faut, non pas affiner le maillage, mais modifier le choix des modèles.

Le maillage qui a été choisi a fait l'objet d'une étude de sensibilité. Trois maillages ont été testés : 300 000 mailles, 700 000 mailles et 1 500 000 mailles. Les résultats ont montré qu'un maillage à 700 000 mailles est performant du point de vue des résultats et du temps de calcul (Vazquez *et al.* 2009).

Nous avons choisi de réaliser les comparaisons en prenant pour référence le débit d'alimentation des lames. Celui-ci a été choisi comme indiqué sur la figure suivante :

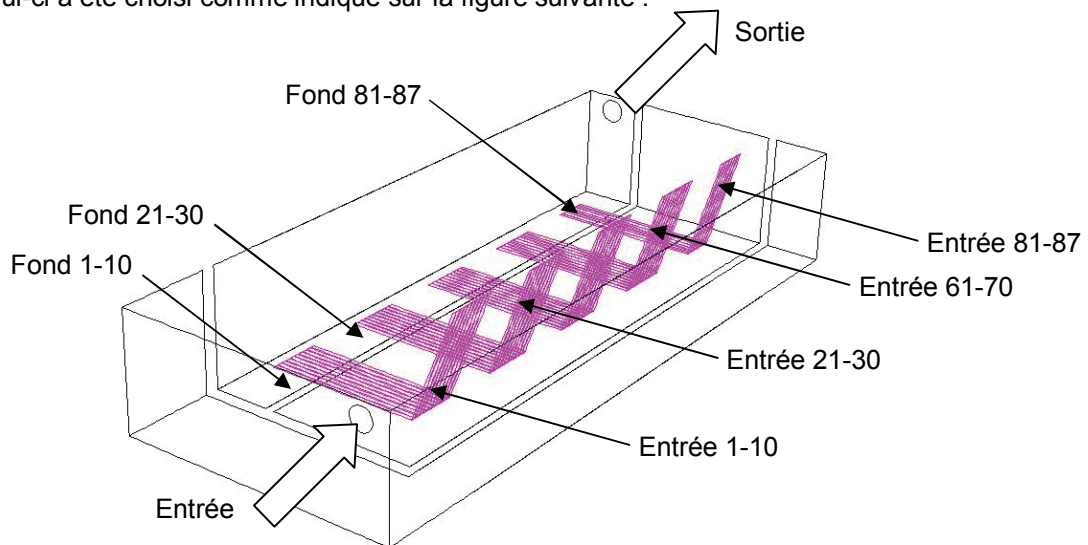


Figure 2 : Débit de comparaison

Comme illustré sur la figure 2, les lames sont regroupées par paquets de 10 (sauf le dernier qui en comporte 7). On dispose ainsi de 9 débits d'entrée.

2 CARACTERISTIQUES DU DECANTEUR LAMELLAIRE A FLUX CROISES

L'objectif de cette partie est la comparaison des performances des décanteurs ayant différents modes d'alimentation des eaux brutes et différents modes de sortie des eaux claires. On rappelle que le principal critère de performance consiste à avoir une alimentation des lames la plus homogène possible. Le taux de recirculation avec le fond est également un critère de qualité, plus le taux est faible et moins il y aura de remise en suspension.

Une répartition homogène dans chaque lame représente 1,15% du débit d'entrée c'est-à-dire pour un paquet de 10 lames nous avons 11,5% du débit d'entrée et pour les 7 dernières lames 8.05%. Ces

valeurs constituent une répartition idéale du débit.

Les lames ont les dimensions suivantes : 3,20 m de largeur x 2,0 m de hauteur. La surface de décantation est constituée par des plaques planes, ce qui les différencie des plaques utilisées pour fabriquer les lames de décanteurs lamellaires à contre-courant (plaques nervurées).

Nous avons retenu les caractéristiques géométriques et hydrauliques suivantes :

- ✓ Débit de traitement dans le compartiment lamellaire : 0,088 m³/s
- ✓ Hauteur des lames : 2,00 m
- ✓ Largeur des lames : 3,20 m
- ✓ Espaces entre lames : 0,09 m
- ✓ Angle d'inclinaison : 55 °
- ✓ Vitesse de sédimentation retenue : 1 m/h
- ✓ Nombre de lames : 87
- ✓ Hauteur minimale sous lamelles : 0,80 m
- ✓ Largeur du couloir d'alimentation : 1,20 m
- ✓ Largeur du couloir d'évacuation : 1,20 m
- ✓ Surface de décantation pour le compartiment décanteur : 557 m²
- ✓ Surface de décantation projetée : 319 m²
- ✓ Vitesse d'écoulement moyen : 0,43 cm/s

Huit configurations ont été testées :

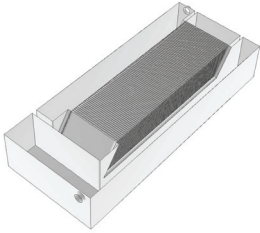
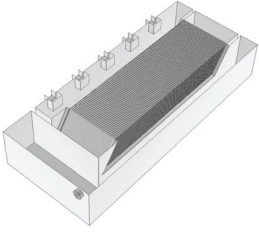
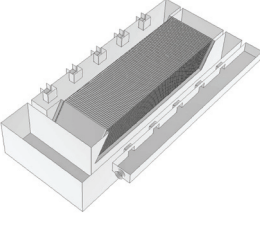
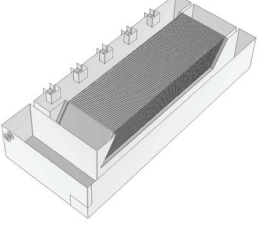
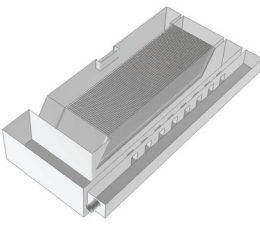
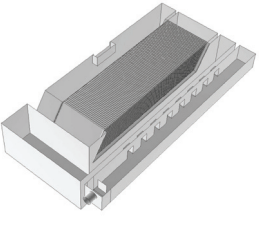
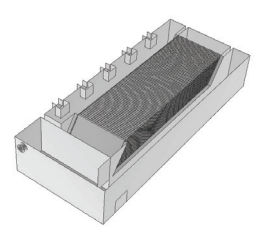
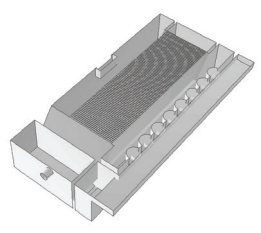
<p>TEST 1</p>  <p>Entrée directe sans canal d'alimentation et sans déversoir de sortie</p>	<p>TEST 2</p>  <p>Entrée directe sans canal d'alimentation et avec 5 déversoirs de sortie</p>	<p>TEST 3</p>  <p>Entrée avec canal d'alimentation percé de 5 baies, et sortie par 5 déversoirs</p>	<p>TEST 4</p>  <p>Entrée indirecte sans canal d'alimentation et sortie par 5 déversoirs</p>
<p>TEST 5</p>  <p>Entrée avec canal d'alimentation percé de 8 baies et sortie par un déversoir unique</p>	<p>TEST 6</p>  <p>Entrée avec canal d'alimentation percé de 8 baies avec déflecteur et sortie par un déversoir unique</p>	<p>TEST 7</p>  <p>Entrée indirecte sans canal d'alimentation avec déflecteur et sortie par 5 déversoirs</p>	<p>TEST 8</p>  <p>Entrée indirecte avec voile siphonoïde, puis canal comportant 8 seuils d'alimentation suivis de manchettes plongeantes, et sortie avec un déversoir unique</p>

Figure 3 : Ensemble des tests

3 RESULTATS

La figure suivante montre l'évolution du débit d'entrée pour chaque groupe de lame et pour les 8 cas testés.

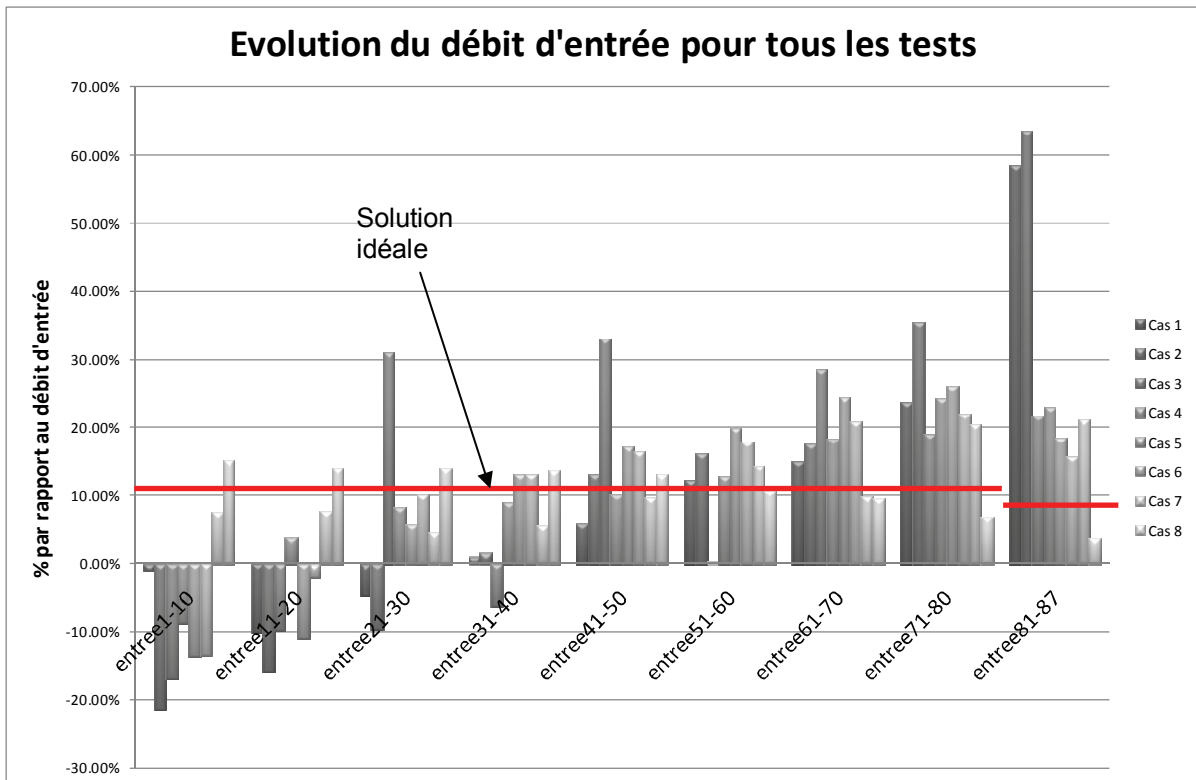


Figure 4 : Evolution des débits d'entrée pour l'ensemble des cas

Les deux premiers tests montrent des débits négatifs à travers les 30 premières lames. Ces recirculations engendrent une élévation du débit par rapport à la solution idéale pour les groupes de lame les plus éloignés de l'entrée. Les figures 5 et 6 montrent les lignes de courant pour les cas 1 et 2.

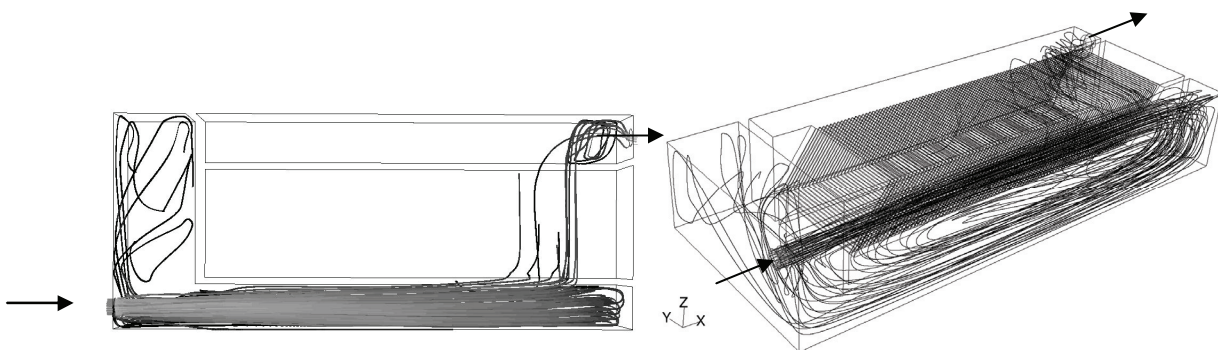


Figure 5 : Lignes de courant pour le cas 1

Pour ces deux tests, l'effluent brut pénètre dans le couloir d'alimentation avec une vitesse de l'ordre de 0,5 m/s. Le flux percute le voile placé au fond du couloir, puis repart en sens inverse, ce qui crée une grande recirculation dans le canal d'entrée. Dans cette configuration, il sera difficile d'avoir une répartition homogène des débits dans chaque groupe de lames. Plus de 80% du débit transite dans les 17 dernières lames.

Les recirculations horizontales à travers les lames du décanteur représentent au maximum 46.9% du débit d'entrée pour le test 2.



Figure 6 : Lignes de courant pour le test 2

L'ajout des déversoirs de sortie ne permet pas de réduire la recirculation dans le canal d'entrée ni d'améliorer la répartition de l'eau entre les lames.

Pour les tests 3 et 4, on compare essentiellement la forme de l'alimentation. Dans cette configuration, on constate que la répartition des vitesses est plus homogène que précédemment. Pour le test 3, on remarque que les lames qui sont en face des baies d'entrée profitent bien de l'écoulement ; en revanche, celles qui sont en quinconce ont l'effet contraire. Les recirculations horizontales représentent 33.1% du débit d'entrée.

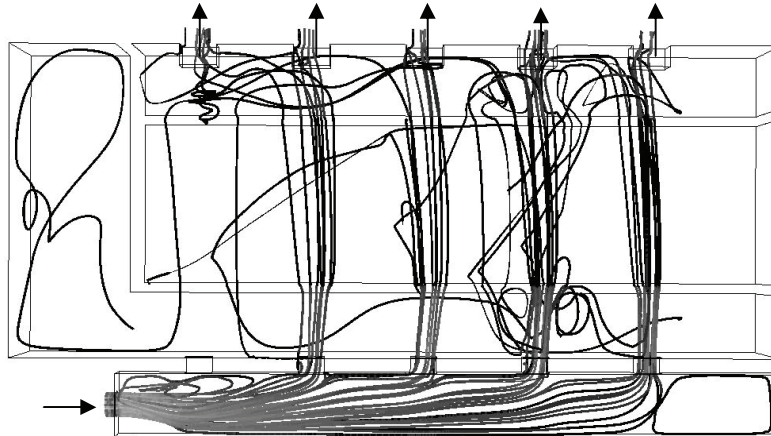


Figure 7 : Lignes de courant pour test 3

Dans le test 4, on a cherché à « casser » la vitesse en entrée afin de ralentir l'écoulement et d'homogénéiser la répartition du flux entre chaque lame. La canalisation d'entrée a ainsi été décalée pour que le flux vienne percuter le mur. On observe une nette amélioration de la répartition du débit entre les différentes lames. Les recirculations horizontales ne représentent plus que 8.9% du débit d'entrée. La tranquillisation du flux en entrée permet une meilleure répartition des débits dans les différentes lames. Le test 4 est plus performant que le test 3.

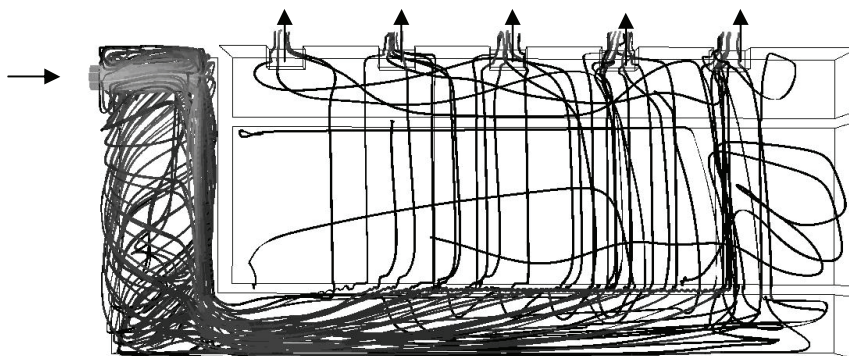


Figure 8 : Lignes de courant pour le test 4

Le test 5 cherche à améliorer le test 3 en ajoutant 3 baies supplémentaires en entrée. On dispose

ainsi de 8 baies d'entrée. Les déversoirs de sortie ne permettant pas d'améliorer la répartition homogène des débits dans les lames, il a donc été décidé de ne disposer qu'un seul déversoir de surverse plus large en sortie.

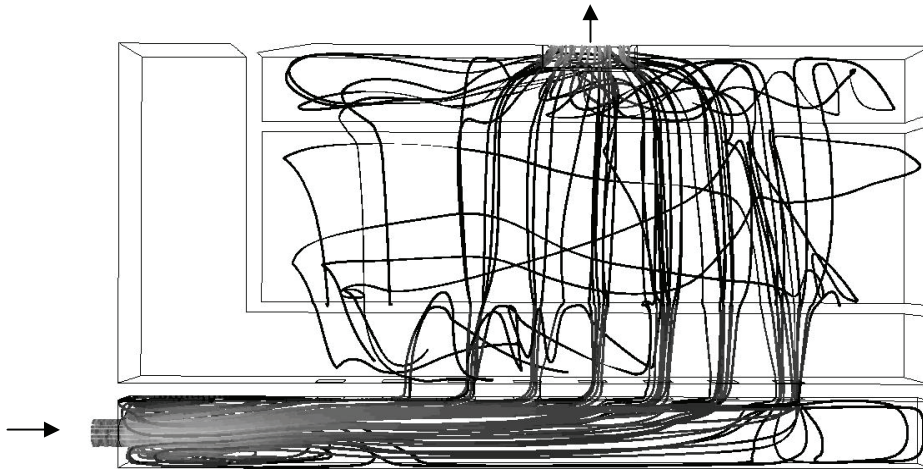


Figure 9 : Lignes de courant pour le test 5

On remarque que la répartition – qui n'est pas encore suffisamment homogène – s'améliore par rapport aux tests 1 et 2. Les recirculations horizontales représentent 24.6% du débit d'entrée. Elles sont meilleures que dans le cas du test 3. Les recirculations horizontales représentent 24.6% du débit d'entrée.

Le test 6 reprend le modèle précédent mais avec en plus un déflecteur en tête pour « casser » les vitesses en entrée (comme pour le test 4).

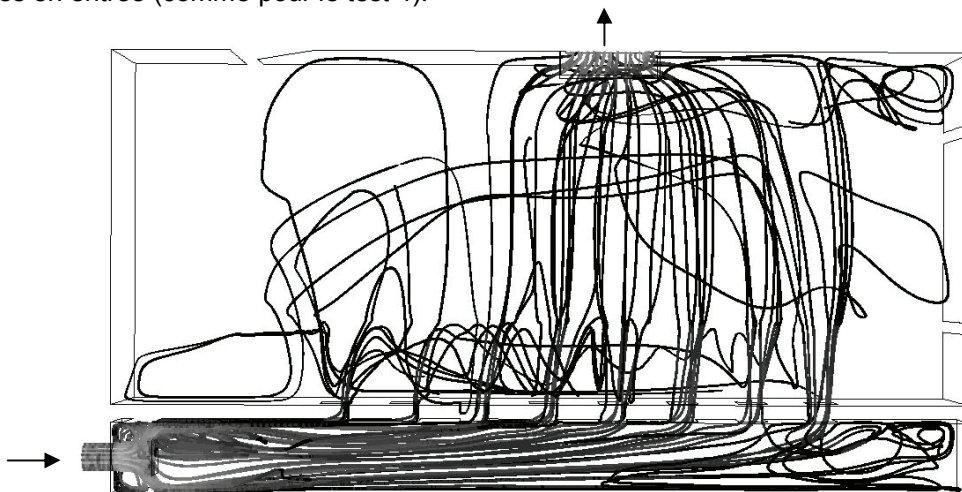


Figure 10 : Lignes de courant pour le test 6

On constate une légère amélioration par rapport au test 5. En effet, la valeur maximum de débit dans les lames passe de 26.1% (entrée 71-80 figure 69) à 21.9% (entrée 71-80 figure 80). Les recirculations horizontales représentent 15.5% du débit d'entrée.

L'objectif du test 7 est de reprendre la modélisation 4 et d'ajouter une paroi déflectrice en entrée avec toujours pour même objectif de réduire les vitesses en entrée.

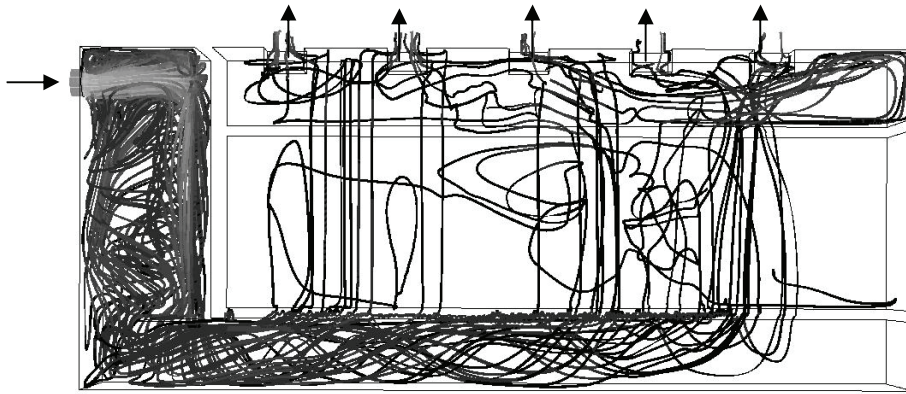


Figure 11 : Lignes de courant pour le test 7

Concernant le test 7 par rapport au cas 4, on remarque qu'il n'y a plus de recirculation entre les lames. Le débit n'est pas « parfaitement homogène » mais il représente toutefois un écart faible par rapport à la répartition homogène de 11.5% pour 10 lames.

Le test 8 reprend le principe des modélisations 6 et 7 mais en disposant des seuils au lieu de baies en entrée et en ajoutant des manchettes siphoniques derrière les 8 seuils.

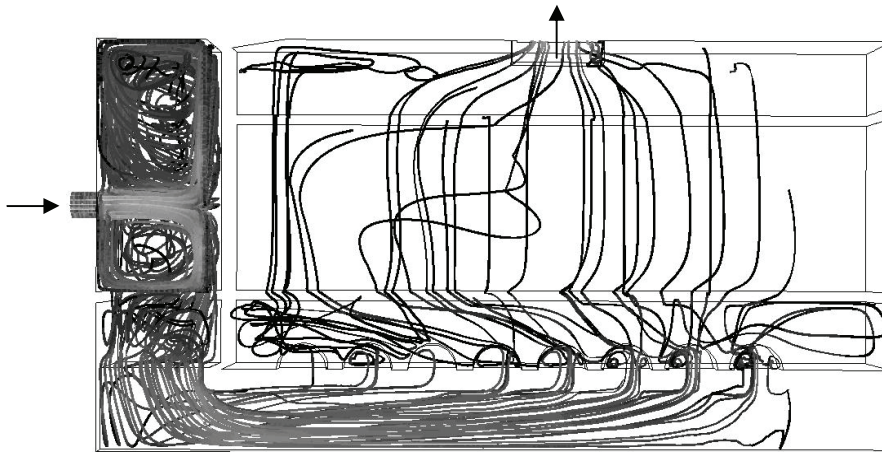


Figure 12 : Lignes de courant pour le test 8

Concernant le test 8, la répartition des débits d'entrée est quasiment identique au cas test 6. On remarque également que l'évolution des débits dans les lames est inversement proportionnelle au débit dans chaque seuil d'entrée, ce qui démontre l'utilité des manchettes siphoniques pour améliorer la répartition de l'eau brute dans les lames.

On remarque que le dernier test est le plus performant en termes de débit homogène sur l'ensemble des lames.

Le graphique suivant représente le pourcentage de recirculation verticale avec le fond (rapport du débit recirculé sur le débit d'entrée) en fonction des différents tests. La recirculation est limitée (< 20%) pour l'ensemble des cas testés à l'exception des cas 2 et 5.

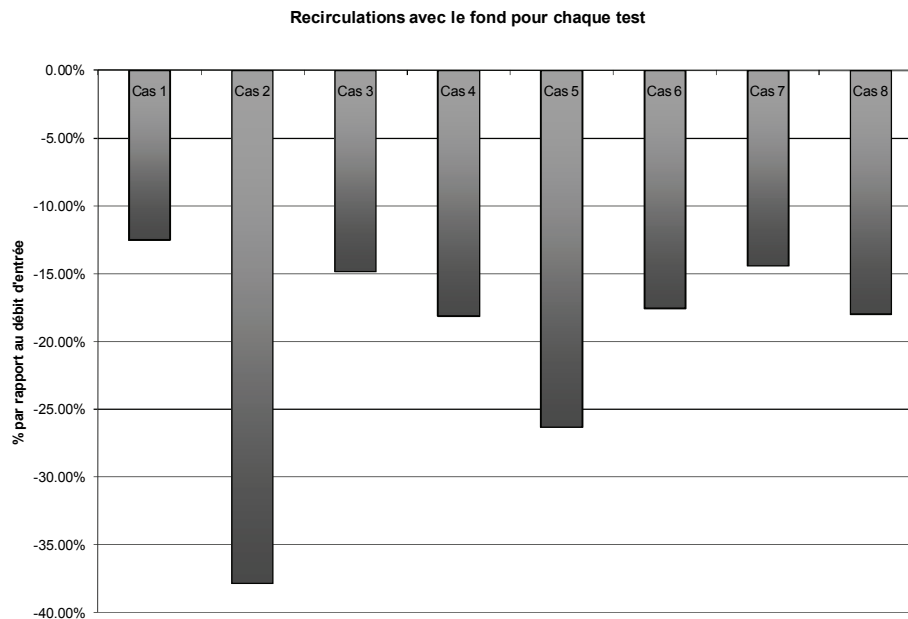


Figure 13 : pourcentage de recirculation avec le fond

4 CONCLUSION

L'objectif de cette étude a été d'optimiser les configurations d'entrée et de sortie d'un décanteur lamellaire à flux croisés. Nous avons pu montrer l'intérêt de la modélisation tridimensionnelle en termes de compréhension hydrodynamique de l'ouvrage de décantation. L'optimisation des formes de l'ouvrage a montré que la tranquillisation et la répartition des flux est beaucoup plus importante sur la partie amont que sur la zone aval. Sans dispositif d'entrée particulier, un pourcentage très élevé (80%) du débit passe dans 20% des lames. La répartition est médiocre et le décanteur ne peut donner les performances qui sont attendues compte tenu de la faible surface de décantation active mise en jeu. La création de chicanes, de siphons ou de parois plongeantes permettent de diminuer la vitesse à l'amont des lames. En modifiant peu à peu les modèles testés, nous avons obtenu un modèle de décanteur lamellaire permettant d'homogénéiser au maximum la vitesse à travers les lames. Parmi les huit cas testés, nous retiendrons les cas 7 et 8 comme étant les plus performants par rapports au critère retenu.

Un argument en faveur des décanteurs lamellaires à flux croisés que l'on trouve dans les documentations commerciales est que la zone de stockage des boues est protégée des phénomènes de réentraînement puisqu'elle est délimitée par deux murs. On constate dans notre étude, que les recirculations avec le fond des lames génèrent des vitesses verticales locales inférieures à 2,5 cm/s. Ces faibles vitesses ne vont « probablement » pas générer de recirculation de matières en suspension. Toutefois, des données expérimentales permettraient de justifier la tranquillisation hydrodynamique de cette partie de l'ouvrage.

En conclusion, les simulations numériques ont permis de tester différents concepts de décanteur. Les modèles numériques arrivent à prédire si un ouvrage fonctionne de manière satisfaisante du point de vue hydraulique. Mise à part une campagne de mesure en entrée et en sortie sur de longues séries d'épisodes pluvieux, la modélisation numérique permet de donner à l'investisseur une garantie de fonctionnement hydraulique et donc de traitement, préalablement à la réalisation d'un ouvrage.

BIBLIOGRAPHIE

- Adamsson, Å., Stovin, V.R. & Saul, A.J. (2003). *Bed shear stress boundary condition for storage tank sedimentation*. Journal of Environmental Engineering, 129(7), 651-658.
- Ashley, R.M., Bertrand-Krajewski, J.L. & Hvited-Jacobsen, T. (2004). *Solids in sewers*. IWA publishing, Scientific and technical report n°14.
- Chebbou, G. (1992). *Solides des rejets urbains par temps de pluie : caractérisation et traitabilité*. Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, France.

Chocat, B. (1997). *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*, Bassins de retenue p. 95, Eurydice 92, Ed Tec&Doc Lavoisier, Paris, 1997, 1121 p.

Dufresne, M., Vazquez, J., Terfous, A., Ghenaim, A. & Poulet, J.B. (2009). *Experimental investigation and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank*. Computers & Fluids 38(5), 042-1049.

Fluent (2001). *Fluent 6.0 software User's Guide*. Fluent Inc.

Lipeme-Kouyi, G. (2004). *Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur (Strasbourg 1), Strasbourg, France.

Stovin, V.R. & Saul, A.J. (1994). *Sedimentation in storage tank structures*. Water Science and Technology, 29(1-2), 363-372.

Vazquez, J., Morin, A., Wertel, J. & Dufresne, M., (2009) *Optimisation Hydrodynamique des décanteurs lamellaires à flux croisés*, Rapport de convention d'étude pour la société Hydroconcept.

Versteeg, H.K. & Malalasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics*. Prentice Hall.